HABITER SOUS TERRE :

L'ARCHITECTURE TROGLODYTE COMME SOLUTION D'HABITAT FACE AUX CLIMATS EXTREMES

DORIAN JOUVENOT



Photo de couverture :
Mirador Padre Poveda de Guadix (Andalousie, Espagne).
Photo : Dorian JOUVENOT

HABITER SOUS TERRE :
L'ARCHITECTURE TROGLODYTE COMME SOLUTION D'HABITAT FACE AUX CLIMATS EXTREMES

par Dorian Jouvenot

L’auteur (Dorian Jouvenot) :

J’ai effectué l’entièreté de ma scolarité à l’ENSAPVS. Après une L1 passé par le G10 (HM) avec au S1 comme professeurs référent M.Thierry Cazals et Mme Dana Joulin, puis M.Edouard Gardebois au S2, j’ai débuté et fini ma L2 au G6 (Laroche) avec Mme Anne-Sophie Brychcy et M.Stéphane Thomasson. En L3, j’ai décidé de rejoindre le G8 (Alto) avec M.Simon Rodriguez-Pagès et M.Laurent Gilson pour le S5 et le G11 (Alto) au S6 avec M.Thibaut David et M.Jean-Michel Veillerot avant de partir en M1 commencé mon Master à l’UCN à Antofagasta au Chili. L’année dernière, j’ai effectué mon S9 en Guyane avec le DE1 : Villes Emergentes avec M.Hervé Dubois et Mme Estelle Poisson et depuis Février 2025 j’ai effectué mon stage de formation pratique chez Marin + Trottin Périphériques Architectes jusqu’au mois de Juillet 2025.

Depuis mon entrée à l’école, je m’intéresse fortement à l’architecture bioclimatique.
Ainsi, la plupart de mes projets réalisés à l’école tentent de traiter cette thématique qui me tient à cœur. D’autre part, je me suis intéressé de plus en plus aux architectures climatiques traditionnelles aux cours de mes nombreux voyages (Croatie, Monténégro, Etats Unis, Portugal, Maroc, Egypte). J’aimerais fortement pouvoir travailler dans cette branche dans un futur proche, c’est pourquoi j’ai décidé de traiter le sujet des habitats troglodytiques en Andalousie, car je souhaite aller m’installer et travailler là-bas une fois diplômé.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux grâce auxquels la réalisation de cet ouvrage a été rendue possible, qu'il s'agisse des collectivités locales, des entreprises et des personnes privées qui ont bien voulu autoriser l'accès de leurs propriétés ou de leur documentation.

Ainsi, je tiens à remercier particulièrement :

- Ma mère Mme Sonia Abizanda, médecin urgentiste tout simplement car c'est grâce à elle que je me suis mis à étudier l'architecture.
- Mon père, ingénieur informatique à l'Académie de Versailles pour ces suggestions en ce qui concerne la mise en page et la présentation de cet ouvrage ainsi que pour ces encouragements.
- David Serero et Pierre Vincent, architectes et professeurs à l'ENSAPVS pour leur contribution à l'élaboration de mon mémoire, leur supervision et leur suivi régulier, leurs conseils pour la méthodologie, leurs corrections et le fait de m'avoir accompagné tout au long de l'écriture de ce mémoire ainsi que sa relecture.
- L'ENSAPVS et la Bibliothèque de l'école qui m'ont permis d'accéder à la documentation et d'obtenir les ouvrages et les connaissances nécessaires à l'écriture de ce mémoire et de m'avoir permis d'accéder à ces ressources littéraires pour apporter des précisions aux études de cas que je réalisais surtout vis-à-vis de la partie climatique.
- Le personnel d'accueil du Castillo Marquez de los Velez qui m'ont permis de rentrer en contact avec M. Jean-Pierre Liégeois, m'ont fournis dans informations précieuses quant à la visite et la découverte des habitats troglodytiques de Cuevas de Almanzora et qui m'ont également aidé pour rédiger la Bibliographie du mémoire.
- Jean-Pierre Liégeois, sociologue et professeur à l'université Paris-Descartes pour les informations précises qu'il m'a communiquées et l'accès exclusif à ses ouvrages dont un qu'il n'a pas encore publié.
- Les propriétaires et habitants des différents villages andalous où j'ai effectué mes entretiens pour leur patience, leur accueil et qui ont bien voulu répondre à nos questions et nous laissés accéder à leurs logements.
- Le personnel du restaurant *« Asador la Gruta »* et son patron pour m'avoir ouvert leurs portes en plein service et m'avoir permis de réaliser une étude d'espace troglodyte utilisé pour des services en l'occurrence ici la restauration.
- A tous ceux qui m'ont aidé à apporter des informations sur ce mémoire.

METHODOLOGIE DE RECHERCHE

1. Étude de la littérature :

1.1) Effectuer un examen approfondi des ouvrages cités en bibliographie traitant de l'architecture troglodyte en général puis spécifique à Guadix et Setenil de las Bodegas.

1.2) Analyse historique : Avant d'aller en Andalousie dans les villages que je souhaite traiter en étude de cas, je souhaite avant tout effectuer un travail de recherches sur l'évolution historique de l'urbanisme de ces villages troglodytes au fil du temps depuis l'émergence des premiers habitats troglodytiques jusqu'à aujourd'hui.

- Accéder à des archives historiques pour les villages étudiés
- Étudier les origines, les raisons de l'émergence et le développement des habitats troglodytes dans les villages étudiés.

1.3) Réaliser des cartographies du contexte des villages étudiés.

2. Etude de terrain : Créer une documentation exhaustive sur les études de cas de Guadix, Setenil de las Bodegas et des autres villages andalous étudiés :

2.1) Réaliser des relevés architecturaux : Partir visiter ces deux villages andalou, sur place, afin d'avoir sa propre sensibilité et expérience sur le terrain.

- Réalisé des relevés thermique avec un thermomètre électrique.

2.2) Partir dans la perspective d'observer et d'étudier les différents modes constructifs, l'urbanisme et la conception architectural de ces villages.

2.3) Entrer dans des habitats troglodytes pour étudier et analyser leur architecture intérieur et comprendre les mécanismes architecturaux mis en place pour la régulation thermique naturelle.

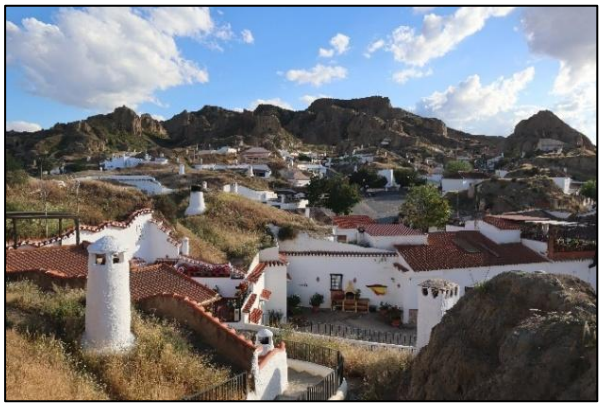
- Analyser aussi également les limites et les failles de cette architecture troglodyte.

2.4) Réaliser une analyse comparative des deux villes : à propos des matériaux utilisés (ressources locales ou importées), de l'organisation spatiale, de l'interaction avec le paysage.

- Identifier les différences et similitudes entre les techniques de construction, les configurations troglodytes de Guadix et Setenil et leur évolution au fil du temps.

2.5) Représentation graphique : Enrichir son expérience et ses recherches sur site en créant des sources d'informations par le croquis d'observation et la documentation photographique.

Guadix (Province de Grenade) :



Source : Guadix, Andalousie, Espagne.

Setenil de las Bodegas (Province de Cadix)



Source : Setenil de las Bodegas, Andalousie, Espagne, *Site internet : Ancient Origins*

---

3. Entretiens, interviews, reportages et rencontres :

3.1) Collaboration avec des architectes & spécialistes travaillant sur l'architecture troglodyte en Espagne, Andalousie ou spécifiquement à Guadix et Setenil de las Bodegas :

- **Jean-Pierre Liégeois**, né en 1947, est un sociologue français, professeur à l'université Paris-Descartes. Ses thèmes de recherches sociologiques s'orientent vers les populations roms, les minorités et la politique, notamment les minorités et les institutions internationales, les politiques européennes et les contextes de migrations.
- **Ummoestudio (Andrés Moreno) :** Ce cabinet a réalisé la transformation des grottes de *Cuevas del Pino* dans la Sierra Morena. Ils ont intégré des matériaux modernes tels que le béton et le marbre, tout en respectant la structure naturelle de la roche et en ajoutant des baies vitrées pour optimiser la lumière naturelle.
- **GilBartolomé Architecture** : Dirigé par Pablo Gil et Jaime Bartolomé, ce studio est connu pour des projets comme la *Casa del Acantilado* à Salobreña, un chef-d'œuvre troglodyte combinant design futuriste et intégration paysagère. Ils utilisent des matériaux comme les tuiles en zinc et des façades vitrées pour maximiser la luminosité et l'harmonie avec l'environnement.
- **Cuevas El Torriblanco :** Bien qu'axée sur l'hébergement durable, cette initiative à Gorafe met en avant la restauration de maisons troglodytes dans un cadre écologique, utilisant l'énergie solaire et éolienne pour leur autonomie énergétique.
- **David Vico :** Photographe et collaborateur de plusieurs projets troglodytes, il a documenté des créations comme *Cuevas del Pino*, mettant en valeur leur design intérieur et leur intégration dans le paysage.

- **Passer dans leur agence et réaliser des entretiens** avec eux à propos du patrimoine architectural troglodyte à préserver et dont on peut, doit s'inspirer pour un habitat contemporain durable.

3.2) Avec les populations locales vivant dans des habitats troglodytes afin qu'ils m'expliquent réellement les enjeux et problématiques auxquels ces villages et eux-mêmes sont confrontés mais également les qualités architecturales qu'ils apprécient au sein de leur village et de l'architecture troglodyte. Leur demander également comment cette architecture a évolué avec le temps. Pourquoi choisir d'habiter un habitat troglodyte plutôt qu'une maison ordinaire ?

- Collecter des témoignages et données sur les techniques et matériaux utilisés.
- Analyser les perceptions des habitants et des acteurs locaux face à gestion de la du patrimoine local.

3.3) Faire remplir des questionnaires aux populations locales pour recueillir des données en matière d'architecture troglodyte et leurs spécificités en Andalousie.

4. Analyser les performances climatiques et écologiques des habitats troglodytes :

4.1) Évaluer les qualités bioclimatiques des habitations troglodytes, notamment leur capacité à réguler la température et leur faible consommation énergétique.

- Création de tableaux comparatifs entre différentes régions du monde soumises à des climats extrêmes

4.2) Identifier les éléments architecturaux favorisant la durabilité environnementale notamment en terme de matérialité.

4.3) Évaluer les critères de performances énergétiques des différents habitats troglodytes dans le monde et des habitats troglodytes des villages étudiés et comparer ces performances avec celles des constructions contemporaines.

- Création de tableaux comparatifs

4.4) Réaliser un tableau comparatif des climats des régions étudiés : niveaux de chaleur, niveaux d'ensoleillement, niveaux de pluviométrie…

4.5) Réaliser un tableau comparatif des climats et de la géologie / géographie entre les régions étudiées.

4.6) Réaliser un tableau comparatif des propriétés thermiques et performances des différents types de roches des habitats troglodytes dans les régions étudiées.

4.7) Réaliser un tableau comparatif des qualités liées au confort usuel des habitations troglodytiques en **Andalousie**, dans le **sud de la Tunisie**, en **Cappadoce**, et dans le **Shensi (Chine)**.

5. Étudier les enjeux contemporains liés à la préservation et à la réhabilitation du patrimoine architectural rural :

5.1) Examiner les défis liés à la conservation de ces habitats face aux exigences modernes (confort, normes urbanistiques).

5.2) Analyser les politiques et initiatives locales visant à préserver ces formes d'habitat.

5.3) Proposer des stratégies pour concilier préservation patrimoniale et adaptation aux besoins actuels des habitants.

6. Examiner l'impact socio-économique et culturel des habitats troglodytes sur les communautés locales :

6.1) Voir comment l'architecture troglodyte peut être un levier de développement rural.

6.2) Analyser l'influence de l'architecture troglodyte sur le tourisme local et patrimonial et les enjeux de la revitalisation économique des villages andalous.

7. Explorer le potentiel de l'architecture troglodyte dans la transition écologique :

7.1) Évaluer la pertinence de ces habitats comme modèle pour une architecture contemporaine durable.

7.2) Identifier des solutions architecturales contemporaine inspirées des habitats troglodytes pour réduire l'impact écologique des constructions modernes.

7.3) Étudier des projets contemporains d'architecture troglodyte et leurs nouvelles méthodes de construction.

7.4) Analyser les limites de l'architecture troglodyte comme solution d'habitat contemporain durable vis-à-vis des enjeux environnementaux et son niveau d'adaptabilité en Andalousie.

PROBLEMATIQUE :

Comment les techniques de construction troglodyte pourraient-elles être une réponse aux problématiques liées au logement dans les régions aux conditions climatiques extrêmes ?

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS....7

METHODOLOGIE DE RECHERCHE....8

AVANT-PROPOS....18

INTRODUCTION....20

Un troglodyte qu'est-ce que c'est ?....22

Le phénomène troglodytique....24

L'approche climatique face aux climats extrêmes....25

Opinion publique sur l'architecture enterrée....26

Littérature et Idéologies sur le troglodytisme et l'urbanisme souterrain....27

1 PARTIE I : L'ARCHITECTURE TROGLODYTE : UNE REPONSE VERNACULAIRE A DES DEFIS CLIMATIQUES HISTORIQUES....33

1.1 Origines et développement historique de l'architecture troglodyte dans le monde....34

1.1.1 Emergence des habitats troglodytes à travers les époques et de leur lien avec le climat et les ressources locales....34

1.1.1.1 Troglodytes horizontaux....36

1.1.1.1.1 L'abri sous roche....36

1.1.1.1.2 Les cavernes naturelles....38

1.1.1.1.3 Les premiers troglodytes....40

1.1.1.2 Troglodytes verticaux....42

1.1.1.2.1 Cavités creusées en terrain plat....42

1.1.1.2.2 Habitations creusées dans le sol....52

1.1.1.2.3 Les carrières....58

1.1.1.3 Troglodytes latéraux....58

1.1.2 Etude de l'architecture et du troglodytisme animale....60

1.1.2.1 Généralités sur l'architecture animale....60

1.1.2.2 Troglodytisme animale....60

1.1.2.3 Les insectes....62

1.1.3 Les différentes typologies des formes d'habitat troglodytique....65

1.1.3.1 Architecture de détournement de sites et cavités naturelles....65

1.1.3.2 Architecture soustractive....67

1.1.3.3 Architecture de remblaiement....69

1.1.3.4 Solutions mixtes et intermédiaires....69

1.1.4 Morphologie des habitats troglodytiques....70

1.1.4.1 Organisation des espaces....70

1.1.4.2 Aménagements....71

1.1.4.3 Aspects extérieurs....73

1.1.4.4 Conditions d'établissement....74

1.1.5 L'histoire de l'urbanisation troglodytique....75

1.1.5.1 Les troglodytes refuges, une fonction défensive et stratégique....75

1.1.5.2 Troglodytisme et fonction économique....75

1.1.6 L'urbanisme troglodytique : typologies des groupements....76

1.1.6.1 Groupements linéaires : les cavités naturelles aménagés : les villages à parois....76

1.1.6.2 Les abris sous roches des maisons des falaises du sud-ouest américain....78

1.1.6.3 Groupement en cirques....85

1.1.6.4 Villages en surface....86

1.1.6.5 Villages creusés....86

1.1.6.6 Villages et groupements souterrains refuges....89

1.1.7 Les espaces de l'architecture troglodytique....92
1.2 Les usages et les fonctions des habitats troglodytiques dans le monde et leurs adaptations face aux conditions climatiques extrêmes....94
1.2.1 L'habitat troglodytique dans la péninsule ibérique....95
1.2.1.1 L'habitat troglodytique en Aragon (Espagne)....97
1.2.1.2 Typologie des « cuevas » aragonaises....99
1.2.1.3 Habitations troglodytiques en Andalousie....106
1.2.1.4 Adaptation climatique....107
1.2.2 L'habitat troglodytique en Tunisie....111
1.2.2.1 Demeures troglodytiques élémentaires....111
1.2.2.2 Les troglodytes latéraux....113
1.2.2.3 Habitations creusées verticales....115
1.2.3 L'habitat et l'urbanisme troglodytique en Cappadoce....119
1.2.3.1 Conditions géologiques et climatiques....120
1.2.3.2 Origines du peuplement troglodyte....120
1.2.3.3 Typologie de l'habitat troglodytique en Cappadoce....122
1.2.4 L'habitat troglodytique en Chine....127
1.2.4.1 Les données climatiques du Nord-Shensi....128
1.2.4.2 L'influence de l'espace traditionnel d'habitation Han sur les troglodytes Chinois....130
1.2.4.3 Les grottes creusées....135
1.2.4.3.1 Les troglodytes latéraux....135
1.2.4.3.2 Les habitations creusées en forme de puits....144
1.2.4.4 Les grottes construites....153
1.2.4.5 Les architectures troglodytiques complexes....160
1.2.4.6 Les groupements urbanistique....167
1.2.4.6.1 Groupements de troglodytes latéraux....167
1.2.4.6.2 Groupements de troglodytes en puits....168
1.2.4.7 L'habitation troglodytique contemporaine en Chine....174

2 PARTIE II : L'ARCHITECTURE TROGLODYTE ET HYPOGEISME COMME MODELE DE DURABILITE DANS LE CADRE DE LA RESILIENCE CLIMATIQUE....185

2.1 Les habitations troglodytiques, une alternative écologique et durable....186
2.1.1 Les paramètres du climat souterrain....186
2.1.1.1 Les conditions climatiques de l'habitat....186
2.1.1.2 Les données météorologiques concernant le sol....187
2.1.1.3 Problèmes posés par la thermique de l'habitat troglodytique....188
2.1.1.4 Les paramètres....189
2.1.2 Qualités de vie et confort usuel des habitations troglodytiques dans les régions étudiées....192
2.1.2.1 Le confort thermique des maisons creusées traditionnelles : étude de cas en Chine....192
2.1.2.2 Résistance aux séismes....194
2.1.2.3 Tableau comparatif des qualités de confort usuel des habitations troglodytiques dans les régions étudiées....199
2.1.3 Les performances climatiques, énergétiques et écologiques des différents habitats troglodytes....200
2.1.3.1 Tableau comparatif dans le monde....200
2.1.3.2 Des villages andalous étudiés....203
2.1.3.2.1 Guadix....203
2.1.3.2.2 Setenil de las Bodegas....204
2.1.3.2.3 Baza....205
2.1.3.2.4 Gorafe....206
2.1.3.2.5 Cuevas de Almanzora....207
2.1.3.2.6 Caniles....208
2.1.3.2.7 Purullena....209
2.1.3.2.8 Sacromonte....210

2.1.3.2.9 Tableau comparatif....211
2.1.3.2.10 Entretien avec les habitants des villages andalous étudiés....216
2.2 Adaptations au climat des habitats troglodytiques....232
2.2.1 Etudes de cas à l'international....232
2.2.1.1 Tableau comparatif des climats....232
2.2.1.2 Tableau comparatif de la géographie et géologie....235
2.2.1.3 Tableau comparatif des propriétés thermique et performances des différents types de roches des habitats troglodytiques des régions étudiées....238
2.2.2 Adaptations des habitats troglodytiques au climat méditerranéen et semi-aride en Andalousie....240
2.2.2.1 L'influence des conditions climatiques en Andalousie sur le développement des habitats troglodytes....240
2.2.2.2 Les avantages de la régulation thermique naturelle des habitations troglodytes....241
2.2.2.3 Intégration paysagère et impact écologique réduit des constructions troglodytes....244
2.3 Etude de cas : caractéristiques architecturales des habitats troglodytes de Guadix et Setenil....245
2.3.1 L'évolution historique de l'urbanisme et des habitats troglodytiques de Guadix et Setenil....245
2.3.2 Etude comparative des particularités architecturales dans chaque ville....246
2.4 Généralités et extension à l'Andalousie : études de cas comparative des autres villages troglodytiques andalous....248
2.4.1 Analyse photographique....248
2.4.2 Entretiens avec des architectes et spécialistes travaillant sur l'architecture troglodytique en Andalousie....249
2.5 Un habitat solaire passif extrême....250

3 PARTIE III : REPONSES AUX DEFIS CLIMATIQUES CONTEMPORAINS : PERSPECTIVES D'AVENIR DE L'ARCHITECTURE TROGLODYTIQUE ET ADAPTATION AUX NORMES MODERNES....252

3.1 Rénovation et réhabilitation des habitats troglodytes : enjeux et perspectives d'un concept ancien au goût du jour....253
3.1.1 Etat actuel du bâti : facteurs de dégradation, usure des matériaux, disparition des savoirs faire....253
3.1.2 Analyse des projets de réhabilitation : succès et échecs....254
3.1.3 Les défis administratifs et financiers de la réhabilitation des sites troglodytes....256
3.2 Adaptation des habitats troglodytiques aux normes modernes....257
3.2.1 Les technologies modernes mises en place pour le troglodytisme contemporain....264
3.2.1.1 Les coques enterrées et/ou recouvertes....264
3.2.1.2 Paramètres pour les habitations enterrées....268
3.2.2 Etude de projets innovants d'architecture troglodyte contemporaine face aux climats extrêmes....277
3.2.2.1 Projets construits....277
3.2.2.1.1 Geier House à Cincinnati (Ohio)....277
3.2.2.1.2 Maison Clark-Nelson à River Falls (Wiscousin)....278
3.2.2.1.3 Residenziale ovest à Ivrea (Italie)....279
3.2.2.1.4 Dune House à Atlantic Beach (Floride)....281
3.2.2.1.5 Hilltop House à Brooksville (Floride)....263
3.2.2.2 Utopies architecturales....285
3.2.2.2.1 Cooperative Homesteads à Detroit (Michigan)....285
3.2.2.2.2 Ecopolis à Baou de Saint-Jeannet (Alpes-Maritimes) 285
3.2.2.2.3 Arcologie en Arizona....287
3.2.3 Processus de construction et recommandations pour les habitats troglodytiques contemporains....288
3.2.3.1 Réflexions....288
3.2.3.2 Choix du terrain et de l'emplacement de l'habitat troglodytique....292
3.2.3.3 Coûts et budget global détaillé pour un habitat troglodytique....297
3.2.3.4 Etude géotechnique et caractéristiques de la terre....299
3.2.3.5 Eaux de surface et eaux souterraines....302

3.2.3.6 Design....302
3.2.3.7 Inertie thermique....307
3.2.3.8 Intérieurs....311
3.2.3.9 Références d'architectes pionniers de la construction souterraine....314
3.2.3.10 Etude de cas : Earthtech 6 de Stu Campbell....321
3.2.3.11 Pour approfondir....325
3.2.3.11.1 Où isoler les bâtiments semi-enterrés....325
3.2.3.11.2 Financement des logements semi-enterrés : enjeux et opportunités....341
3.3 Limites et inconvénients de l'architecture troglodyte comme solution d'habitat contemporain durable face aux défis environnementaux modernes....342

CONCLUSION....346

Résumé et bilan des analyses et des études de cas effectuées en Andalousie....348

Diagramme de synthèse....349

Ouverture....350

EPILOGUE....351

ANNEXES....353

Bibliographie & Références....354

Tableaux comparatifs des études de cas....357

Questionnaire pour un entretien avec un habitant d'une maison troglodyte en Andalousie....359

Questionnaire pour un entretien avec un architecte ou spécialiste travaillant sur l'architecture troglodytique en Andalousie....360

Etude de projets innovants d'architecture troglodyte contemporaine face aux climats extrêmes....362

CREDITS....365

AVANT-PROPOS

L'ère de l'architecture solaire a commencé et le besoin de conceptions écoénergétique à l'échelle mondiale est devenue nécessaire. Les nouvelles technologies sont devenues compétitives en termes de coûts et la promesse d'une énergie solaire propre et infiniment renouvelable est une réalité.

En suivant les progrès de la production d'énergie, de nouvelles formes et méthodes de construction sont développées pour conserver notre énergie à l'image des coques super-isolées, des capteurs solaires passifs et actifs et des conceptions semi-enterrées.

Présent dans le monde entier, souvent oublié ou catalogué comme habitat de fortune utilisé par les populations pauvres de certains pays en voie de développement, l'habitat troglodytique reste peu et mal connu.

Patrimoine peu connu, le monde des troglodytes reste trop souvent perçu comme une sorte d'aberration architecturale. Habiter sous terre reste pourtant une solution à bien des problèmes d'urbanisme et climatique. Les remarquables réalisations creusées par nos ancêtres de même que leur nombre impressionnant semblent indiquer que durant des siècles ce mode de vie fut adopté par une part significative de la population.

Intégrés dans le paysage et discrets par essence, des milliers de trous dans la roche sont encore mis à profit par des familles entières qui y disposent de tout le confort et peu d'entre elles seraient prêtes à échanger leur habitat troglodytique contre une maison traditionnelle.

Grottes naturelles réaménagées, falaises percées en tous sens et cavité en terrain plat forment un ensemble diversifié. Délaissé par les historiens et les archéologues, le troglodytisme est pourtant un patrimoine unique dont l'étude est intéressante sur le point de vue climatique pour les futurs logements durables.

Les paysages lunaires et sculptés de la Cappadoce, les deux mille villages troglodytiques du Mesa Verde et de l'Ouest américain (Cliff-Dwellings) doivent être rejoints, dans une anthologie du troglodytisme mondial, par les « Yao-Dong » qui dans les pays du lœss utilisent les reliefs pour créer une extraordinaire architecture-paysage.

Seulement étudié par quelques architectes et urbanistes, le mode de vie enterré apparaît parfois comme une solution face aux contraintes modernes et une architecture trop normalisée.

Le souterrain, souvent perçu comme un milieu humide, sombre et impropre à une occupation humaine, montre à travers ce livre qu'il peut être aussi une fantastique source d'inspiration.

Ainsi, cet ouvrage retrace l'histoire de l'architecture troglodytique, ses modes de mise en œuvre, les formes qu'elle produit, analysant et expliquant comment et pourquoi cette manière d'habiter constitue un modèle et la meilleure solution que les hommes aient trouvée pour vivre et pour répondre aux problématiques liés à l'habitat dans les régions aux climats extrêmes comme dans des régions semi-désertique, torride l'été, glaciale l'hiver, et dépourvue des matériaux de construction classiques : bois et dérivés de la pierre...

Introduction

INTRODUCTION

« Pour vivre heureux, vivons cachés ! »

L'architecture troglodytique, creusée, enterrée ou utilisant des cavités naturelles existe depuis que l'homme a commencé à bâtir des habitats pour pouvoir se protéger des éléments naturels et de son environnement. Cette typologie d'architecture se retrouve à différentes latitudes avec des climats et des conditions de sol très variés, témoignant ainsi de sa capacité à fournir des réponses efficaces à des conditions extrêmes de climat. On peut en effet s'enterrer pour se protéger de la chaleur (Matmata) ou du froid (l'hiver en Chine continentale). Le climat n'est bien sûr pas le seul paramètre justifiant les solutions creusées. Intégration aux paysages et économies de matériau et d'énergie sont des qualités principales mises également en avant par cette architecture.

Chaud en hiver et frais en été, l'architecture troglodyte issue du creusement des habitats directement dans la roche ou sous la terre apparaît comme la solution la plus adéquate face aux défis contemporains liés au logement dans les régions aux conditions climatiques extrêmes. En effet, la roche n'est pas simplement un matériau de construction : elle peut devenir l'habitat lui-même, offrant un refuge adapté aux contraintes environnementales, climatiques et sociales tout en présentant des solutions durables et écologiques.

L'Andalousie, avec ses paysages arides et ses températures souvent extrêmes, abrite des exemples emblématiques de ce type d'architecture. Les villages de Guadix, dans la province de Grenade, et Setenil de las Bodegas, dans la province de Cadix, incarnent parfaitement cette typologie en offrant des pistes de réflexion pour l'habitat contemporain.

À Guadix, les habitats troglodytes sont intégrées dans un relief argileux qui forme de vastes quartiers troglodytes encore habités aujourd'hui, et offre un confort thermique naturel, exploitant les propriétés isolantes de la roche. À Setenil de las Bodegas, les habitations sont partiellement intégrées sous d'imposantes formations rocheuses, témoignant d'une parfaite symbiose entre construction humaine et environnement naturel. Ces deux sites démontrent comment l'ingéniosité architecturale peut répondre aux contraintes imposées par un climat rigoureux, tout en optimisant l'utilisation des ressources locales.

Aujourd'hui, les techniques de construction moderne permettent un nouvel essor d'une architecture troglodytique qui va s'adapter aux normes de construction actuelle.
Dans un monde, un contexte et une époque marqué par des crises environnementales et la recherche de solutions architecturales durables pour repenser les modes d'habiter, il est pertinent de questionner la réinterprétation des techniques troglodytes pour répondre aux besoins actuels de logement.

En effet, ces maisons, creusées dans la roche ou abritées sous des surplombs, sont naturellement isolées thermiquement, peu consommatrices de ressources, et durablement intégrées à leur environnement alors que les constructions modernes peinent parfois à répondre aux défis de la transition écologique.

Ainsi il est nécessaire de se demander si ces constructions, ancrées dans le patrimoine culturel andalou, peuvent-elles être une source d'inspiration pour concevoir des habitats résilients dans d'autres régions du monde confrontées à des conditions climatiques similaires.

De ce fait, à travers de nombreuses études de cas dans différents villages andalou (Baza, Caniles, Cuevas de Almanzora, Gorafe, Guadix, Sacromonte et Setenil de las Bodegas), ce mémoire propose et vise à explorer le potentiel de l'architecture troglodyte, sous l'angle de son exploitation et sa pertinence contemporaine.

À travers ce travail, il s'agira donc de répondre à la question initiale :
Comment les techniques de construction troglodyte pourraient-elles être une réponse aux problématiques liées au logement dans les régions aux conditions climatiques extrêmes ?

Ce questionnement implique non seulement une analyse de leurs caractéristiques architecturales et environnementales, mais aussi une réflexion sur leur potentiel à s'inscrire dans une dynamique de développement durable.

Hypothèse

L'architecture troglodyte, en exploitant les propriétés thermiques et isolantes de la terre et de la roche et en s'intégrant harmonieusement au paysage, constitue une solution durable et efficace pour répondre aux besoins de logement dans les régions aux climats extrêmes, en offrant une protection thermique, une économie d'énergie et une résilience face aux contraintes environnementales. Cette approche pourrait être adaptée d'un point de vue contemporain pour répondre aux exigences actuelles de logement en termes de confort, de durabilité et de densification urbaine.

Un troglodyte qu'est-ce que c'est ?

Avant de développer un aperçu historique sur les origines du mode de vie enterré, il convient de définir ce qu'est un habitat troglodytique.

Nous pourrions définir l'architecture comme la création d'une enveloppe pour une fonction donnée. Le troglodytisme lui, nous offre la disparition d'un volume externe et rejetant toute matière pour ne conserver que le vide, l'espace à vivre. Ainsi, l'architecture troglodytique se caractérise par des vides, en opposition avec les pleins.

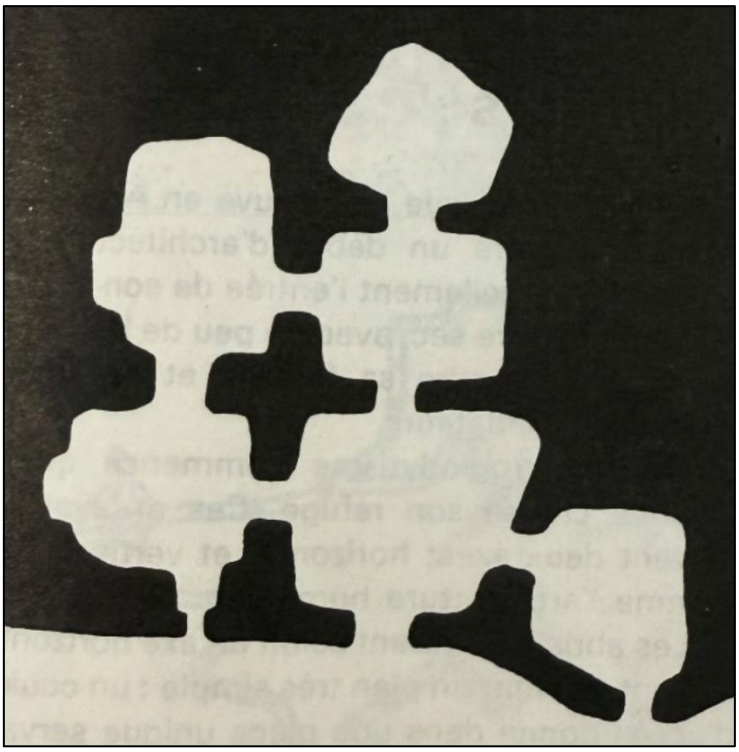


Figure 1 : Le rapport de l'espace et de la matière : seule l'enveloppe interne existe, il y a disparition du volume externe

Le troglodytisme s'affirme comme une architecture de soustraction de matière, se rapprochant de la sculpture.

Certains vous diront que le troglodyte est un être à demi civilisé, éloigné de toute préoccupation relative au confort et à l'hygiène de vie, d'autres vous affirmeront que le troglodyte est un être intelligent qui profite de ce que la nature met à notre disposition, conscient de son environnement et soucieux de le préserver, le dictionnaire quant à lui établit qu'est considéré comme troglodyte tout ce qui vit dans la roche.

En effet, l'architecture troglodyte est une interprétation déclinée de l'architecture avec un matériau particulier, la terre, et une technique particulière de mise en œuvre : le creusement.

Il existe de nombreux types de troglodytes. Du simple abri sous roche fermé en façade par quelques planches au somptueux château creusé dans la falaise. La diversité de leurs formes et de leurs aménagements, des roches qui les abritent, des époques auxquelles ils furent creusées ainsi que des raisons qui poussèrent les hommes à les habiter, font que les cavités se révèlent d'une diversité et d'une richesse incroyable. Aujourd'hui, l'habitat troglodytique est une habitation élaborée dans la roche ou dans la terre.

Le phénomène troglodytique

Trois grandes préoccupations en matière d'urbanisme et d'architecture occupent, de nos jours le devant de la scène : les économies d'énergie, l'introduction du végétal dans la ville, l'intégration architecturale dans les paysages.

A ces préoccupations, une réponse possible et efficace, bien que peu employée, pourrait être celle de l'architecture enterrée et semi-enterrée. Trouvant son origine dans la caverne, l'habitat troglodytique présente des particularités dignes d'intérêt par la nature des lieux produits.

En effet, l'architecture troglodytique produit des habitats économiques, et s'intégrant parfaitement dans son environnement.

Autrefois, on creusait ou on aménageait sa maison dans la roche pour se protéger des intempéries, des variations de température, du froid, du chaud, pour se protéger des éventuels ennemis, par manque de matériaux de constructions, ou encore par souci de posséder une maison pratique et évolutive comme l'indiquait en 1787 Jean Houel : *« Ce qu'il y a de remarquable dans un habitat troglodytique, c'est qu'on peut agrandir son logement à mesure que la petite famille s'élargit. En effet, on peut creuser dans le rocher, au fond de la dernière chambre, une porte, puis une autre chambre de la grandeur que l'on souhaite, ou bien creuser le plafond, et créer un appartement au-dessus du sien* [1] *».*

L'habitat troglodytique contemporain est choisi pour les mêmes raisons... dont quelques préoccupations moderne viennent se greffer en plus comme sa forte isolation phonique par exemple.

Architecture bioclimatique de la première heure (conçue en fonction du climat), l'architecture troglodytique favorise les économies d'énergies. D'autre part, la température y est constante, variant de 9 à 13°C.

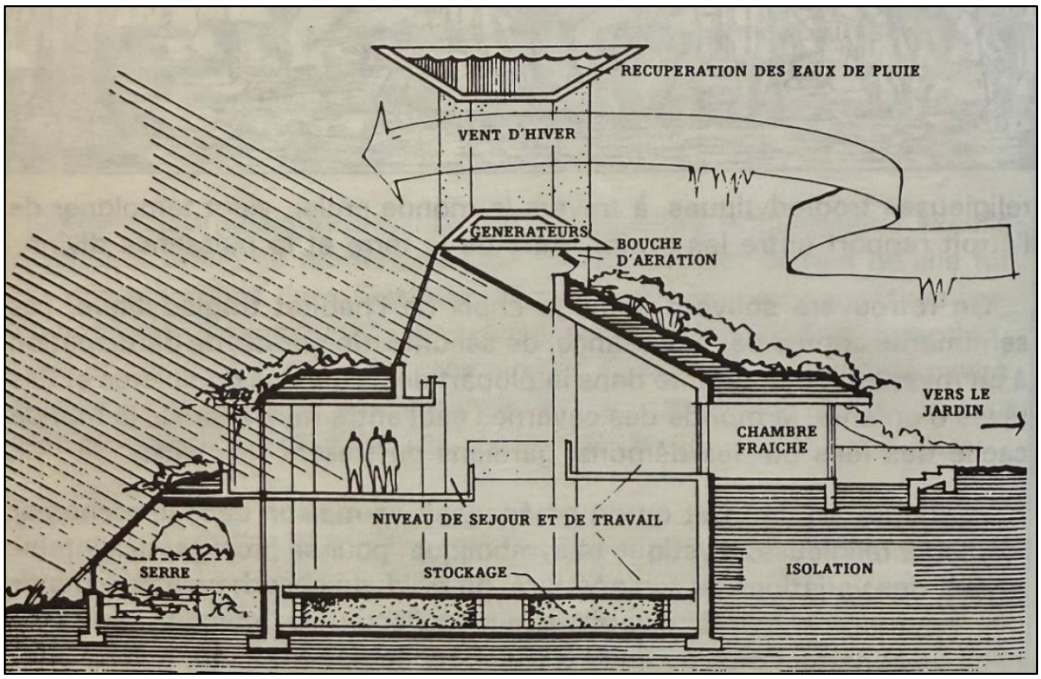


Figure 2 : Raven Rocks, Ohio, (USA), Malcolm Wells.

1. Voyage pittoresque des Isles de Sicile, de Lipari et de Malte». • J.P. Houel Imprimerie de Monsieur 1782-1787.

L’approche climatique face aux climats extrêmes

Produire une architecture solaire bioclimatique développant les principes de la maison solaire passive, conduit logiquement les architectes à porter leur attention sur l'habitat enterré.

L'architecture passive utilise l'inertie thermique de la construction pour parvenir au confort intérieur de l'habitation. La connaissance des phénomènes d'échanges thermiques entre cette masse interne de la construction (localisée dans les murs, les planchers) et l'ambiance de l’habitable (le volume d'air interne de la maison) constitue un des points essentiels de l'architecture passive. Il est donc évident que de nombreux concepteurs soient tentés de construire des maisons enterrées pour rechercher l'inertie maximale d'une maison.

Si l'approche climatique à propos de l’habitat enterré est la plus évidente pour un architecte préoccupé avant tout par la relation «Climat - Habitat», il existe toutefois d’autres dimensions qualitatives de l'habitat enterré : intégration architecturale dans les paysages, économies générales de la construction utilisant le matériau en place, variété et richesse des espaces architecturaux produits...

Le temps où l'homme situait son habitat sous terre peut paraître lointain et révolu.
Et bien souvent, malheureusement, les quelques projets contemporains d’architecture troglodytique connus et publiés n'apparaissent que comme l’aboutissement de démarches individuelles, isolées, ou manifestations d'originalités que personne ne rattache plus à aucune tradition alors qu’elles ont juste été oubliées et perdues avec le temps.

En effet, il n'y a jamais eu d’interruption, ou d’extinction complète de l'architecture enterrée. Chaque époque a produit des témoignages de ce troglodytisme que nous tenterons d'explorer dans ce mémoire.

Le but de ce mémoire est ainsi également de contribuer à la diffusion de la connaissance de l'architecture enterrée.

Cet ouvrage présente ainsi l’évolution des modèles de troglodytisme, depuis ses formes archaïques les plus simples jusqu'à ses développements les plus élaborés.

Opinion publique sur l’architecture enterrée

Bien des personnes pensent avant de pénétrer pour la première fois dans une habitat troglodytique, que la lumière reste au dehors. Or, les habitats troglodytiques sont généralement bien éclairés et le plus souvent possible exposés au sud. En effet, la dimension de l'urbanisme enterré est riche et dense, et même si les maisons enterrées, d'Andalousie ou de Matmata en Tunisie, sont vivantes et lumineuses, l'image et la connotation que les gens se font d'une architecture souterraine est nettement péjorative. Bien sûr, il y a la réalité de l'univers minier où obscurité, crasse et humidité, toujours possible, justifient l'appréhension et la peur, voire le rejet de l’habitat enterré.

Comment expliquer alors que des groupes entiers qui se sont succédés durant des siècles aient optés pour ce type d’habitats comme à Guadix et Setenil de las Bodegas ?

Lorsqu'il s'agit du monde contemporain, de la maison d'aujourd'hui, de la possibilité d'une architecture, voire d'un urbanisme enterré contemporain, c'est à cause d’un ensemble de raisons que le pessimisme pour ce type d’architecture continue à persister. Ce manque d'engouement pour les habitats troglodytiques tient à plusieurs facteurs.

Dans l’imaginaire populaire, la terre et le monde souterrain dissimulent autant de sujets d’inquiétude que de rêves et de plaisir. De prime abord, le sous-sol est associé à la mort.

Le premier responsable à mon avis est le roman de fiction contemporain et les légendes populaires qui localise et décrit sous terre la *« société des sous-hommes. »* et explique que l'homme est un être fait pour vivre au soleil. Ces légendes qualifient le monde souterrain comme une antre mystérieuse ou serait caché des trésors, des créatures abominables des démons ou même des fées.

En second lieu, la contribution dans les années soixante, de certains urbanistes contemporains à propos de l'image de l'architecture enterrée, a été profondément négative comme le démontre la ségrégation que fait Edouard Utudjian entre *habitat souterrain* et *urbanisme souterrain : « L’urbanisme souterrain est une nécessité, l’habitat souterrain, une solution de dernier recours*[1]*.»*

Les historiens et les ethnologues rangent aussi généralement l'habitat creusé dans une catégorie d’architecture presque instinctive, rare et réservée aux plus démunis.

Au contraire, l'étude du phénomène troglodytique montre que l'on est en présence d'une véritable intelligence du sous-sol. Loin d'être réservés aux seules populations pauvres, les habitats troglodytiques doivent leur existence aux nombreux avantages qu’ils offraient aux population civiles, religieuses et militaires.

Seulement étudié par quelques historiens locaux le phénomène troglodytique est à prendre en considération au même titre que les autres formes d'habitats et d'architectures.

1. Edouard Utudjian, Architecture et urbanisme souterrains, Paris, R.Laffont, 1966.

Littérature et idéologies sur le troglodytisme et l'urbanisme souterrain

La littérature dispose d'un rôle considérable dans le processus de formation des images dans le subconscient collectif.

En matière d'architecture populaire, la perte de connaissance laisse une place d'autant plus grande à l'imaginaire, alimenté dès lors essentiellement par la littérature.

C'est tout particulièrement le cas pour l'architecture troglodytique, dont l'image est pour la plupart de nos contemporains issue du récit (roman, bande dessinée) et non de l'expérience directe.

1. *Cyrano de Bergerac : l'image positive de l'urbanisme enterré*

Dans *Le voyage dans la lune* que fit paraître vers 1650 Cyrano de Bergerac, l'habitat souterrain reflète une imagine positive !

Il en fait une description qui contient déjà, outre le concept « d'architecture mobile» à transformation saisonnière, la justification climatique de l'enterrement hivernal des maisons.

Cyrano de Bergerac, précurseur de la pensée matérialiste, base sa réflexion sur des éléments scientifiques. Le concept d'habitat climatique passif est ici entièrement exprimé.

Tel n'est pas toujours le cas, comme dans la fiction développée par H.G. Wells dans *La machine à explorer le temps*[1] plus de deux siècles plus tard.

2. *Herbert George Wells : l'image négative*

Comme le voyageur du *Voyage dans la lune* de Cyrano de Bergerac, «l'explorateur du temps» de Wells construit une machine qui permet de voyager dans le passé ou dans le futur.
L'explorateur arrive dans une société apparemment de bonheur, de calme, de sérénité, uniquement occupée aux loisirs. Il s'agit là de l'humanité visible, les Eloïs qui vivent en surface.
Bien vite, il prend conscience de l'existence d'une autre civilisation, les Morlocks qui constituent le « négatif» de la société. Seules quelques cheminées d'aération visibles dans les champs, témoignent de l'existence de ce monde souterrain. Il s'agit du monde des « non possédants», qui produisent, travaillent, existent seulement pour assurer la vie des « possédants».
Ces êtres souterrains, aux cheveux blanchis, aux yeux démesurément agrandis; vivent dans le bruit des machines, dans l'obscurité.

Wells, localise dans les profondeurs du sous-sol, les ténèbres de l'humanité.
Dans cette double société, comportant un positif et un négatif, le sous-sol est bien le lieu de l'esclavage, de la bestialité...

«Nous tendons à utiliser l'espace souterrain pour les besoins les moins décoratifs de la civilisation; il y a, à Londres par exemple, le Métropolitain et récemment des tramways électriques souterrains[2]*[...] »*

1. *H.G Wells, La machine à explorer le temps, 1895*
2. *Edouard Utudjian, Architecture et urbanisme souterrains, Paris, R. Laffont, 1966.*

3. *Edouard Utudjian : une théorie urbanistique dans la lignée de Wells*

Les habitations enterrées peuvent répondre dans certaine mesure, au problème de densité et de cohabitation à l'intérieur des villes. C'est en 1933, qu'Edouard Utudjian, «grand théoricien visionnaire» fonda le G.E.C.U.S. (Groupe d'Etudes et de Coordination de l'Urbanisme Souterrain), dont le but était d'étudier principalement les possibilités du sous-sol des grandes villes encombrées, pour les seuls besoins de la protection, de la circulation et de dépôts.

L'architecte Edouard Utudjian préconise en effet la création d'une architecture et d'un urbanisme souterrains dont il est le pionnier. « L'urbanisme souterrain est une necessité[3].» Pour lui, le sous-sol doit être utilisé comme débarras. En effet, les théories développées par Utudjian renforcent cette vocation supposée du sous-sol : services, transports, entrepôts, magasins, industrie, ou tout ce qui peut y trouver un aménagement fonctionnel : *«tout ce qui doit être enfoui dans le sous-sol[4]»* où le mot *«enfoui»* n'est pas neutre.

L'auteur fait appel à des justifications historiques: *« A Rome, Byzance, Bagdad, cités antiques ou médiévales, l'architecture souterraine est généralement réservée aux services»*.

Ses théories poussent d'autres architectes renommés à proposer des solutions similaires afin de libérer la surface du sol pour des espaces verts, des chemins piétons et des zones de loisirs à l'image de W.Jonas dans son projet de ville utopique *« Intrapolis »* où il imaginait des infrastructures souterraines commune dans la partie inférieure de l'entonnoir reliant les Intrahabitats entre eux, où se trouveraient les systèmes techniques n'ayant pas besoin de lumière naturelle (magasins, cinémas, administration, transports, énergie, déchets, etc.). Walter Jonas voulait avant tout concevoir un environnement bâti qui respecte l'individu et la nature. Il partageait fortement l'avis de Utudjian selon lequel de nombreux paysages ont leur beauté entièrement gâchée par la présence bien visible de structures qu'on aurait pu enterrer à moindre frais.

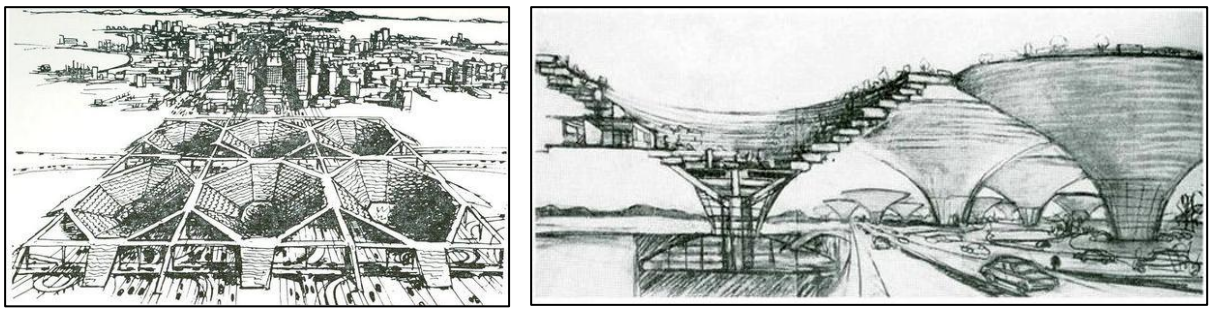


Figure 3 : « Intrapolis », Walter Jonas, 1960.

Dans la seconde moitié des années soixante, il y eu également, l'idée utopique et radicale de Paul Maymont. D'un « Paris sous la Seine », une ville-ruban submergée et enfouie sur un kilomètre de long, dont les douze niveaux superposés destinés au stationnement et aux grands usagers collectifs, auraient permis de décongestionner le cœur de la ville.

3 & 4 respectivement : Edouard Utudjian, op. cit., p. 43 et p. 48.

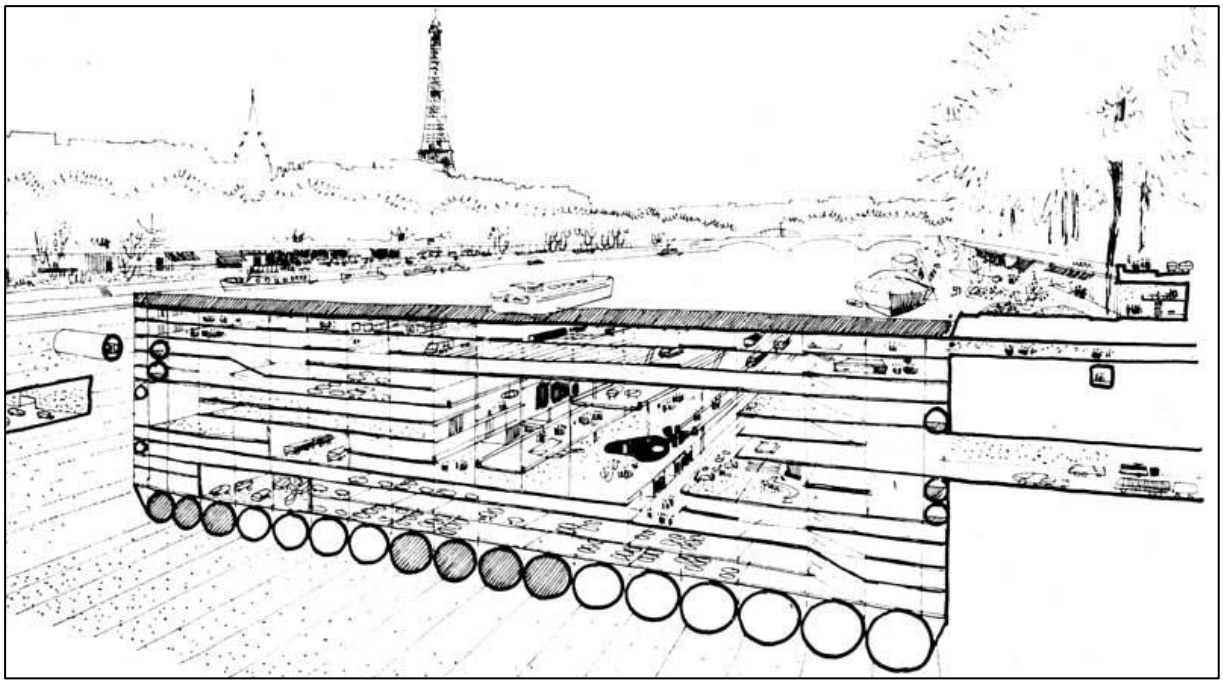


Figure 4 : Paris sous la Seine, Paul Maymont, 1963.

Rationnelles, ces théories ont en outre, l'avantage d'être peu onéreuse.

Utudjian fait néanmoins la distinction entre urbanisme souterrain et habitat souterrain : *« Il n'est nullement souhaitable de construire des villes-cavernes et d'enterrer l'humanité. Seuls doivent être enfouis au sous-sol les organes de transport, les entrepôts, en un mot toutes le constructions où le séjour des hommes est éphémère*[5]*.»*

E.Utudjian critique aussi le roman et la pensée idéaliste de Jules Verne dans « *les Indes Noires* » : *« L'homme est fait pour vivre au soleil, à l'air libre et jouir du spectacle de la nature*[6]*.»*

Cependant, prendre cette position par rapport à l'architecture troglodytique, c'est nier la possibilité d'un habitat sous le sol, en prétendant que l'habitat troglodytique est un phénomène qui n'aurait jamais eu une grande influence.

En effet, Utudjian n'omet pas l'intérêt des habitats troglodytiques pour résoudre certains problèmes contemporains pour l'habitat tant que ceux-ci ne tentent pas de recréer en profondeur les conditions exactes de la vie en surface.

Il reconnaît même que les habitats troglodytiques seraient une solution efficace dans le cadre des régions soumises aux intempéries et aux variations de températures extrêmes : *« Il faut bien reconnaître pourtant que l'habitat souterrain est appelé à connaître un grand développement là où les intempéries et les variations de température sont extrêmes, comme en haute montagne, dans les pays tropicaux ou arctiques, et dans les agglomérations voisines des déserts. Le sous-sol offre un isolement sans égal et une température constante variant de 9 à 13° sous toute latitude*[7] *».*

5. Edouard Utudjian, op. cit., p. 48.
6 et 7. Edouard Utudjian, op. cit., p. 43.

Par exemple, dans les pays nordiques, les longues nuits nécessitent l'emploi fréquent de la lumière artificielle. L'utilisation du sous-sol est donc une solution inévitable. En effet, dans les pays septentrionaux, comme en haute montagne, l'entretien des bâtiments, sous l'action des enneigements, des tempêtes et des avalanches est très onéreux. En profondeur, le problème n'existe pas.

Les économies réalisées de cette façon en chauffage et en entretien des bâtiments sont considérables. Par des températures extérieures inférieures à trente degrés sous zéro, il suffit d'élever la température intérieure, qui est de 10 ou 12° de quelques degrés seulement pour obtenir une température tout à fait confortable. Quant à la lumière artificielle, son emploi à certaines latitudes, même en surface, dépasse 80 % des heures ouvrables. Ici, l'éclairage artificiel, avec un apport de 20°, assure la meilleure constance d'éclairement au grand bénéfice du rendement, alors que les variations de la lumière diurne et sa faiblesse constituent de graves inconvénients.

Toutefois, Utudjian rappelle et précise que l'habitat troglodytique n'est pas une méthode à généraliser dans n'importe quel contexte et dans n'importe quelle région. *« Si, à l'origine de la maison souterraine, il y a eu la volonté de donner à un abri un aspect accueillant, on a eu tort, par la suite, de croire qu'il était possible de généraliser la méthode.*[8]*»*

Il en vient même à déclarer que l'habitat souterrain est une solution à employer en dernier recourt. *« L'habitat souterrain un pis-aller surtout quand il s'agit de maisons aux alentours des grandes villes et dans les campagnes, là où précisément on dispose d'espaces verts, de lumière et d'air.*[9] *»*

De ce fait, les progrès actuels du conditionnement de l'air, comme leur coût modique et leur bon rendement, les progrès de l'éclairage, de l'étanchéité et de l'isolement ouvrent la voie à l'habitat souterrain, mais cela, seulement dans certaines conditions climatiques.

Les propositions et théories d'Utudjian permettent finalement la conception d'un progrès technologique linéaire, efficace, producteur de mégastructures enterrées comme des parkings souterrains ou le métro parisien. Cette vision oublie les caractéristiques propres du sol et toute la spécificité de ce milieu souterrain qu'exploiteront très finement les architectures troglodytiques traditionnelles : comme la faculté de la roche d'être autoportante.

8 & 9. Edouard Utudjian, op. cit., p. 43.

4. Jules Verne : un urbanisme souterrain « accepté »

Dans Les Indes noires, l'image du monde souterrain qui nous est donnée est finalement l'intermédiaire entre les extrêmes décrits précédemment.

Les termes sont laudatifs chez Jules Verne pour décrire les espaces souterrains.

En effet, il présente Simon Ford, le protagoniste du roman, comme ravi d'avoir fait le choix d'habiter dans ce monde souterrain: *« C'était là que Simon Ford habitait depuis dix ans avec sa famille, une demeure souterraine, évidée dans le massif schisteux [...] Simon Ford aurait pu vivre en plein soleil, au milieu des arbres, dans n'importe quelle ville du royaume, mais les siens et lui avaient préféré ne pas quitter la houillère, où ils étaient heureux*[10]*... »*

Dans ce voyage au centre de la Terre, des hommes et des femmes vivent dans des maisons construites au fond d'une vaste mine. En effet, une ville, dénommée « Coal City» (la cité du charbon) va s'établir sous terre après la découverte de nouveaux filons de houille. La mine va se mettre à revivre sous la forme de cette ville idéale mais souterraine. Les espaces intérieurs ne seront pas la transposition d'un urbanisme de surface mais bien la mise en valeur des beautés de la caverne. Ici, la Terre est conçue comme un milieu réel qu'on utilise selon les possibilités qu'il présente et les moyens dont on dispose mais avec lequel on ne lente pas de tricher.

Une anthologie des romans se rapportant au monde souterrain montrerait que la plupart des fictions se rattachent au type représenté par le roman de Wells, donc strictement négatif. Malheureusement, c'est cette image que vont projeter la plupart des gens sur tout ce qui se réfère à l'habitat souterrain.

Cependant, l'architecture troglodytique se distingue de cet imaginaire péjoratif en ce sens qu'elle établit un rapport constant avec l'extérieur et ne se définit jamais comme un univers clos, mais au contraire, prolongeant la nature et la vie en surface.

En effet, il y a aussi une réalité de l'urbanisme enterré et troglodytique, étendue, riche, vivante et les exemples que nous citerons dans cet ouvrage sont là pour nous le rappeler et débarrassées toute charge péjorative sur les habitats troglodytiques.

10. Jules Verne, Les Indes noires, p.18

Partie I : L’architecture troglodyte : une réponse vernaculaire aux défis climatiques historiques

1.1 Origines et développement historique de l'architecture troglodyte dans le monde

1.1.1 Émergence des habitats troglodytes à travers les époques et leur lien avec le climat et les ressources locales

Quelles sont ses caractéristiques propres des habitats troglodytiques comparativement aux autres souterrains creusés ?

Que ce soit la grotte naturelle, la crevasse, ou la faille, ces « accidents naturels» composent des sites où l'homme s'est très tôt aventuré puisqu'il y avait établi ses abris avant de savoir construire...

Depuis l'apparition de l'homme sur la terre, des «formes construites» ont existé et abrité l'homme pour son repos, sa défense, la célébration des cultes auxquels il se livrait ou autres...

Parmi ces techniques, l'exploration, puis l'utilisation à des fins d'habitat, de cavités naturelles se situent en amont de l'histoire des habitats humain. On peut y voir dans ce choix, qu'un simple réflexe primaire de l'homme, allant au plus facile pour s'abriter, se réfugier sous un rocher. Pourtant très vite on observe une compréhension, une « intelligence» de ce type d'habitat que constitueront la caverne et les abris sous roche. Le troglodytisme offre en effet l'avantage de se fondre de manière incomparable dans la nature.

Ainsi et à titre d'exemple, dans l'édition Hertel du XVIIIe siècle de l'Iconologia de Cesare Ripa, parmi les 200 personnifications allégoriques dessinées par Gottfried Eichler le Jeune, seules trois sont placées dans une grotte : l'Éternité, la Protection et l'Ambiguïté. Ces personnages allégoriques montrent bien toutes les qualités mais aussi les interrogations que posent encore les habitats souterrains à cette époque. La grotte est ainsi dans cet exemple représenté comme symbole de longévité et de régénération.

L'engouement récent pour l'architecture troglodytique viendrais ainsi du fait qu'elle apparaît comme quelque chose de permanent, stable, et éternel.

Le troglodytisme est un mode d'habitat qui est soumis aux contraintes géologiques.
Un peu partout dans les régions où les conditions d'établissement et climatiques n'étaient pas évidentes, de nombreuses cavités ont été occupées.

Premiers aménagements :

Conçus le plus souvent sans recours aux architectes et à un plan défini à l'avance, absolument pas normalisés, souvent agrandis, transformés, surcreusés, recreusés, réaménagés, réutilisés et partiellement effondrés, il est rarement possible de définir des types de cavités pour définir les différents habitats troglodytiques.

En effet, dans l'architecture troglodytique, la seule limite technologique à l'inventivité spatiale est la résistance au cisaillement et à l'écrasement des éléments taillés dans la roche.

Le support architectural pré-existant et naturel favorise très tôt des aménagements:
- modification des cavités : creusements supplémentaires, extensions;
- prolongements extérieurs « construits» complétant l'élément naturel;
- l'architecture se voit complétée par une expression artistique. Par exemple : peinture rupestre.
- apparition du feu : sa localisation pose un problème résolu diversement selon les types d'abris, comme en témoignent les solutions adoptées pour évacuer les fumées (implantation des cheminées).

Chaque type de roche permet, en fonction de ses caractéristiques mécaniques, d'obtenir des volumes et des formes particulières. Chaque région et chaque période de creusement imposent des aménagements intérieurs souvent similaires à ceux que l'on rencontre dans l'architecture traditionnelle bâtie. Seule la forme générale des caves, leur profondeur, leur disposition et les techniques mises en œuvre pour leur obtention permettent de définir des types de cavités différents.

Certains y chercheront une économie de construction, un confort climatique, des conditions propres à une activité particulière, une discrétion à toute épreuve. D'autres y rechercheront une communion avec la nature, un isolement monacal, un refuge inexpugnable et impossible à incendier.

Les chercheurs ayant travaillé sur le sujet ont dégagé plusieurs types de cavités habitées scindées en deux grands groupes distincts : troglodytes horizontaux et verticaux.

Le nomadisme dans l'habitat :

Les nomadismes de faible amplitude, qu'ils soient journaliers ou saisonniers, constituent les premiers comportements liés au fait d'habiter.

Si l'on considère le couple « habitat - habitant», la recherche d'un certain confort passe soit par une action de modification de l'habitat, soit par la modification du comportement de l'habitant.

Dans la conception actuelle du phénomène « habiter», c'est plutôt en agissant sur les caractéristiques de notre habitat que nous créons nos situations de confort (par le chauffage, la climatisation, ventilation, éclairage artificiel). Néanmoins, l'habitant, par sa mobilité et son comportement, peut moduler également son confort. Le concept d'habitat bioclimatique a revalorisé cette capacité de l'habitant à « s'adapter», à habiter différemment, le jour ou la nuit, l'été ou l'hiver[1].

Pour les nomadismes de grande amplitude qui sont liés à des modifications climatiques au cours des ères préhistoriques. L'étude archéologique des lieux d'habitations montre la diversité des modes d'occupation. C'est ce que nous observons dans l'étude des abris sous roche ou des cavernes naturelles, habitées ou abandonnées alternativement selon l'évolution des paramètres du climat extérieur.

1. F.Nicolas, M. Vaye, Recherche sur les enveloppes bioclimatiques, Paris, Plan-Construction, 1978.

1.1.1.1 Troglodytes horizontaux

Les troglodytes horizontaux se divisent en plusieurs types distincts.

1.1.1.1.1 L'abri sous roche

50 0000 ans en arrière, au Paléolithique, (âge de la pierre ancienne par opposition à celui de la pierre nouvelle ou Néolithique) l'homme préhistorique recourt très fréquemment aux abris sous roche et aux grottes naturelles pour s'y défendre des intempéries.

Le premier type de cavités habitées ou réaménagées est celui des grottes et abris sous roche réutilisés. Ce sont les plus anciennement habitées. Fermés par une façade en dur, l'abri est transformé en espace d'habitation dont les murs sont constitués par les parois du vide naturel.

On rencontre ce type de maisons souterraines surtout en Dordogne où elles sont particulièrement nombreuses. En effet, les hommes vivant dans des régions géologiquement favorables, où la roche est suffisamment tendre et résistante, mirent très tôt à profit le relief en terrasses ou en falaise pour y ménager leurs habitations.

Rarement sophistiqués, ces habitats souterrains parfois occupés continuellement depuis le Paléolithique sont très peu pourvus en aménagements intérieurs.

On distingue le plus souvent les divers creusements horizontaux par le type de façade, monolithe ou appareillée, ainsi que par les aménagements internes qu'ils possèdent.

Avec le Paléolithique moyen les outils de pierre taillée vont se diversifier et gagner au moustérien une complexité indiscutable.

Le paléolithique supérieur débute vers - 35 000 ans pour s'achever vers - 9 500, connue comme étant la phase finale de la glaciation. Cette époque de grands froids pousse les hommes à une occupation massive des abris sous roche, des grottes et des cavernes. Les progrès de l'industrie lithique sont constants et la production d'outils en bois de rennes, ivoire et bois de cerf se multiplie. Pour la première fois nos ancêtres font état de préoccupations d'ordre esthétique et cherchent à améliorer leur confort.

Le site de la falaise du Pastou (Pyrénées-Atlantiques), à Sorde-l'Abbaye, réunit un ensemble d'abris sous roche occupés dès le Magdalénien (dernière culture archéologique du Paléolithique supérieur en Europe de l'Ouest qui s'étend entre environ 17 000 et 14 000 ans avant le présent). C'est à proximité d'une zone permettant la migration des Pyrénées vers les plaines d'Aquitaine dans une falaise calcaire, orientée au Sud, face aux Pyrénées, que se sont succédés divers groupes humains.

En effet, les magdaléniens s'ils paraissent occuper les lieux souterrains durant des périodes relativement longues, restent nomades et possèdent un territoire au sein duquel il effectuent des rotations au gré des saisons et de l'abondance du gibier ou des cueillettes.

Ainsi, l'habitat sous abri rocheux reste une pratique saisonnière et ne fait pas l'objet d'aménagements ou d'agrandissements creusés.

On peut se rendre compte de l'évolution du mode d'occupation par l'étude des couches de remplissage archéologiques :

Occupation stable : (Magdalénien III)
Ces périodes d'occupation de longue durée, correspondent à un climat froid, justifiant une stabilité des occupants.

Occupation intermittente : (Magdalénien IV: 12000 av. J.-C.)
Il s'agit d'une occupation sous forme de brefs séjours; l'adoucissement des conditions climatiques a pu permettre de fréquents abandons pour des périodes de chasse correspondant aux migrations saisonnières des grands herbivores. Les chasseurs vivant dans l'abri durant l'hiver le délaisseront lors de longues absences.

Au Magdalénien V, le climat, à nouveau froid et sec, provoque sans doute une occupation continue de l'abri.

Une phase de construction : au Magdalénien VI, avec l'amélioration des conditions climatiques, on assiste à une phase « construite » qui permet de prolonger l'abri en investissement ses abords : construction de gradins dans la pente, murettes en galets.

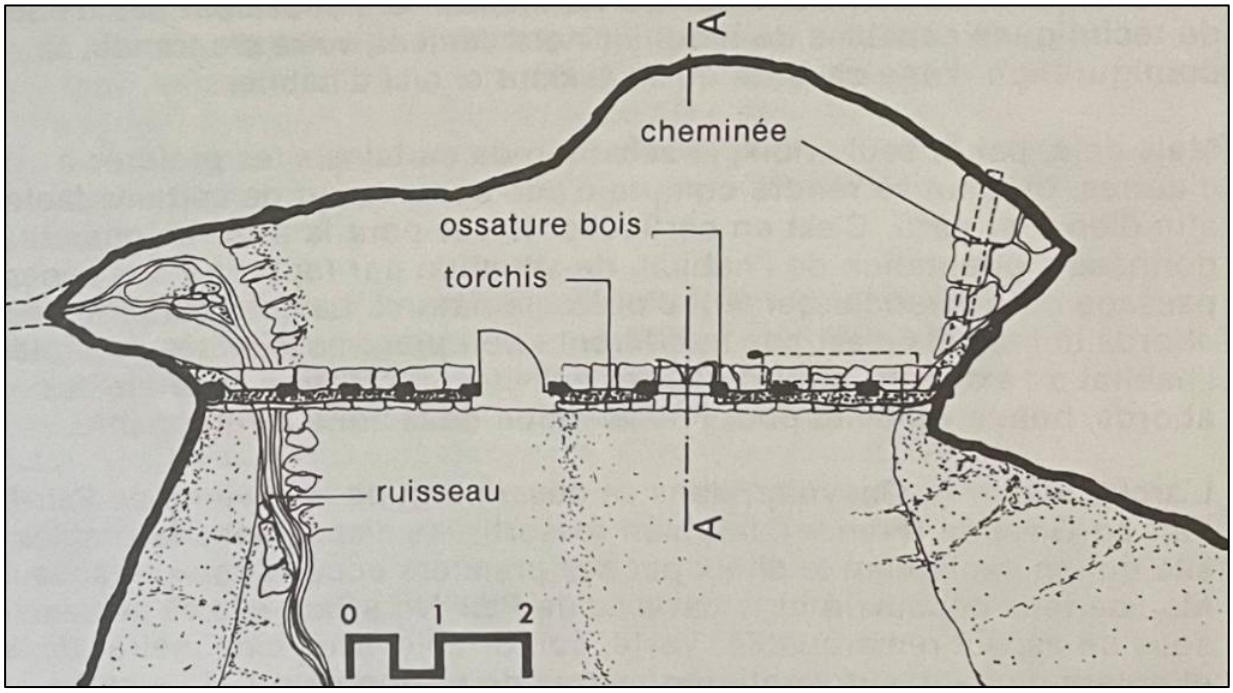


Figure 5 : Habitation sous roche à Monfa, Ariège (France)

L'occupation saisonnière intense se poursuit durant tout le Magdalénien, rassemblant au pied de la falaise du Pastou une véritable agglomération chaque hiver.

Enfin, l'étude archéologique du site de la falaise du Pastou montre également comment les hommes sont passés d'une utilisation brut de l'abri sous roche, à des débuts d'aménagement intérieur (sols, foyers, sépultures) puis à une extension, un prolongement extérieur construit de l'abri.

Habitat permanent, puis saisonnier, sépulture ensuite, tels ont été les multiples mutations et modes d'occupation de nombreux abris sous roche pyrénéens qui témoignent des prémisses du développement ultérieur de l'architecture troglodytique et de la diversité d'espaces qu'elle peut produire.

1.1.1.1.2 Les cavernes naturelles

Les premiers habitants des cavités naturelles ne disposaient pas d'outils et de techniques capables de modifier ou d'agrandir la configuration d'une caverne qu'ils avaient choisi d'habiter. Mais déjà, par la seule sélection de certains sites préférés à d'autres, on peut se rendre compte de l'observation de certains facteurs.

C'est le cas pour la prise en compte des données d'orientation de l'habitat ou de situation par rapport à des zones de passage. La configuration des abords de l'abri est également importante : possibilités de prolonger l'habitat à l'extérieur pour certaines activités, protection végétale des abords, bonne visibilité pour l'observation de la zone environnante.

L'archéologue A. Cheynier, dans sa description de la caverne de Pair-Non-Pair en Gironde (France), fait bien ressortir les dispositions favorables du site qui en expliquent le choix par ses premiers occupants: *« Lorsque les Moustériens découvrirent la caverne de Pair-Non-Pair, elle se présentait sous un aspect remarquable: vaste, confortable, avec cinq mètres de large et autant de haut, sur vingt-cinq mètres de profondeur. [...] La partie antérieure était éclairée par le jour, exposée qu'elle était en plein midi. Le vent du Nord ne pouvait pas y pénétrer*[1]*.»*

A.Cheynier, montre la succession des époques climatiques qui entraînèrent des modes différents d'occupation de la grotte. A l'Aurignacien, la température continuant à baisser, les habitants pénètrent plus profondément dans la caverne (nomadisme en relation avec les évolutions du climat extérieur). Ils apportent le feu, dans le cœur même de la grotte, et non plus à l'entrée de la caverne (solution qui évitait que la fumée ne pénètre). Ramenant le feu à une position plus profonde, ils utilisent comme cheminée un orifice dans la voûte.

Ainsi, le couple « habitat-habitant» montre sa capacité à s'adapter par interactions réciproques aux fluctuations climatiques.

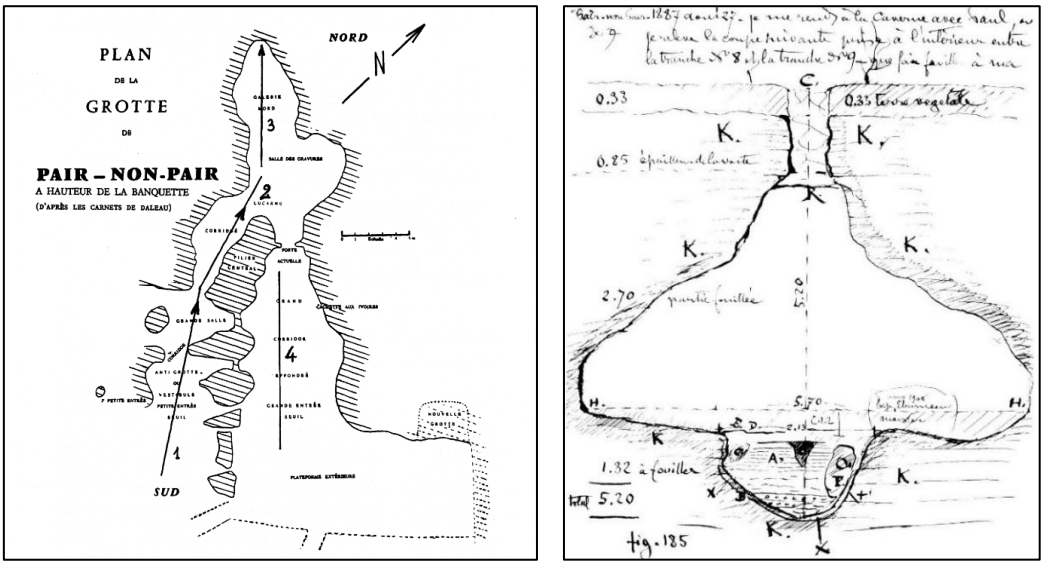


Figure 6 : Grotte de Pair-non-pair, Gironde (France)

Le plan de la grotte de Pair-non-Pair montre une large exposition au sud. La grotte est précédée par une plate-forme extérieure ; la variété des espaces, de l'extérieur vers l'intérieur, a permis une habitabilité différente selon les périodes d'occupation et les conditions climatiques extérieures. La coupe montre les couches de dépôts liées aux diverses époques d'occupation et la cheminée comblée ultérieurement.

1. André Cheynier, Caverne de Pair-non-Pair, Bordeaux, Société d'archéologie, CNRS, Documents Aquitaine, 1963, p. 179.

L'occupation humaine de la grotte sera interrompue car il devient impossible de s'y tenir debout, à partir d'une certaine période, à cause d'un comblement atteignant presque le plafond. Ce comblement provient de l'accumulation de couches de dépôts dues à l'activité de l'homme. Il s'agit donc d'une cessation d'occupation, pour des raisons « artificielles» et non pour des raisons d'ordre climatique.

C'est par sa mobilité par rapport à son habitat que l'habitant des cavernes s'adaptait et recherchait des conditions de vie favorables. L'autre moyen d'agir (modification de l'habitat) s'avère plus difficile à mettre en œuvre : « dureté» du matériau (le rocher) et niveau de développement technique (outils) insuffisant pour travailler les parois.

Avec un matériau beaucoup plus tendre (en particulier le lœss dans certaines régions de Chine), il a été possible de faire évoluer la forme de l'habitat creusé en vue d'une adaptation à de nouvelles conditions d'habiter.

En effet, en réalité le creusement de cavités artificielles reste soumis aux contraintes du milieu et limité par les possibilités techniques offertes par les outils alors utilisés. Il faudra attendre la période du Néolithique pour voir apparaitre avec la sédentarisation, l'évolution des techniques d'outillage et l'avènement de l'agriculture, les premiers véritables troglodytes.

1.1.1.1.3 Les premiers troglodytes

La période paléolithique :

L'homme moderne va vivre à cette époque reculée une véritable révolution de son mode de vie. De chasseur il devient éleveur et de cueilleur, agriculteur.

Si l'on admet que le troglodytisme est un acte volontaire et conscient, fruit d'une réflexion qui pousse l'homme à modeler dans la roche un espace à sa mesure, on peut indéniablement considérer que les abris sous roche et les grottes naturelles retravaillées et parfois agrandies par les groupements humains du Néolithique, sont bien la forme primaire et ancestrale de nos actuels troglodytes.

L'occupation continue d'un habitat en cavité naturelle ou creusée par l'homme est liée à la maîtrise de l'usage du feu et aurait donc pu intervenir au paléolithique supérieur (- 35000, -10000). Dès lors, un habitat creusé, associé à la présence du foyer, s'avèrera plus confortable que les autres formes primitives d'habitation (huttes couvertes de branchages ou de peaux).

La période néolithique :

Caractérisée par l'apparition de groupes organisés en clans, cette période est témoin d'un phénomène de sédentarisation qui s'accompagne de l'avènement des premiers habitats troglodytes.

Généralement de petite taille, ces habitations semi-enterrées étaient probablement surmontées d'une toiture conique, suggérée par le plan circulaire et la présence de trous en périphérie.

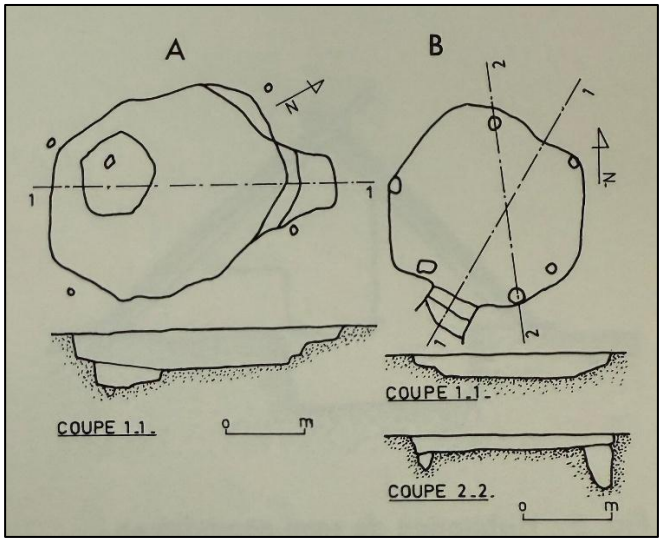


Figure 7 : Plan et coupe de vestiges de maisons creusées du néolithique.

A. Zishan (Hebei)
B. Egou (Henan)

A tous niveaux, la subsistance du mode de vie troglodytique s'explique. Les conditions climatiques rudes, la protection évidente des agressions extérieures, l'économie de travail et la solidité à toute épreuve de ce qu'il faut bien considérer comme une « maison en dur », ne peuvent que pousser les hommes à s'établir durablement.

Mais c'est avec la naissance de la métallurgie et avec l'âge du bronze, que les premiers véritables troglodytes vont faire leur apparition.

Le choix de sites privilégiés pour l'établissement du lieu de vie, préoccupation déjà présente au néolithique, va se tourner massivement vers une occupation de lieux naturellement défensifs. On assiste à l'établissement de groupements humains sur les sommets de reliefs naturels, sur l'extrémité de promontoires, qui se voient parés de fortifications souvent élaborées.
D'autres groupements humains vont, en fonction de conditions naturelles différentes, s'établir sur les presqu'îles côtières ou recourir à l'établissement de villages lacustres.

Les cavités situées au-dessus de vallées encaissées et sur des corniches rocheuses difficilement accessibles vont être occupées de façon indiscutable.

Une prise de conscience des facteurs d'économie, de protection, de discrétion et de solidité va peu à peu orienter le choix de vie troglodytique vers d'autres critères de sélection.

Les matériaux de construction sont chers et réservés dans la majorité des cas aux besoins purement seigneuriaux. La coupe du bois, de même que l'extraction de la pierre n'est que rarement autorisée. Le bien immobilier reste propriété du seigneur et sa modification entraîne la mise en œuvre d'un savoir-faire spécialisé, loin d'être à la portée d'un simple fermier.

Là encore, le recours au mode de vie enterré est perçu comme une solution.
En effet, l'économie de matériaux est importante. La possibilité de se passer de fournisseurs spécialisés tels que charpentiers, maçons, tailleurs de pierre et autres corps de métiers qu'il faudrait payer, est intéressante.

L'élaboration de cavités artificielles, suivant un axe horizontal à la paroi est complété éventuellement par une extension, adjonction d'appentis à structure architecturale.

Les abris souterrains, totalement excavés, auront une toiture au niveau du sol, recouverte de terre. Les maisons à patio central s'organiseront autour d'une cour encaissée qui donnera air et lumière aux différentes pièces creusées sur les parois verticales de la fosse.

Les réalisations troglodytiques ayant pour but l'habitat permanent ont toujours accès au soleil, directement ou par la transition d'un patio. Ils n'ont de commun avec les cavités naturelles que leurs aménagements ou la matière créatrice d'espace. Sa forme découle de la technique employée et des matériaux qui, selon leur flexibilité, engendreront des espaces orthogonaux ou souples.

La pierre résistant mal à la flexion, le troglodyte fera appel, le plus souvent, à un système de voûtes et d'arcs qui épouseront des formes distinctes suivant la morphologie de la roche.
La portée de ces voûtes sera courte et, pour franchir des espaces plus vastes, des piliers seront aménagés dans la masse rocheuse.

« L'habitation troglodytique ne réclame pratiquement pas de matériaux de construction : aucune boiserie n'y est nécessaire, sauf celle de la porte et de son encadrement; point de brique, ni de moellons pour monter les parois; point de poutre, ni de solive pour soutenir les plafonds »[1]

1. A.Louis, « Tunisie du Sud Ksars et villages de Crêtes » CNRS – 1975.

1.1.1.2 Troglodytes verticaux

1.1.1.2.1 Cavités creusées en terrain plat

Les habitations creusées verticalement au sol gardent, malgré ce nouvel axe, les mêmes aménagements que les habitations troglodytiques horizontales.

Troglodytisme de plaine et habitations élémentaires

Si la caverne procure un abri confortable du point de vue climatique, elle offre de plus un retranchement défensif efficace. En plaine, la maison souterraine est vulnérable.
Les troglodytes devaient alors faire face au danger en employant d'autres tactiques pour défendre leurs territoires. Les indiens du sud-ouest s'en aperçurent vite et accolèrent à leurs Kivas enterrées des tours reliées directement aux chambres. La défense n'est donc pas la cause principale de l'élaboration de telles habitations, mais plutôt le besoin de protection climatique, allié à la carence de pierres. En effet, dans ces régions de plateaux à climat chaud et venteux, l'homme chercha à se protéger du soleil et du vent.

Turquie, Chine, Tunisie :

En Turquie : une toiture protège de l'ardeur des rayons solaires, un muret de pierres dévie le vent, et une fosse creusée dans le sol prodigue un certain confort thermique. L'établissement fixe se rencontre sur le haut pays de l'Anatolie centrale; les « yaylas», ne sont que de simples abris creusés dans un terrain en pente du bas pays. Seules les façades, précédées de murets de pierres délimitant un enclos, sont apparentes. Des poteaux inclinés soutiennent les toits. Ces abris servent également de refuge pour le bétail.

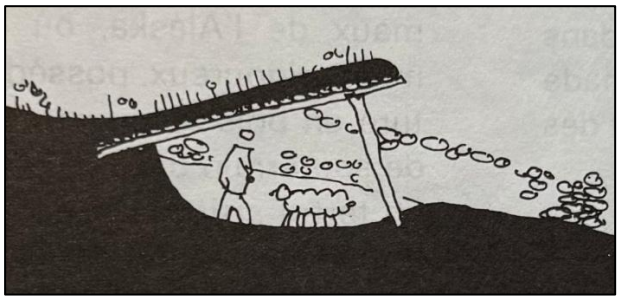


Figure 8 : Yayla d'Anatolie centrale.

Cet abri existait il y a 4000 ans en Chine. La bourgade de Pan P'O, dans la province actuelle de Chan-Si, comportant environ 600 habitants, regroupait une trentaine d'habitations circulaires, de cinq mètres de diamètre environ, s'enfonçant d'un mètre dans le sol. Les murs en clayonnage étaient revêtus de boue, d'argile, et le toit soutenu par six poteaux se répartissant autour du foyer central. Leurs entrées, assez basses, se trouvaient orientées vers le sud afin de se protéger des vents du nord.

En Tunisie, le nomade revenant fréquemment sur les mêmes terres a instauré un compromis entre la hutte et la demeure troglodytique. Ces abris à demi enfouis étaient excavés dans le sol des plaines et le nomade s'y installait durant le temps des labours et des semailles.

Les pays froids :

Le troglodytisme élémentaire s'est transformée au cours des âges. Dans certaines régions à climat rigoureux, on recherchera essentiellement une isolation thermique dans la terre.
Dans les pays slaves, les habitations troglodytiques élémentaires persisteront de nos jours car elles sont jugées bien adaptées au froid et au vent. Un bon exemple est illustré par l'alpage d'Aï (Suisse), enterré de deux mètres dans un tertre naturel d'où seule la toiture en bois émerge au niveau du sol. Son utilisation actuelle est celle d'abri de bergers, mais il sert aussi de refuge pendant les randonnées.

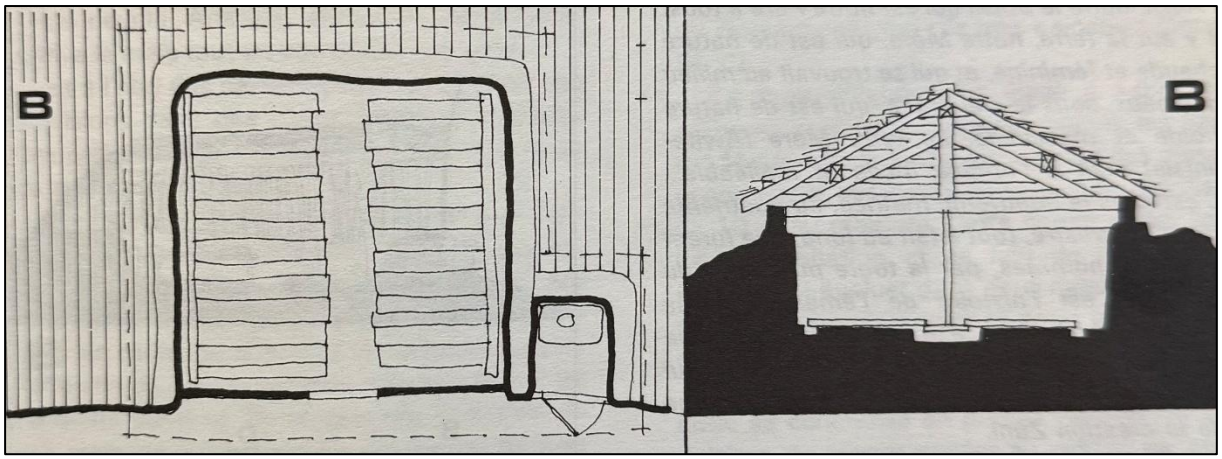


Figure 9 : Plan et coupe de l'Alpage d'Ai (Suisse).

Aux Etats-Unis, le « Frontier Dug Out » fut une des premières demeures construites sur le territoire (figure 53 C).

S'élaborant dans une fosse, les murs montés avec des mottes gazon donnaient appui à une structure de perches accolées les unes aux autres, et sur laquelle un matelas d'herbe assurait l'étanchéité. Une double épaisseur de mottes de gazon constituait la couverture de l'abri.
Les racines de l'herbe, en poussant, donnaient une cohésion à l'ensemble. Extérieurement, cette maison ressemblait à un monticule recouvert d'herbe.

Le climat du Groenland méridional obligea les hommes à boiser et à maçonner leur « igloo » dans la profondeur du sol. Les esquimaux de l'Alaska, où le climat est un peu moins rigoureux, possèdent un habitat à structure en bois recouverte de terre. Il est qualifié de souterrain dans le sens où il est inclus dans un tertre artificiel. L'accès, situé sur la toiture, fournit la lumière et sert de cheminée.

Les trois derniers exemples montrent un emploi très astucieux de la terre et des végétaux.
Ils mettent en évidence l'inutilité partielle de certains matériaux contemporains pour lutter contre le froid. La terre y remédie : sa masse thermique apportant une isolation thermique aussi valable que tout autre matériau et elle a l'avantage de ne pas être nuisible à l'environnement.

Amérique du nord :

Tous les exemples cités jusqu'ici ne sont, en fait, que des phases plus ou moins ponctuelles du développement architectural de plusieurs civilisations

Dans la région couvrant actuellement la majeure partie des états de l'Arizona, du Nouveau-Mexique, du sud de l'Utah et du Colorado, dans un paysage majestueux de plateaux de grès (mesa) séparés par des canyons profonds, de buttes ou de rocailles désolées sous un climat semi-désertique, hivers froids et aux étés chauds (de - 12°C à + 38°C) sous les pluies violentes d'août ou les neiges de janvier, va se développer une architecture qui, petit à petit, va sortir du sol et des cavernes pour former des villages compactes et se réfugier, finalement, dans les anfractuosités des falaises.

Les premiers indiens américains, chasseurs nomades, ne possédaient aucun abri permanent. Ils séjournaient parfois dans des cavernes leur servant de refuges intermittents.
Le réchauffement post-glaciaire amena la disparition des gros gibiers et la sédentarisation des groupes se transformant graduellement en cultivateurs.

Le peuple Anasazi, devenant sédentaire, cultiva le maïs tout en continuant de chasser.
Il vivait à l'abri des cavernes mais protégeait ses provisions dans des petites excavations qui servaient de stockage pour la nourriture.

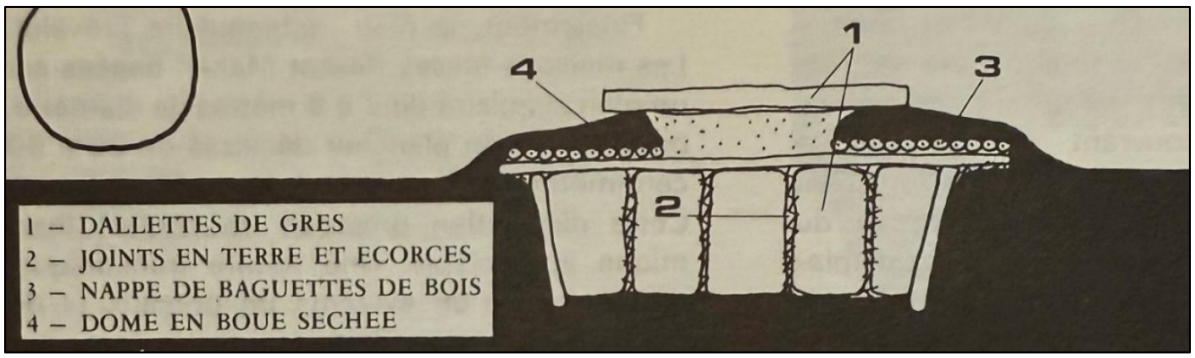


Figure 10 : Coupe sur les cistes à provisions

Elles étaient couvertes d'une toiture en rondins ou d'un dôme de terre. Dans un sol sablonneux, ces fosses étaient revêtues, sur leur circonférence, de dallettes de grès jointes avec un mélange d'écorce de genévrier et de terre afin de retenir le sable et d'empêcher les rongeurs d'entrer.
La largeur de certaines de ces réserves permettait d'y dormir. Plus tard se développa un type d'architecture connu sous le nom de maison-fosse avec un plan rectangulaire.

Les maisons-fosses Basket Maker, basées sur un plan circulaire de 7 à 9 mètres de diamètre, possédaient un plancher décaissé de 30 à 90 centimètres par rapport à la surface du sol. Cette disposition procurait un confort thermique appréciable. Une toiture tronconique, soutenue par un système de poteaux et de poutres en bois, coiffait cette fosse. Des nappes de joncs, de roseaux tressés et de branches recouvertes d'une épaisseur de terre assuraient l'étanchéité.

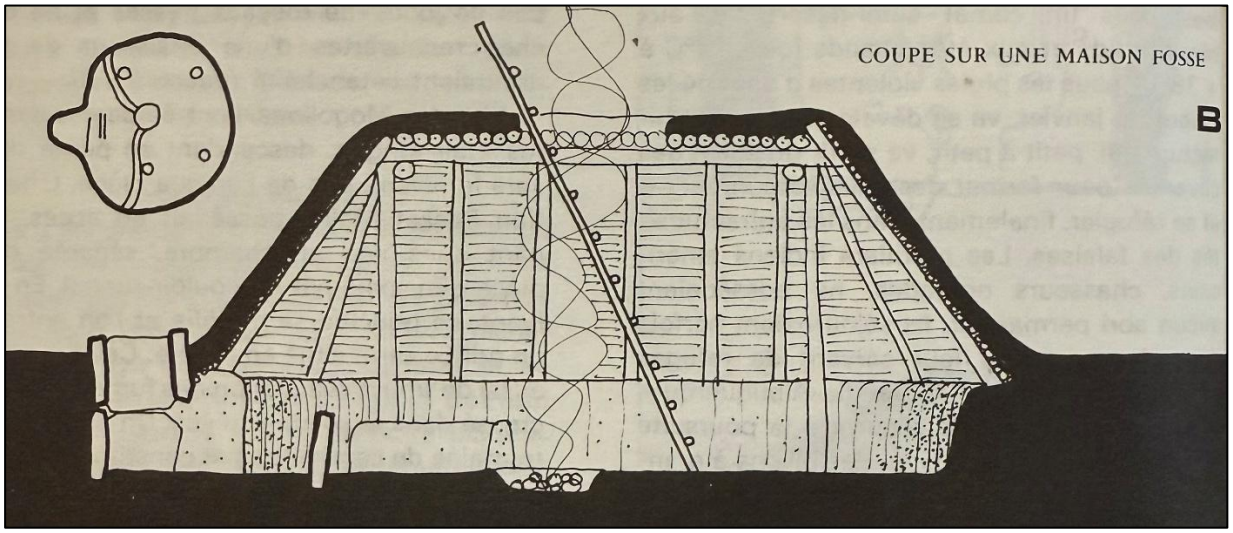
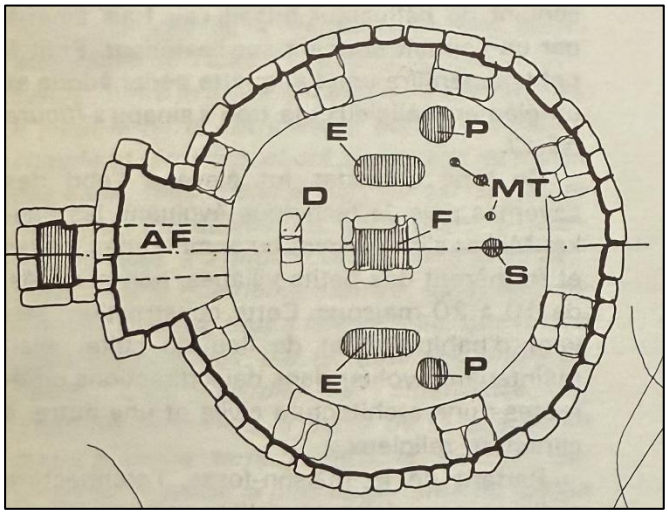


Figure 11 : Coupe sur une maison fosse

Chez les Mogollons, l'entrée de ces demeures était longue, descendant en pente douce vers le niveau bas de l'unique pièce. L'habitation Basket Maket possédait un accès, donnant dans une antichambre, séparée de la pièce principale par un couloir-tunnel. En évoluant, ce principe se modifia et l'on entra par un orifice carré situé en toiture. Celui-ci servait aussi de trou d'évacuation des fumées du foyer creusé dans le sol de la pièce. Un muret, d'une trentaine de centimètres et constitué de dallettes de pierre ou d'adobe, partageait la pièce principale en zones. Devant le foyer, une dalle servant de déflecteur brisait l'air frais amené par un conduit donnant sur l'extérieur.



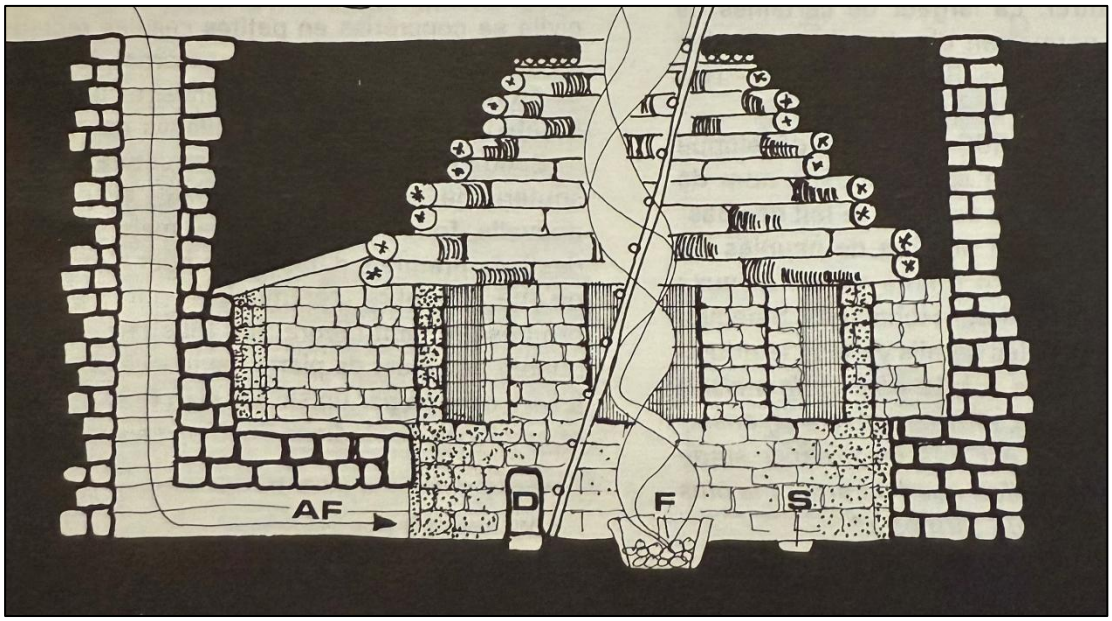


Figure 12 : Plan et coupe d'une kiva de clan. Croquis de J. Margas.

AF : Air frais
E : Estrade de bois
D : Deflecteur en maçonnerie
F : Foyer
P : Jarres à provisions
MT : Trous de metier à tisser
S : Sipapu

Ce type d'habitat fut élevé à l'abri des cavernes puis, la technique évoluant, les Basket Maker s'installèrent au sommet des mesas et formèrent des petits villages, de 10 à 20 maisons. Cette construction, servant d'habitation et de lieu de culte, allait maintenant évoluer dans deux directions différentes : une architecture civile et une autre, à caractère religieux.

Partant de la maison-fosse, l'architecture civile se concrétisa en petites cellules rectangulaires, de pierres posées au mortier de terre, se groupant suivant un plan linéaire curviligne en villages éparpillés. Pendant ce temps, la structure semi-souterraine continue de coexister avec cette nouvelle forme architecturale mais perd sa destinée première d'habitation pour n'être plus qu'une chambre cérémoniale qui s'enterre progressivement.

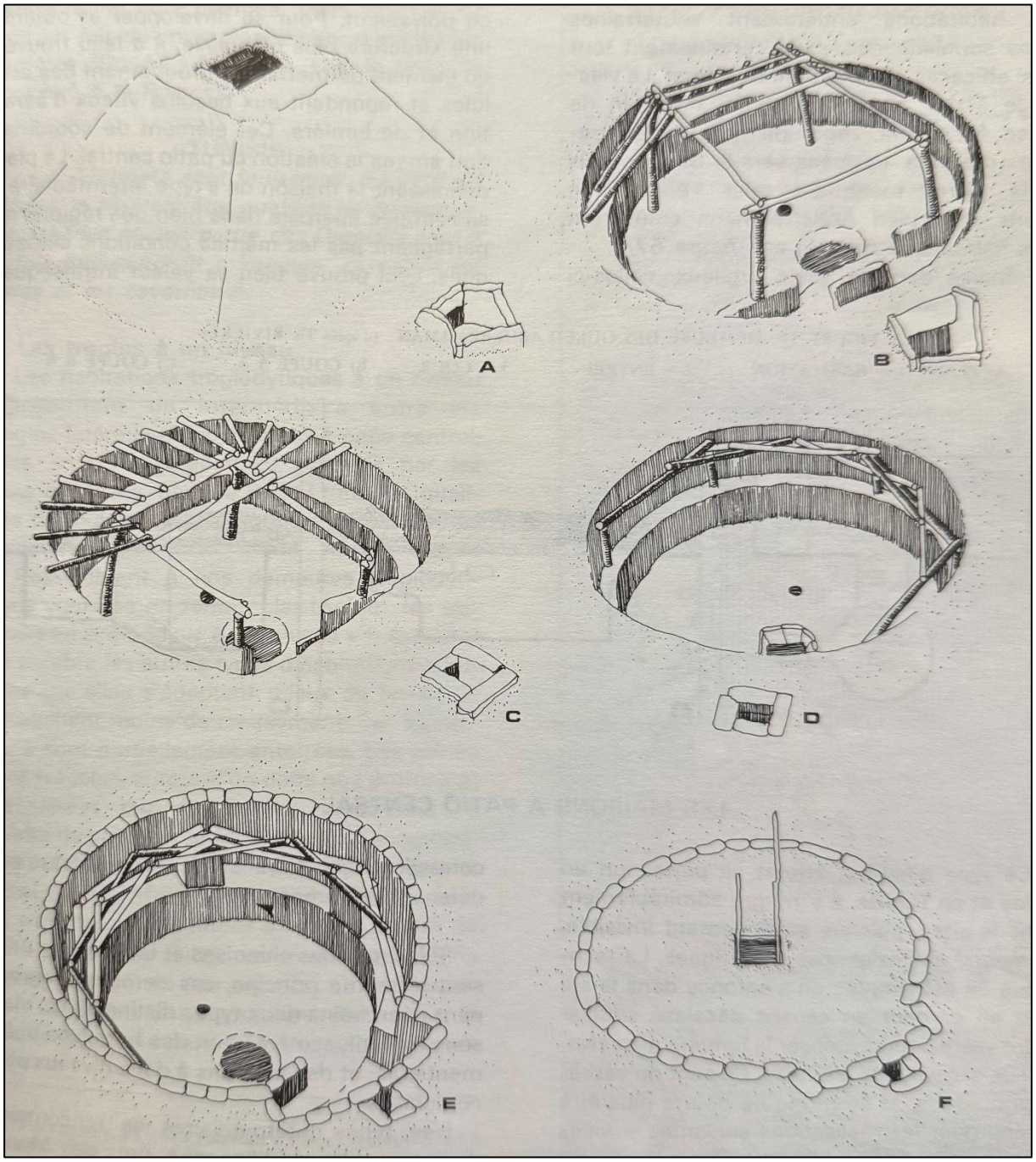


Figure 13 : Evolution de la maison fosse – Architecture semi-souterraine, puis entièrement souterraine aboutissant à la kiva.

Le petit pueblo sera tout d'abord occupé par un simple clan (base sociale et religieuse des Indiens Pueblo) puis, en se combinant, aboutira aux Grands Pueblos (1100 à 1300) et donnera le Cliff-Palace de Mesa Verde.

Chaque village possédait sa chambre religieuse appelée « Kiva de clan ». Elle était circulaire et aussi souterraine que possible. Le diamètre des Kivas variait de 3 à 5 mètres.
Beaucoup possédaient une banquette périphérique s'élevant à plusieurs pieds au-dessus du sol. Dans la zone de Kayenta et de Mesa Verde, certaines de ces chambres étaient munies d'une alcôve dans le côté sud-est au même niveau que la banquette. Ce détail donnait au plan une forme de trou de serrure. Dans le sol de l'unique pièce était creusé un foyer central, axé sur une ouverture en toiture. Un conduit d'air frais passant sous le renfoncement sud-est et connecté à la chambre par un tunnel, amenait l'air nécessaire au tirage du foyer. Entre l'orifice du conduit de ventilation et le foyer, s'élevait un déflecteur en maçonnerie ou dalle de pierre.

Afrique du nord :

D'autres habitations entièrement souterraines et tout aussi efficaces compte tenu du climat se retrouve en Afrique du Nord. Le village de Mzira, situé au Sahara, non loin de l'Oued Mestaoua, regroupe près de quatre-vingts maisons, tournées vers le Sud. Le bois et la pierre manquant pour l'élaboration d'abris, les ouled Abderrahmann creusèrent leurs habitations dans le sol (figure 57).

Enfouies dans le sable argileux, celles-ci montrent un plan rectangulaire coiffé d'un toit en terrasse. Pouvant être comparées aux habitations tunisiennes, profondes à un niveau, elles sont cependant de tailles beaucoup plus réduites. La cour circulaire permettant l'accès de la demeure ne mesure que deux mètres de diamètre. Une seule pièce sert d'habitation. La toiture réalisée à l'aide de rondins de bois posés sur la tranchée dans le sens de la largeur est recouverte de terre, de pierre et finalement de sable argileux.

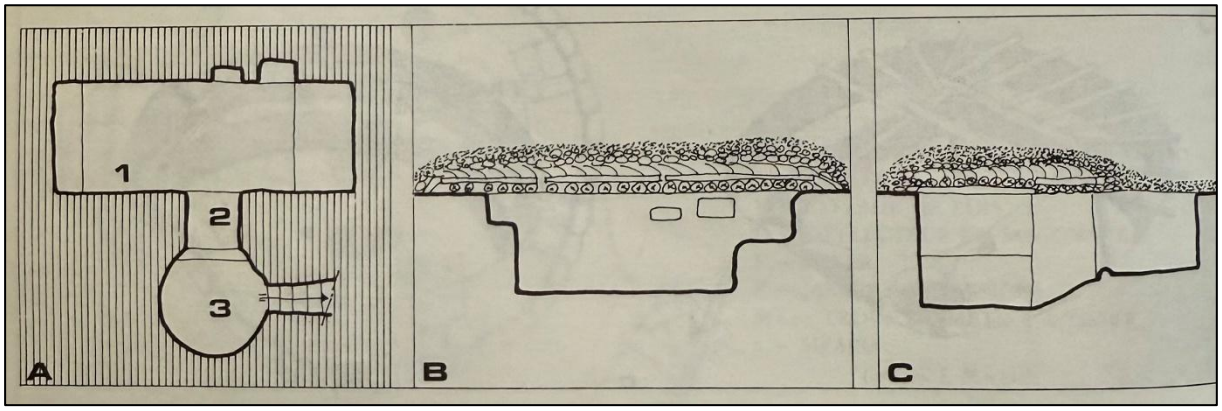


Figure 14 : Demeure des Ouled Abderrahman.
A) Plan : 1 = habitation ; 2 = entrée ; 3 = cour
B) & C) = coupe

L'ensemble des demeures élémentaires à excavations se basent généralement sur un plan très simple, réduit à un espace polyvalent. Pour se développer et obtenir une structure plus complexe, il a fallu trouver un élément permettant le groupement des cellules et répondant aux besoins vitaux d'aération et de lumière. Cet élément de coordination amena la création du patio central.

Habitats à patio central

Ce type d'habitat s'intègre admirablement dans n'importe quel site... puisque pratiquement invisible, et répond aux exigences climatiques. La technique en est simple : on s'enfonce dans le sol tout en gardant un espace décaissé suffisamment vaste pour dispenser la lumière nécessaire aux excavations latérales.

Si les maisons chinoises et tunisiennes utilisent le même principe, ces dernières regroupent néanmoins deux types distincts : les maisons à un niveau côtoyant des huttes complémentaires, et des maisons à deux niveaux plus complexes.

Tunisie :

Les troglos à un niveau :

Les habitations troglodytiques à un niveau représentent un intermédiaire entre les troglos latéraux et les maisons à patio central. Elles sont essentiellement utilisées par les gens des ksars, dans le Djebel tunisien. Ressemblant à nos demeures troglodytiques creusées en terrain plat (Anjou), les troglos « à un niveau » surpassent en nombre les autres types d'habitations creusées car elles s'adaptent mieux au terrain et nécessitent moins de creusement.

Ces habitations sont partiellement enterrées. Les pièces sont creusées autour d'un puits peu profond et complétées par des huttes construites au niveau du sol, pour le bétail ou l'abri temporaire d'été. Abritant une seule famille, deux ou trois chambres seront excavées autour du demi-patio. Des huttes serviront de lieux de travail (tissage, tri des olives...) et de réunion pour les femmes. Le rôle de la femme dans le ménage, influent sur l'élaboration de la maison.
La demeure peut ainsi comporter près de dix pièces lorsqu'elle regroupe plusieurs foyers. Les chambres et les réserves sont alors réparties autour d'un vaste patio (50 m^2) ne dépassant guère quatre mètres de haut.

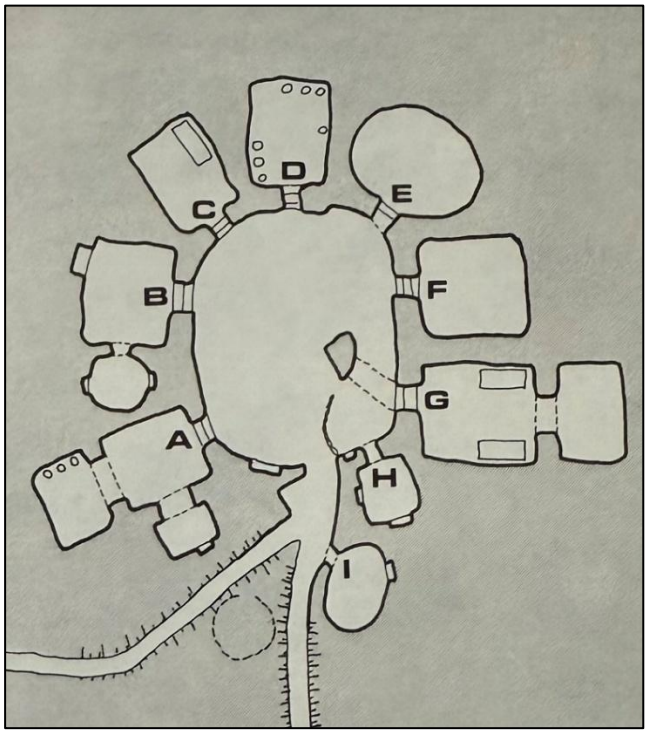


Figure 15 : Schéma des différentes pièces composant une habitation troglodytique a un niveau :
A : chambre principale : (largeur 2.50 m; longueur 6 m; hauteur 2 m) a 2 pièces avec alcôve latérale et une alcôve surélevée de 60 cm pour le couchage.
B : réserves : (3 m+ 4 m) dépôt à olives - figues, huile, farine.
C: pièce d'habitation recevant le métier à tisser.
D : entrepôt avec jarres à huile (3 m+4 m)
E : réserve a provisions
F: chambre d'amis ou parents
G: pièce d'habitation
H : entrepôt ou étable

Ici, deux familles parentes se partagent la cour tandis que leurs habitations se font face. Seule la cuisine est commune aux deux familles. On trouve parfois des piliers réservés dans la masse lors de l'élaboration de salles plus importantes comme le « séjour ».

L'excavation ayant fournie des déblais importants, une partie de ceux-ci est utilisée dans l'aménagement d'un muret de consolidation autour du patio. Au milieu de celui-ci, une sorte de puits perdu est aménagé pour la collecte des eaux usées.

Les troglodytes en profondeur :

Dans les Monts Matmata des pistes serpentent entre des mamelons montagneux, seules indications d'un aménagement humain. Au niveau du sol... aucune trace d'habitation !
Pour un œil averti, quelques trous noirs se distinguent sur le flanc du sol... ils représentent les seuls accès aux habitations souterraines, excavées sur deux niveaux dans le sol autour d'un puits circulaire ou carré.

Ces habitations troglodytiques ont en commun comme tout troglodytes de la région méditerranéenne. de posséder une demeure isotherme à moindre frais sous des conditions climatiques parfois extrêmes.

Ces habitats troglodytiques se délimitent sur le sommet d'un mamelon rocheux, selon l'orientation désirée. Ils extraient ensuite, verticalement au sol, un puits qui peut être circulaire (d'un diamètre de 3 à 4,50 m) ou carré (le côté sera compris entre 3,50 m et 7 m). La profondeur du puits varie de 5 m à 10 m. Le fond, constituant le niveau de la cour de la maison devra être supérieur au niveau du couloir d'accès.

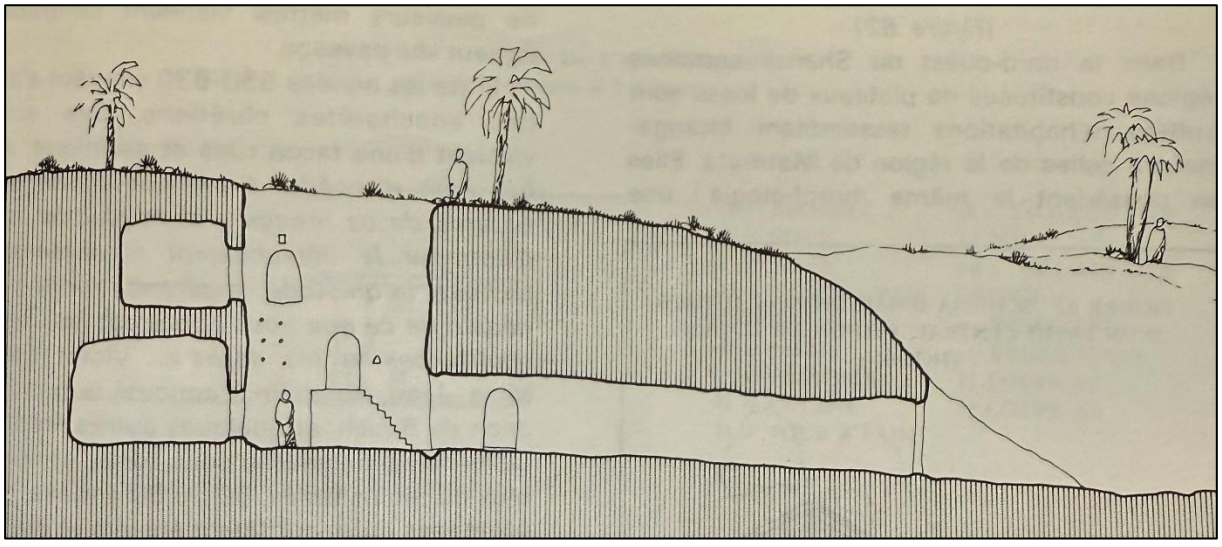


Figure 16 : Coupe d'une habitation à Matmata

La seconde opération consiste au forage du tunnel reliant la cour au couloir d'accès à ciel ouvert. Généralement coudé, il est le vestibule de la maison... et aussi l'écurie, car l'étable et les remises à outils y sont excavés latéralement. Une porte en bois ferme l'entrée, à l'encontre des maisons à un niveau où l'accès reste libre. Tout autour du patio s'ouvriront les pièces habitables et les resserres à provisions, en nombre et dimensions variables suivant l'importance et la richesse de la famille. D'après Geneviève Libaud, le forage aura nécessité cinq à sept mois de travaux, et coûté de 500 à 700 dinars (5 000 à 7 000 Frs, prix en 1979).



Figure 17 : Matmata, vue d'une cour. Source : Linternaute.com

Les plus grandes de ces chambres ont 8 mètres de long par 4 mètres de large et 3 mètres de hauteur sous voûtes. Elles sont taillées dans le limon en forme de voûtes ogivales.
Le creusement des chambres suit une orientation hiérarchisée par une symbolique. Il est effectué à partir de la chambre du chef de famille, donnant à l'est. Cette première chambre est surélevée à environ un mètre au-dessus du niveau de la cour, un escalier lui donnant accès. Lors du creusement, des banquettes sont ménagées dans la masse. La pièce principale, ou pièce des réserves, sera ensuite excavée à gauche de la chambre du chef, puis les autres chambres d'habitation. La cuisine et les greniers termineront l'ensemble de la maison troglodytique. On accède, par des pierres ou des bouts de bois fichés dans le limon, au niveau supérieur réunissant les greniers et magasins.

La cour de ces demeures, contrairement à celles des habitations à un niveau, se présente à bords francs, le déblaiement étant étalé autour et blanchi à la chaux.

Ce revêtement blanc permet de repérer aisément les animaux dangereux qui tombaient par mégarde dans la cour. Cet enduit favorise aussi la ventilation du fait de l'insolation de la cour peinte en blanc, l'air chaud monte, et créée latéralement un appel d'air de compensation, provoquant un courant d'air dans les locaux adjacents communiquant avec la cour.

Pour la diffusion de la lumière, en été, la lumière rejaillissant sur l'enduit blanc de la cour centrale, devait être diffusée et filtrée.

L'extrême étroitesse des hublots permettait à la vive lumière de pénétrer mais d'être contrôlée par les canons de lumière qui les prolongent vers l'intérieur. Certaines pièces demandant de la fraîcheur, (annexes des oratoires, magasins) ne recevaient pas de lumière. D'autres prenaient le jour par l'ouverture des portes (cuisine, réserve d'eau, salle de service).

1.1.1.2.2 Habitations creusées dans le sol

La couche de lœss, sable calcaire fin consolidé, de la vallée du fleuve Jaune en Chine, a été utilisée dès la fin du néolithique pour y établir un habitat. Ce matériau, suffisamment dur pour résister à l'érosion, peut cependant être travaillé par l'homme qui a ainsi astucieusement tiré parti de ses qualités mécaniques.

Les types d'habitations que l'on peut reconstituer en étudiant les vestiges découverts, montrent la coexistence de maisons enterrées, ou semi-enterrées, et de maisons à ossature bois, à poteau central et remplissage des murs en torchis. Au Henan, le site de Hougang montre une organisation en villages groupant plusieurs types d'habitations ayant existé simultanément.

Primitivement entièrement enterrée, au fur et à mesure de l'introduction d'innovations technologiques, le sol va s'élever vers la surface. On distingue trois différentes typologies d'habitats troglodytiques verticaux.

Habitations creusées en poche :

Ces habitations creusées « en poche» constituent probablement la forme d'habitation préhistorique la plus ancienne connue en Chine.

Le climat froid du paléolithique a dû faire prendre conscience aux hommes de l'intérêt qu'il y avait pour eux-mêmes et pour la conservation de leur nourriture, à creuser toujours plus profondément.

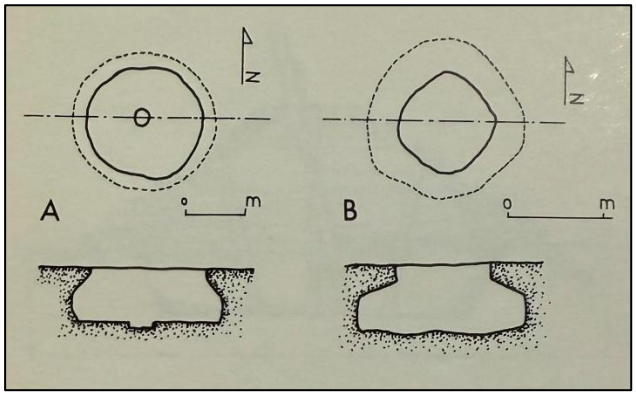


Figure 18 : Habitations creusées en poche

A. Baiying (Henan)

B. Egou (Henan)

Vers la fin du paléolithique, à partir des habitations primitives semi-enterrées, deux voies ont développé des solutions différentes.

La première voie a vu la maison sortir du sol, avec l'apparition de murs en pisé ou en torchis.

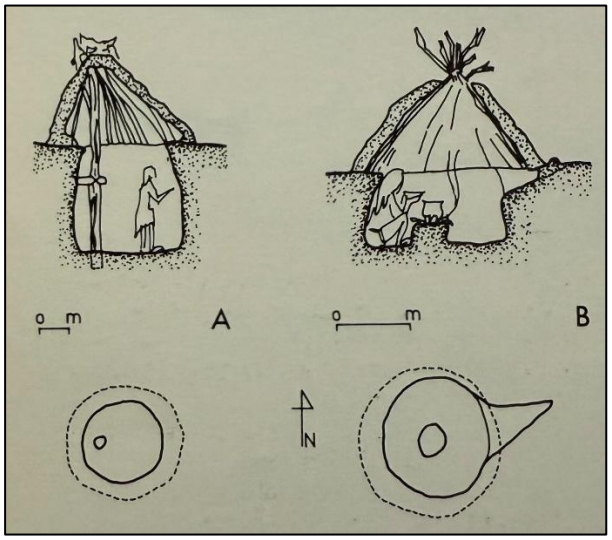


Figure 19 : Reconstitution d'après vestiges de deux habitations en poche.

A. Tangquangou (Henan)
B. Sunqitun (Henan)

La deuxième voie au contraire, confirme la solution enterrée. Il s'agit de trous creusés dans le sol, de plan circulaire, le diamètre à la base est plus grand qu'au sommet. Cette configuration assure une certaine protection contre les intempéries. Leur profondeur est d'environ 3 m, le diamètre au sommet variant de 1,80 m à 3 m, celui de la base de 2,60 à 4 m. Le foyer occupait soit une position centrale, soit était disposé à la périphérie.

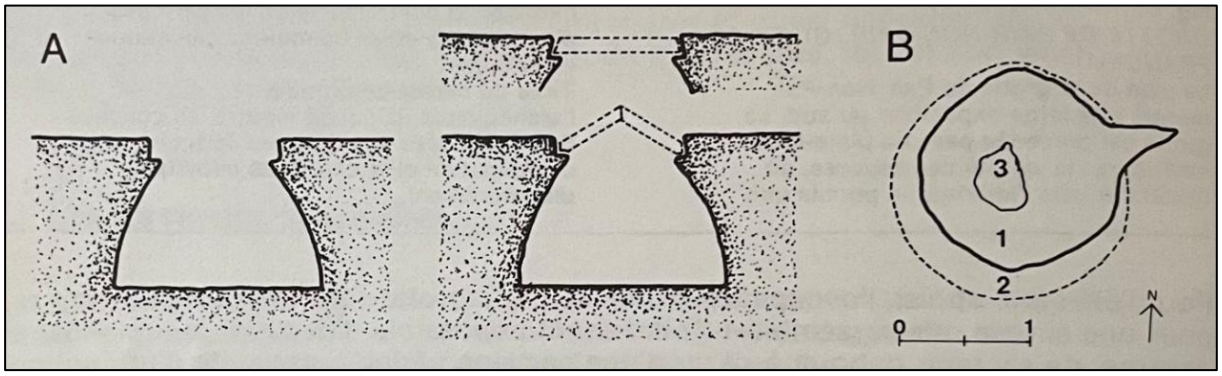


Figure 20 : Habitation du néolithique en chine

A – Coupe d'une habitation creusée en poche, avec deux hypothèses sur le mode de couverture temporaire (village de Jing, province du Shanxi).

B – Plan d'une habitation creusée en poche (Jianxi, province du Henan) :

1. *Périmètre du haut de la fosse*
2. *Périmètre du bas de la fosse*
3. *Position du foyer*

Le manque d'outil métalliques à ce stade de développement explique l'absence de bois dans ce type d'habitation, qui ne comportait pas de toit. Cette incapacité à construire un toit a limité les dimensions de l'abri, compte tenu de l'impératif de protection contre les intempéries.

En revanche, avec un outillage de pierre rudimentaire, le lœss se prêtait à être creusé et modelé de la sorte. La concavité de la paroi permettait de s'abriter un peu et certains vestiges montrent qu'une simple couverture de branchage pouvait constituer une paroi provisoire pour se protéger de la pluie et de la neige. L'accès s'effectuait par un poteau de bois, entaillé de marches et dressé à l'entrée de l'excavation.

L'évolution de ce type d'habitation conduit à une deuxième configuration.

Habitations creusées en fosses :

Les habitations creusées en fosses sont moins profondes que les habitats creusés en « poche ».

Les possibilités d'abri, l'économie de matériaux de construction, la possibilité de revente de la roche extraite vont peu à peu générer des vides organisés autour d'une cour percée verticalement, de façon à recréer artificiellement en profondeur un relief utilisable.

Présent dans différentes régions du monde comme en Tunisie ou en Ethiopie, ce type d'habitats troglodytes ne semble pas remonter au-delà du IXe siècle.

Les parois de ces habitations sont verticales, sans rétrécissement vers le haut, ce qui réduit le risque d'éboulement. Le plan est ovale, la profondeur de 1 à 2,5 m. Il est probable qu'un toit les recouvrait. Dans le Shanxi, des habitations en fosse, sur plan carré, réunies deux à deux par un passage, ont été observées. Agrandissement des dimensions, possibilité de couverture (apparition de la charpente), plusieurs excavations reliées entre elles, tous ces facteurs nouveaux montrent un progrès dans la construction des habitats enterrés.

Habitations semi-enterrées :

« C'est une forme intermédiaire qui illustre au cours de l'histoire, le passage des habitations creusées en poche, puis en fosse, aux habitations au-dessus du sol.»

Un grand nombre de vestiges dans le monde nous montrent des constructions en partie enterrées.

Le sol était généralement creusé de 0,40 m à 1 m ; mais il existait également des profondeurs de creusement de plus de 3 m. Ces habitations étaient recouvertes d'un toit ainsi qu'en témoignent les trous des poteaux visibles dans le sol et il n'est pas exclu que l'on ait pu y pénétrer par le toit, comme dans les habitations-huttes semi enterrées des indiens Salish du Canada.

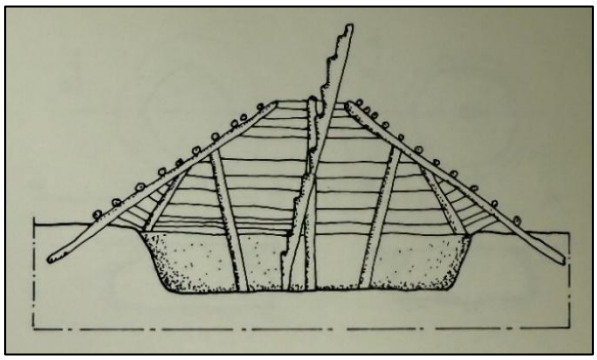


Figure 21 : Hutte enterrée des indiens Salish du Canada.

En l'absence de vestiges issu du paléolithique, ce type d'habitation, étrangère à la Chine, permet de se faire une idée des constructions dont la partie encavée seule nous est connue.

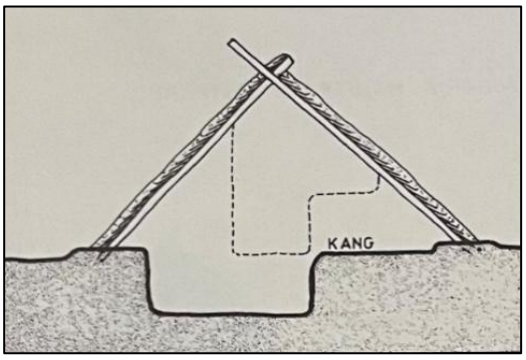


Figure 22 : Habitation de semi-nomade en Mongolie intérieure.

Coupe schématique sur un plan rectangulaire. L'un des deux murs pignons en briques de terre est uniquement percé par l'entrée. Une partie du sol inférieur forme le kang, servant de lit.

En Chine, les plans observés sont en général circulaires; l'entrée fait face au sud, un foyer décentré peut laisser penser qu'il existait un poteau central supportant le toit. Les dimensions

augmentent, environ 4,00 m de diamètre, extension rendue possible par la possibilité technique de faire un toit. Les plans rectangulaires existent également (4 m X 3 m ou 4 m × 5 m).
Le dénivelé entre sol intérieur et sol extérieur n'est plus que de 1m environ.
Des sites néolithiques regroupant une cinquantaine de maisons de ce type ont été découverts dans le Shanxi (village de Banpo) et au Henan.

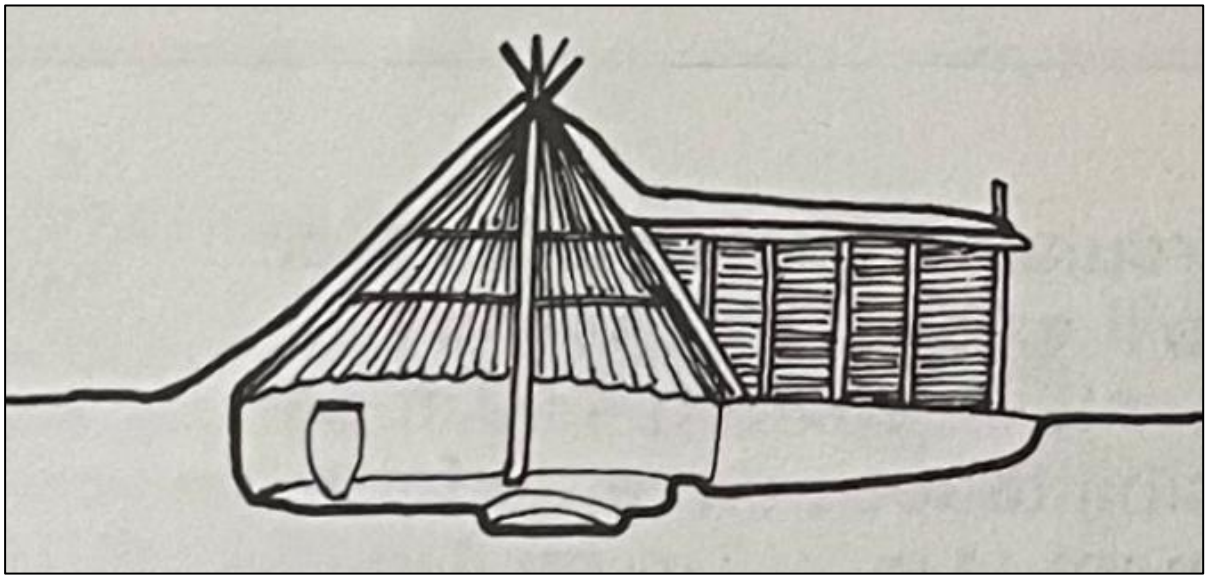


Figure 23 : Chine : Maison du néolithique, reconstruction du site de Banpo.

Ce type de maisons semi-enterrées précède la construction du dernier type d'habitat préhistorique: la maison à armatures de bois construite à la surface du sol. Celle-ci gardera tout de même quelques caractéristiques d'une maison enterrée :
- dénivelé entre sol intérieur et sol extérieur ;
- murs constitués de poteaux serrés prenant appui sur un mur de terre, de 40 cm de haut (apparition de murs en élévation) ;
- la terre provenant de l'excavation va entrer dans la composition des murs (torchis, pisé) et de la toiture (couche de torchis compressé supportée par des chevrons très serrés).

Dans tous les cas, les mêmes avantages liés à l'excavation partielle sont exploités:
- accroissement de la solidité et de l'assise des poteaux;
- utilisation des déblais à deux titres: pour élever un muret au niveau du sol, ou pour constituer la toiture (alliés au gazon ou au feuillage ou sous forme de torchis).

Par ailleurs, ces habitations semi-enterrées de la Chine du néolithique, peuvent être rapprochées d'habitations présentant des caractères similaires, en d'autres régions du globe.

Comme les habitations des civilisations amérindiennes (indiens Pueblos) du Sud-Ouest des Etats-Unis qui s'installèrent vers l'an 1000 entre l'Arizona, l'Utah et le Colorado : leurs kivas cérémonielles et leurs maisons semi-enterrées « pithouse » étaient semi-souterraines ou entièrement souterraines, mais dotées de toits intégrés comme à Pueblo Bonito dans le canyon de Chaco. Celles-ci sont encore préservées dans la parc national de Mesa Verde en Arizona.

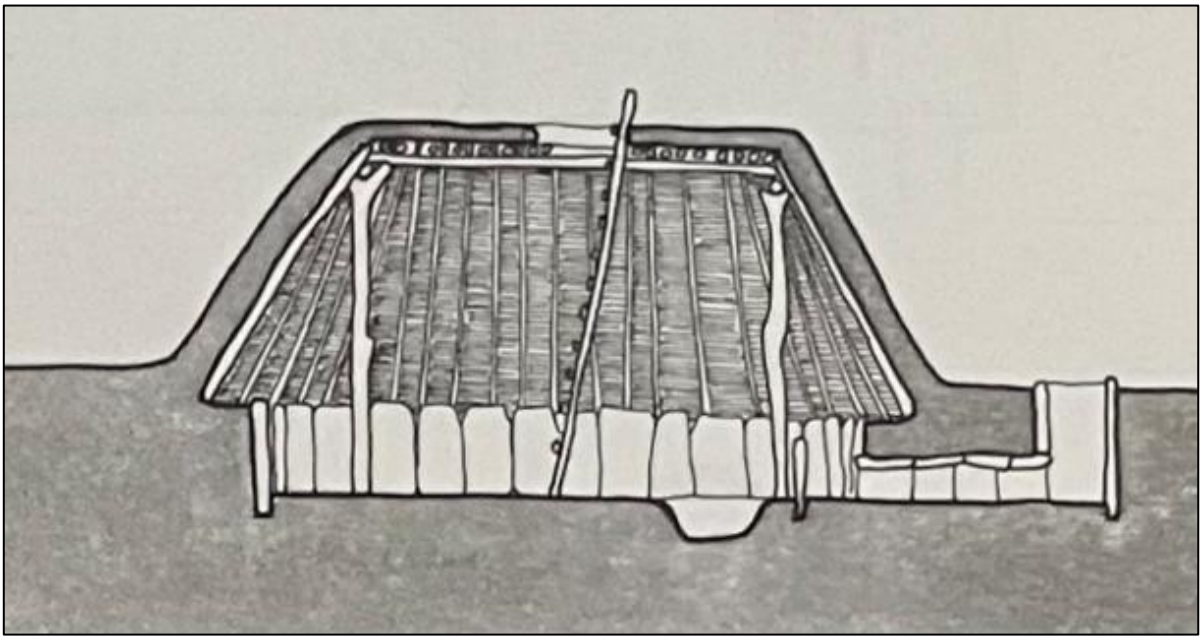


Figure 24 : Shallow pithouse des indiens pueblos (IIIe SIECLE AV J-C). Reconstitution en coupe.

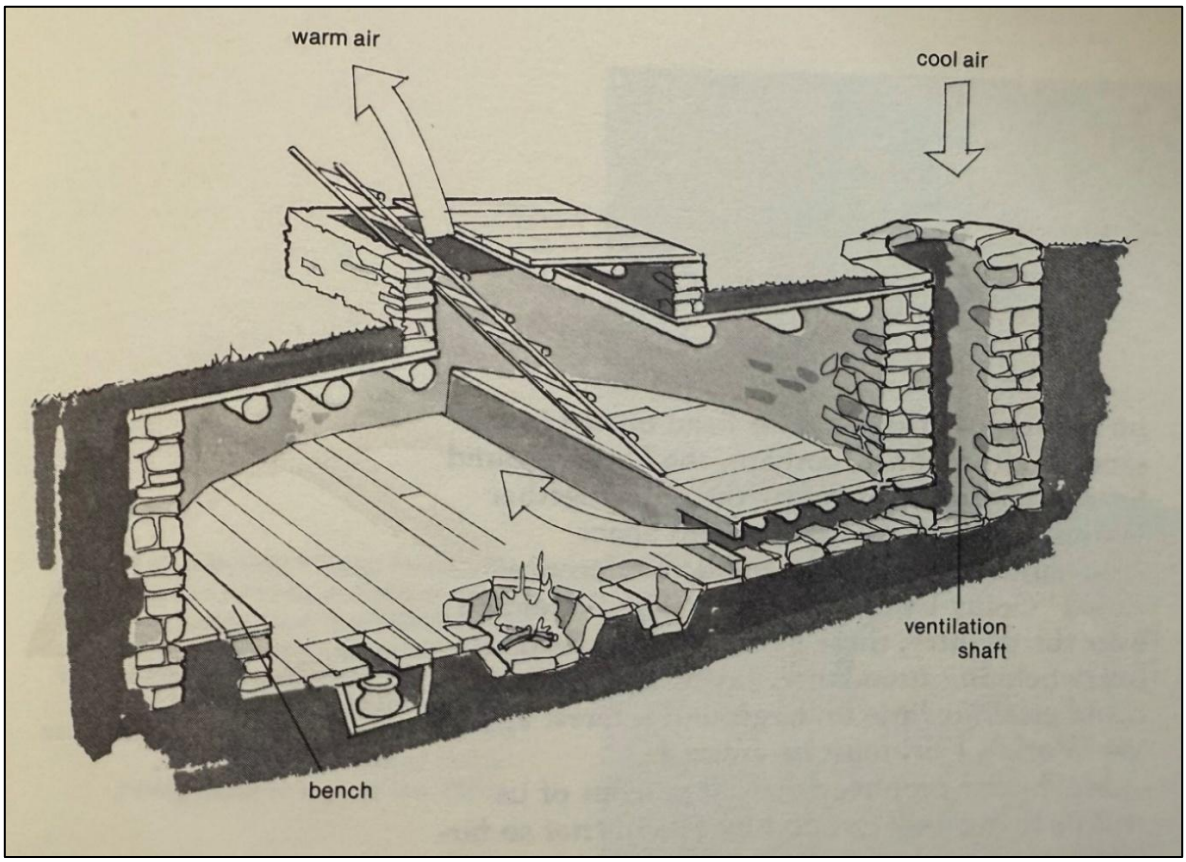


Figure 25 :
Des « kivas » souterraines sont encore préservées dans le parc national de Mesa Verde. Elles constituent le seul témoignage archéologique de la vie souterraine sur le continent nord-américain. À l'origine, elles étaient utilisées à des fins religieuses. Plus tard, leur ingénieux système de ventilation les a rendues habitables

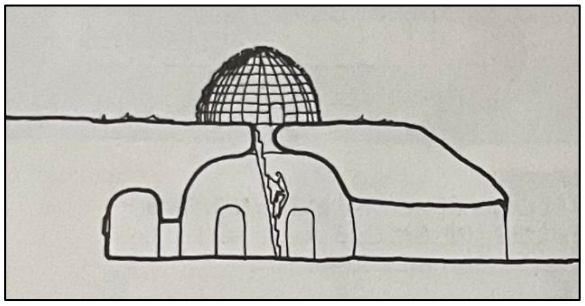


Figure 26 : Afrique du nord : habitation berbère

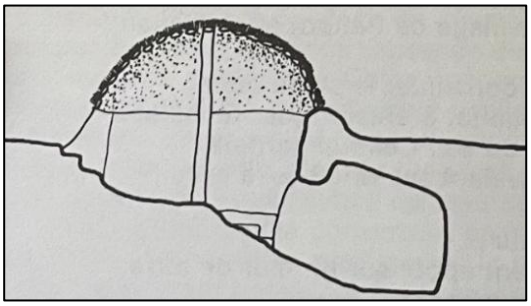


Figure 27 : Tunisie : habitation troglodytique

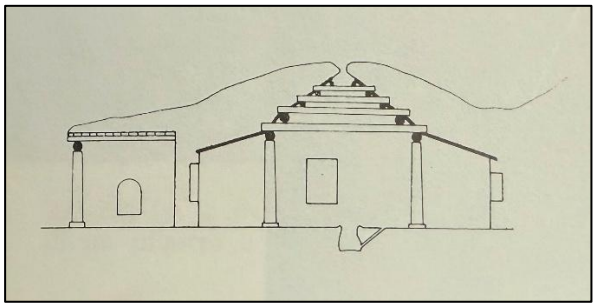


Figure 28 : Armenie : habitation traditionnelle

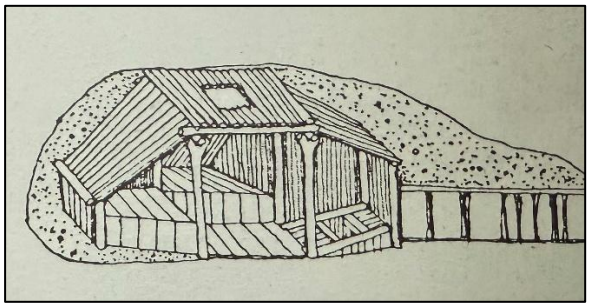


Figure 29 : Habitation d'hiver esquimaude en forme de tertre

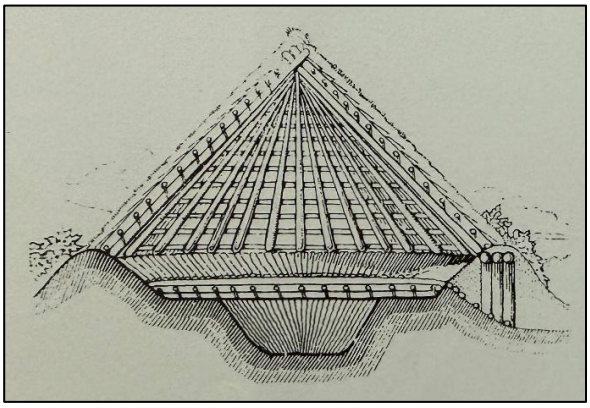


Figure 30 : Hutte colchienne, Asie mineure, selon Vitruve



Figure 31 : Pit house à Mesa verde, (Colorado –Etats-Unis). Reconstitution. Source : The American Southwest

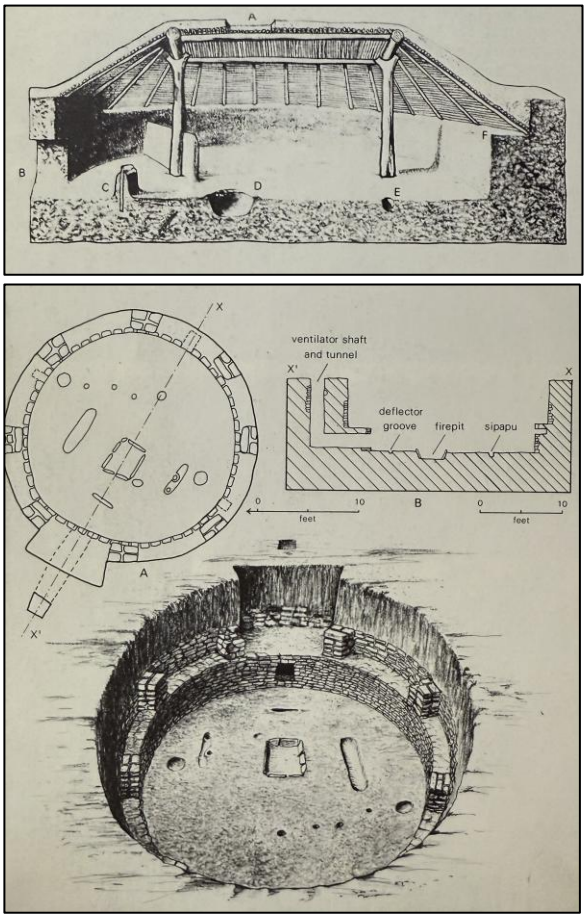


Figure 32 : A.J Lancaster – J.M. Pinkley, Kiva à Mesa Verde, Pueblo II, (Colorado – Etats-unis).

1.1.1.2.3 Les carrières

Les carriers étaient souvent troglodytes et leurs maisons creusées percées à l'aide des outils et techniques d'exploitation de carrière. Parfois aménagés dans l'entrée même des lieux d'extraction, les « troglos » apparaissent généralement avec l'exploitation des richesses géologiques du sous-sol.

Il est normal de constater que l'outillage et les moyens d'éclairage dont disposaient les mineurs du temps jadis, permettaient aux populations de creuser leurs maisons et de s'établir à moindre frais.

L'habitat recherche lumière et air, la carrière, elle, enfonce ses galeries sombres souvent profondément. Les vides résultants d'une exploitation de la pierre sont généralement dépourvus de tout aménagement intérieur. Seules les anciennes carrières réutilisées à des fins industrielles, comme champignonnières ou comme caves à vins peuvent présenter quelques traces d'architectures qui les font parfois confondre avec d'anciens troglodytes.

Les anciennes carrières, de par leur hauteur sous voûte, constituait un volume important pour une habitation. Un plancher était donc mis en place et l'on réservait la partie haute pour le stockage du foin et comme espace de grenier.

Seuls les conflits, les revers économiques et l'attachement aux traditions maintiendront jusqu'à nos jours les quelques milliers de personnes dans leurs « habitats troglodytiques ».

1.1.1.3 Troglodytes latéraux

L'amorce de troglodytes creusés latéralement réduit à la confection d'une niche dans la paroi, s'observe à Dongxiafeng (Shanxi). L'habitat est creusé sur un flanc de ravin, l'entrée orientée au sud, témoignant déjà d'une bonne prise en compte de l'orientation du site. D'une surface de 4 m^2, ces abris ont un foyer près de l'entrée ainsi qu'un conduit de fumée, des niches de rangement dans la paroi, et leur partie supérieure amorce la forme d'un dôme.

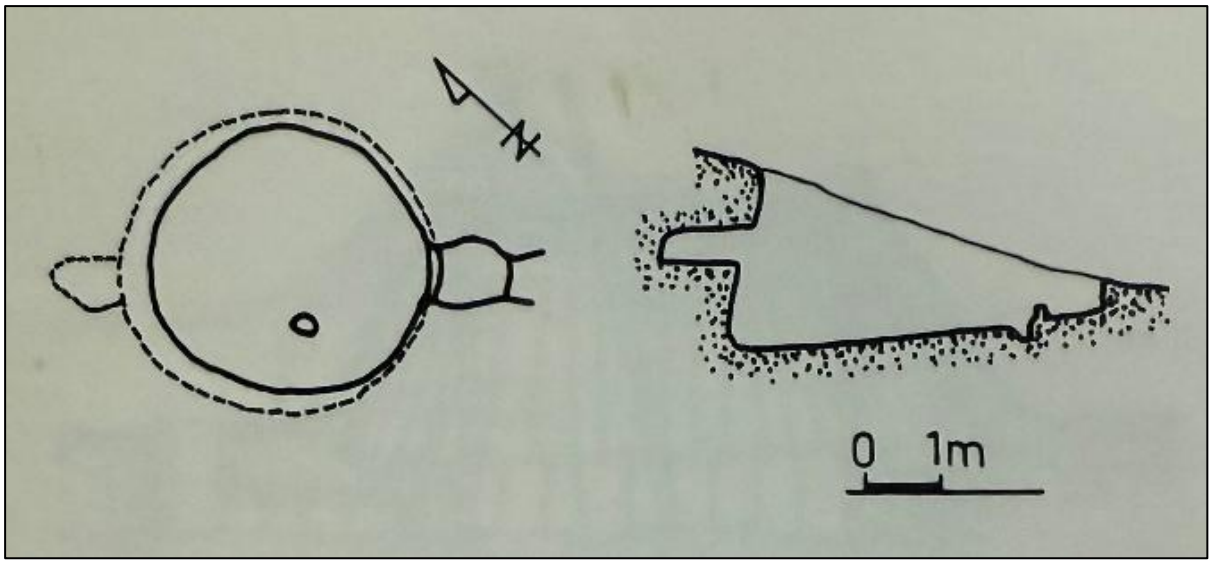


Figure 33 : Vestiges d'habitat avec début de creusement latéral à Dongxiafeng (Shanxi).

La reconstitution d'un habitat à partir de vestiges observés à Changshan (Gansu) montre une forme en poche, mais associée à une charpente soutenant un toit. Le plan se déformant en longueur, ainsi que la pente de terrain, montrent qu'il est aisé de développer à partir de ce modèle un troglodyte latéral.

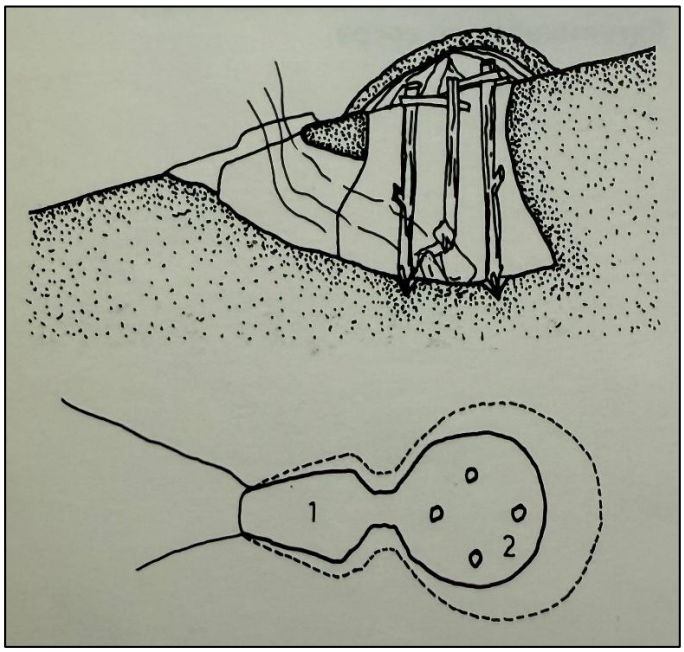


Figure 34 : Reconstitution d'après vestiges d'une habitation creusée en poche à Changshan (Gansu).

1.1.2 Etude de l'architecture et du troglodytisme animale

De nombreuses espèces animales établissent leur habitat dans le sol, en totalité ou partiellement. Les variations de types d'habitats sont nombreuses mais l'habitat animal troglodytique le plus développé et élaboré reste la termitière, édifice complexe, comprenant une partie sous le niveau du sol, une partie au-dessus du sol et des dispositions complexes de régulation climatique.

Dans chaque cas, le « climat souterrain», c'est-à-dire l'addition des propriétés thermo-physiques de la terre, est mis à contribution pour obtenir des conditions climatiques internes plus favorables à l'animal ou au groupe.

1.1.2.1 Généralités sur l'architecture animale

Le matériau utilisé pour édifier leur construction a des provenances diverses.
Il peut être produit par l'animal lui-même qui transforme une matière première.
Parfois l'animal utilise une sécrétion comme liant d'un matériau pris sur place.
Ainsi les termites lient entre elles des petites mottes de terre, à l'aide de leurs excréments et édifient la termitière.

1.1.2.2 Troglodytisme animal

Les animaux construisent eux aussi des habitats troglodytiques. Certains établissent leur habitat totalement dans le sol, d'autres occupent les parties enterrées et les parties au-dessus du sol d'un même habitat. Comme pour l'homme, l'habitat est pour l'animal le moyen de se protéger d'agressions ou de variations brusques du climat extérieur.

Mammifères, oiseaux, insectes, crustacés, sont pourvus « d'outils » adaptés pour élaborer des ouvrages tels que nids, gîtes, terriers, tanières ou galeries dont les plus adaptés passent la majeure partie de leur existence sous terre. Les cavités des rochers ou des arbres servent souvent d'abri naturel aux animaux. Ces logis primaires, presque jamais retouchés, sont rendus plus confortables par un aménagement sommaire constitué d'un empilement de matériaux divers (feuilles, paille ou plumes).

Par exemple, le calao, un oiseau que l'on trouve en Asie et en Afrique, élabore un début d'architecture en obstruant partiellement l'entrée de son nid, au creux d'un arbre sec, avec un peu de boue afin de mieux défendre sa femelle et ses petits contre les prédateurs.

Mais le troglodytisme commence quand l'animal creuse son refuge.
Ces excavations suivent deux axes; horizontal et vertical, tout comme l'architecture humaine.
Les abris s'élaborant selon un axe horizontal suivent souvent un plan très simple : un couloir d'accès donne dans une pièce unique servant, de refuge. Les excavations suivant un axe vertical sont-plus diversifiées.

Ce schéma nous remémore une des premières réalisations de l'homme, lorsque celui-ci creusait une simple fosse qu'il couvrait d'une toiture en branches (maison fosse américaine).
Cette comparaison est encore plus nette avec le «nid de sanglier» que la laie creuse pour mettre bas et abriter ses marcassins: un trou de 1 mètre de diamètre aménagé de branchages recouvert d'une « toiture » constituée par un amoncellement de matériaux.

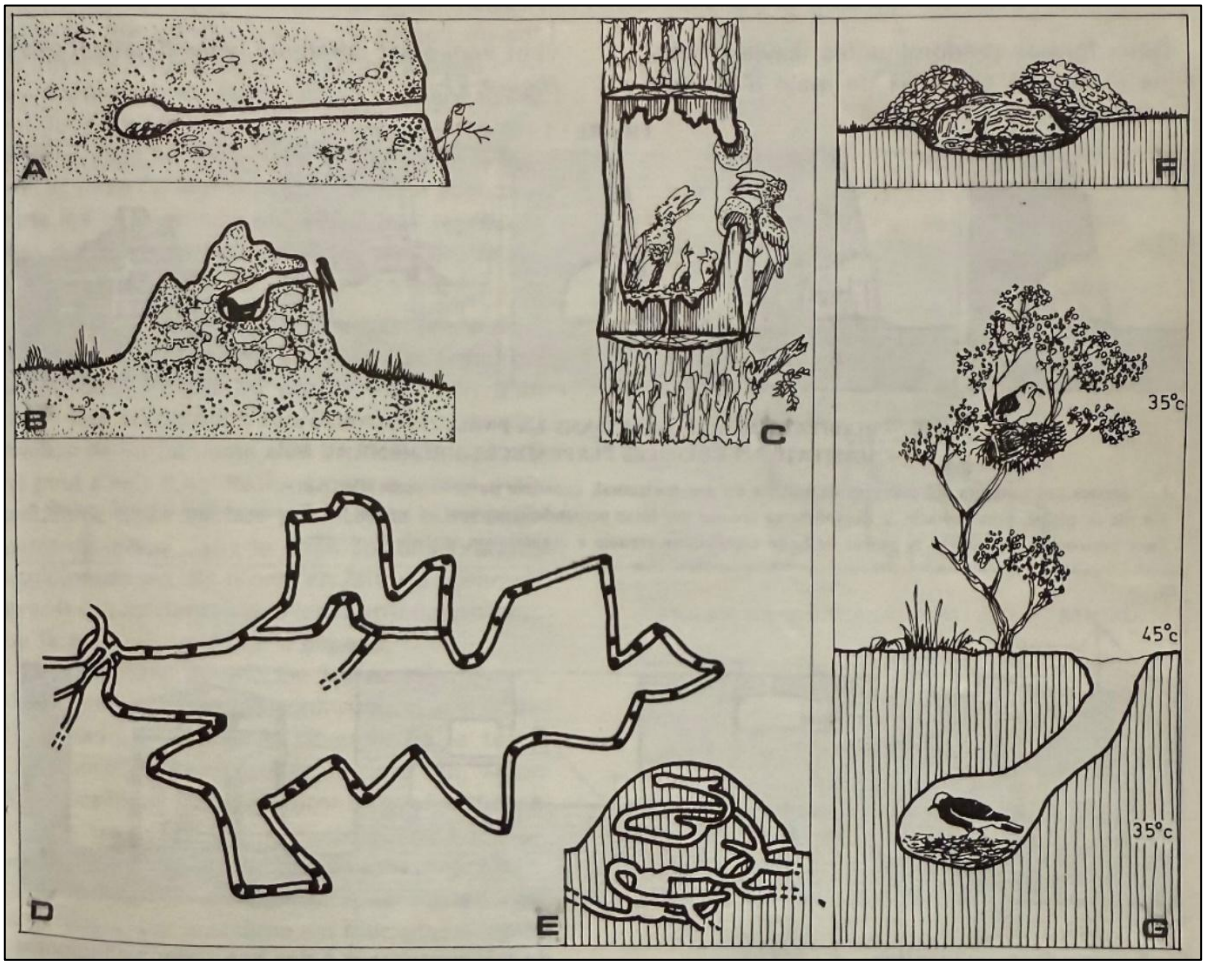


Figure 35 : Selon le site et le climat, nous retrouvons dans l'architecture animale excavée, une variété étonnante de forme et d'organisation qui ne sont pas sans rappeler celles mises en place par les hommes.
- A Coupe sur un nid de guêpier.
- B Loris.
- C Coupe d'un nid de calao. L'entrée est partiellement obturée par de la boue séchée.
- D Schéma de souterrains excavés par une taupe. Les points noirs indiquent les positions de monticules construits.
- E Coupe d'un monticule abritant la caverne d'habitation d'une taupe.
- F « Nid » de marcassins de Im de diamètre creusé par la laie et ensuite recouvert de branchages divers.
- G Afin d'éviter la chaleur élevée, les oiseaux du désert se réfugient dans les terriers abandonnés des rongeurs.

1.1.2.3 Les insectes

Les insectes, malgré leur petite taille, arrivent à créer une vie communautaire, très structurée, qui leur permet d'organiser des villes souterraines. Ils offrent les exemples les plus élaborés d'architectures passives mettant à contribution le sol, soit par creusement, soit par édification de massifs de terre rendus habitables, soit en associant les deux.

Les termites :

Les termites élaborent un nid souterrain composé d'un système irrégulier de couloirs et de chambres où elles conservent leur nourriture.

L'ingéniosité de leur architecture est surtout intéressante a étudié sous l'angle du rapport au climat[1].

L'orientation et la morphologie de la partie érigée en surface constituent des dispositions climatique exemplaires. Ces dispositions permettent d'utiliser le flux solaire au moment de sa plus grande efficacité. Il s'agit d'une régulation thermique passive obtenue par l'orientation et la forme de l'habitation au sol. On observe des migrations journalières des termites dans ce type d'habitat. Les insectes suivent la course du soleil: ils se trouvent à l'est le matin, à l'ouest l'après-midi.

En tant que bâtisseurs, les termites appliquent une mobilité de la termitière dans sa forme. Elle commence les premières années de sa vie par une partie souterraine puis peu à peu, sortant du sol, une coupole apparaît, simple soulèvement au début, dôme ensuite, pour se transformer en un tertre qui peut atteindre 1,60 m dans sa forme finale.

Au sein de la termitière du *Macroterme bellicosus,* on peut observer deux types de solutions de climatisation: par recyclage d'air vicié, ou par renouvellement d'air. Grâce à ces exemples, on s'aperçoit de la qualité des propriétés constructives et thermiques de la « terre » qui sont exploitées parfaitement.

1. Karl von Frisch, op. cit.

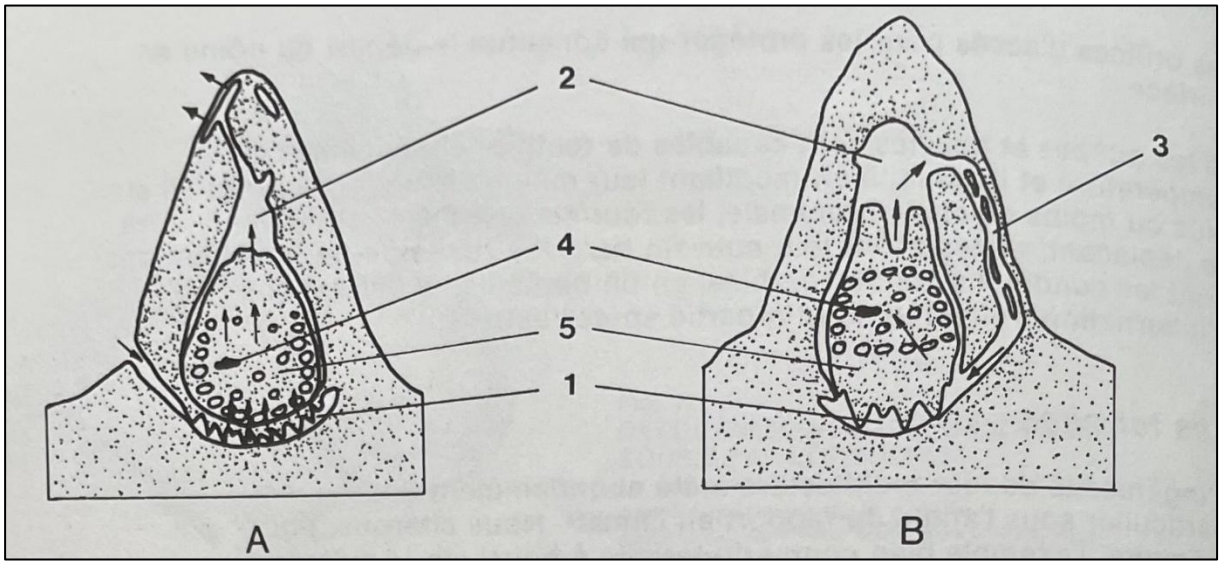


Figure 36 : Fonctionnement de la termitière du Macroterme bellicosus.

A – Renouvellement d'air :

Un conduit (1) introduit l'air neuf qui, par production de chaleur dans la partie habitée, s'élève dans la partie supérieure de la termitière (2) puis latéralement (3) où il est évacué par porosité de la paroi, par une sorte de cheminée d'air chaud.

B – Recyclage :

L'élévation de la température produite dans les profondeurs de la termitière (1) par la colonie (chaleur animale) provoque la montée de l'air dans la partie supérieure de la termitière (2).
L'air se libère du gaz carbonique latéralement (3) et se réoxygène par la porosité des conduits. Il se rafraîchit également, donc descend par densité, arrive régénéré au niveau des parties habités de la termitière (4) et est à nouveau est admis dans les profondeurs de la termitière (1). Il n'y a pas d'arrivée d'air neuf. Les cônes supports de la partie habitée (5) isolent celle-ci des remontées d'humidité possibles par le sol.

Les techniques de construction :

Transport de matériaux :

Le creusement des parties souterraines fournit le matériau pour la construction en surface.

Modification des propriétés du matériau:

Les termites savent augmenter les qualités de cohésion et de résistance pour constituer par exemple le blindage de la surface extérieure de la termitière rendant la destruction par la pluie ou par d'autres animaux plus difficile. Le cœur de la construction, lui, reste meuble.

Modification de la texture :

Les termites utilisent leurs excréments comme liants et les façonnent tant qu'ils sont à l'état plastique, collant ainsi les grains de sable, les mottes de terre en des configurations variables. Cela leur permet d'obtenir des textures poreuses (circulation et échange d'air frais avec l'extérieur) ou plus étanches et dures (blindage extérieur) et leur sert à enduire certains conduits.

Propriétés thermiques :

La structure cellulaire donnée à la termitière par le travail des insectes lui confère des propriétés isolantes. Dans les régions de forte amplitude thermique, allant de 70° au soleil à 10° la nuit, la partie où vit la colonie est maintenue à 30°[2]. Dans de nombreux cas de termitière, la coupe fait apparaître des zones concentriques évidées, matelas d'air supplémentaires isolant les parties internes. Les parois de la termitière peuvent avoir une épaisseur de l'ordre de 50 cm, constituant un isolant conséquent. Cette épaisseur semble d'ailleurs correspondre à celle qui permet l'inversion des régimes thermiques intérieurs et extérieurs. Ainsi, la termitière des *Macrotermes bellicosus* constitue la mise en œuvre d'une architecture climatique passive exploitant de façon très évoluée les propriétés thermo-physiques de la terre.

Hygrométrie - Approvisionnement en eau :

Construire dans le sol permet également d'avoir accès aux couches profondes et humides procurant l'eau pour divers besoins de la colonie. Le taux d'humidité relative de l'air, dans les ouvrages des *Macrotermes,* se situe aux alentours de 90%, taux nécessaire à la vie de l'espèce. Par ailleurs l'eau est également nécessaire pour l'alimentation et la fabrication des mortiers.

Les souci essentiel des animaux est de se protéger et l'homme fut confronté aux mêmes difficultés. Aussi, existe-t-il une certaine similitude de formes entre leurs réalisations.

Les architectures animales ont probablement influencé l'homme primitif qui vivaient en étroite communion avec la nature.

En effet, le premier chasseur s'aperçut que pour lui échapper, l'animal disparaissait dans une anfractuosité et que le jour, pendant les longues heures d'ensoleillement intense, le gibier était profondément enfouit dans le sol du désert.

2. Ch. Chauliaguet, L'énergie solaire dans le bâtiment, Paris, Ed. Eyrolles, 1978.

1.1.3 Les différentes typologies et morphologie des formes d'habitats troglodytiques

Depuis le simple aménagement d'un site naturel, jusqu'à la création d'un relief incluant un habitat troglodytique entièrement construit par l'homme, il y a une grande variété de réponses apportées à cette association homme-nature.

Deux formes prédominantes, cavités naturelles et cavités creusées vont engendrer différents types d'habitations.

Les grottes ont toujours été excavées en suivant un axe horizontal, dans une paroi verticale. En site de plaine, sans obstacle, le troglodyte va creuser une fosse perpendiculairement au sol.

1.1.3.1 Architecture de détournement de sites et cavités naturelles

1) Les cavernes et cavités naturelles : Toutes les érosions de la roche ont su être profitables aux premiers hommes qui les aménagèrent. L'aménagement ne consiste la plupart du temps qu'en la localisation d'un foyer.

2) L'abri sous roche : il peut être fermé ou non par une paroi construite.

3) Maisons entre rochers : le village de Monsanto au Portugal est un cas d'urbanisation à partir d'éléments granitique, fait de mégalithes aux formes arrondies. Ils servent d'élément d'accroche aux habitations mais aussi aux chemins et voies de distribution du village et en exploitent la topographie.

4) Maisons adossées : c'est parfois un village entier qui tire parti de la protection d'une muraille naturelle pour s'abriter (protection climatique) ou s'appuyer (disposition constructive) comme aux Eyzies où d'immenses parois rocheuses surplombent les habitations accolées au pied de la falaise.

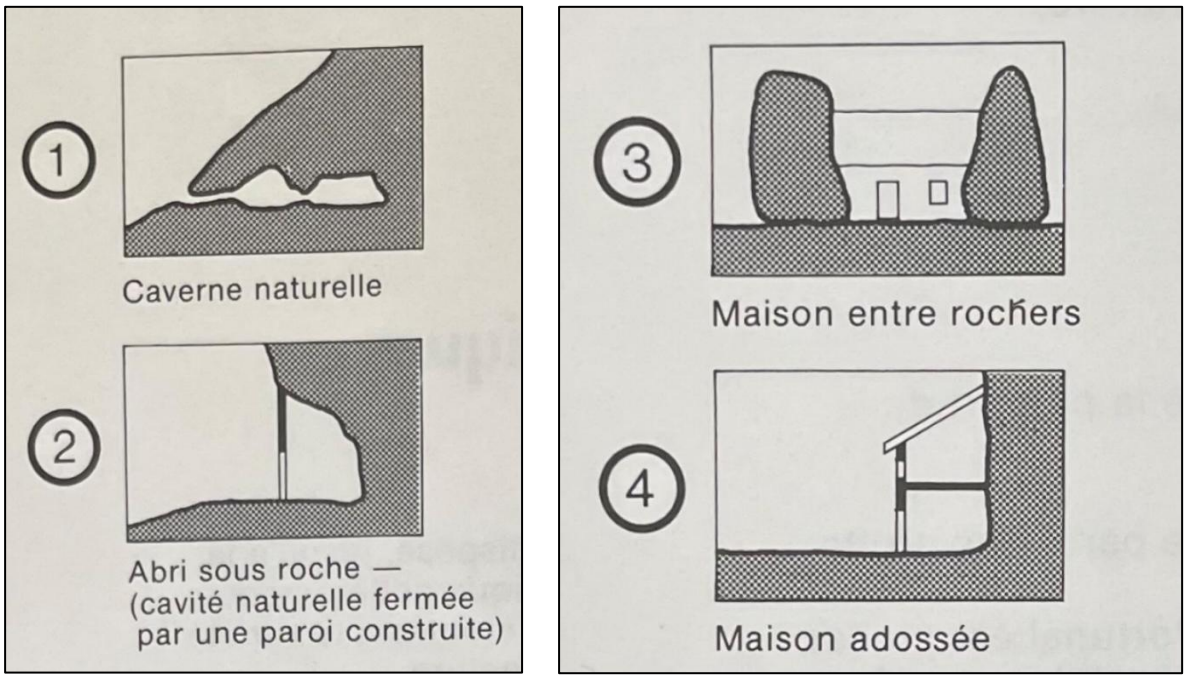


Figure 37 : Typologie des formes troglodytiques - Architecture de détournement de configurations naturelles

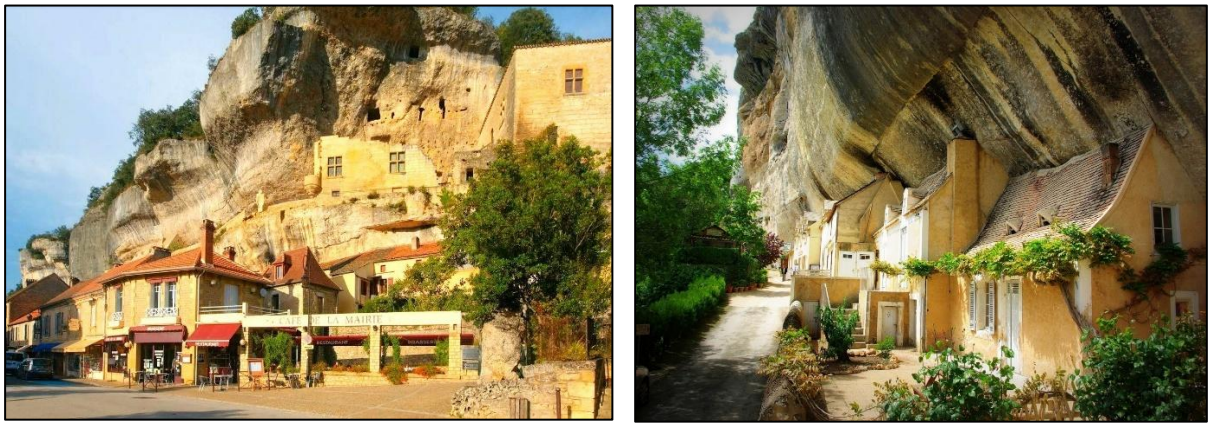


Figure 38 : Abris sous roche aménagés, Les Eyzies (Dordogne). Source : https://www.atg-oxford.co.uk/

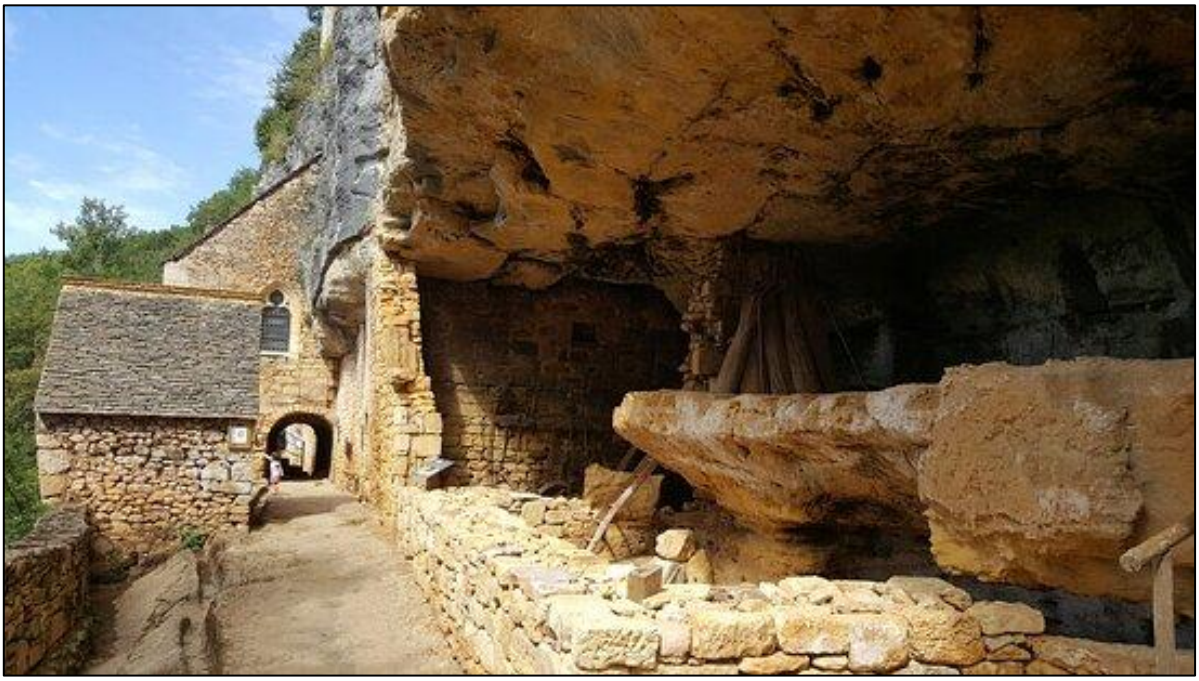


Figure 39 : A la Madeleine près de Eyzies, les abris sous roche qui servaient d'abri défensif à l'homme préhistorique permettent de se rendre compte de la longue occupation des lieux. Source : francebleu.fr

A la Madeleine, ce ne sont plus des abris sous roche, mais de véritables habitations troglodytiques, creusées dans la roche, aux façades appareillées.

Pour agrandir et améliorer le confort des cavités naturelles, l'homme commença à tailler la roche.

1.1.3.2 Architecture soustractives

Les volumes habitables sont ici obtenus par enlèvement de matériaux. On ne se contente pas d'exploiter ou de compléter une configuration naturelle, on en crée de nouvelles.

Cette activité de creusement se développe selon trois types, en fonction de la direction du creusement:

Creusement de formations situées au-dessus du sol :

Il s'agit, non pas comme à Monsanto de situer l'habitation entre deux mégalithes en les prenant comme parois et points d'appui d'une partie construite, mais de creuser l'intérieur du rocher lui-même. Cela suppose une roche suffisamment tendre pour être attaquée par un outil. Les cônes de Cappadoce (Turquie), façonnés par l'érosion, illustrent cette technique.

Creusement des parois latérales :

Le creusement se développe dans une direction horizontale attaquant le front d'une falaise. C'est la démarche la plus répandue, tant dans le domaine de l'habitation que dans de nombreux cas d'architecture religieuse ou funéraire (Egypte, Inde).

Creusement vertical dans le sol :

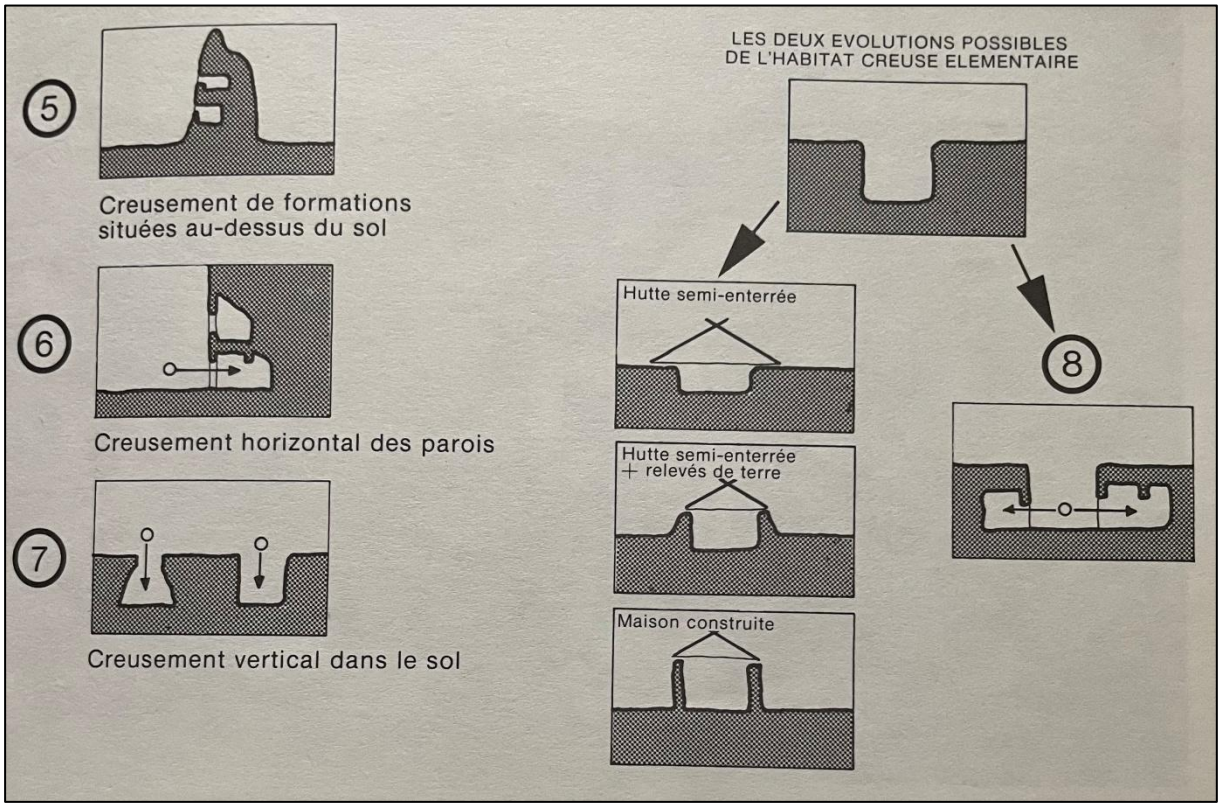
Ce type de démarche s'observe dans certains habitats préhistoriques en Chine, se prolongeant par le très important habitat contemporain enterré de Henan et de Shensi, qui devient le point de départ d'une double évolution.

Evolution 1 :

La maison sort du sol progressivement au fur et à mesure qu'apparaissent les matériaux et le savoir-faire permettant la construction en surface.

Evolution 2 :

La maison reste enterrée et évolue vers la complexité, perfectionnant cette architecture souterraine jusqu'à la production d'un urbanisme enterré (Chine, Tunisie).



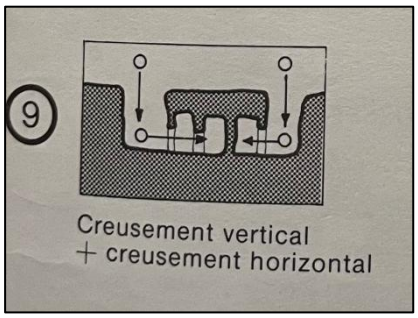


Figure 40 : Typologie des formes troglodytiques - architectures soustractives

Cet état (schéma 8 de la Fig. 21) est le résultat du croisement des démarches 6 et 7.
Un autre résultat de ce croisement consiste à isoler un monolithe en creusant le sol autour de lui.
Ce monolithe est ensuite attaqué comme en 7 et donne le cas représente par le schéma 9 (Fig. 21).

1.1.3.3 Architecture de remblaiement

Pour cette technique, il n'y a pas de creusement mais au contraire, un apport de matériaux (terre) pour modifier le relief. Il s'agit en fait de la création d'un microrelief devant inclure la construction. Les architectures anciennes résultant de ce type de constructions sont essentiellement les sépultures. Les tumulus sont surtout érigés par apport de terre, les pyramides et mastabas par une maçonnerie de pierres, briques crues ou cuites.
Beaucoup de maisons solaires passives semi-enterrées procèdent de cette technique.

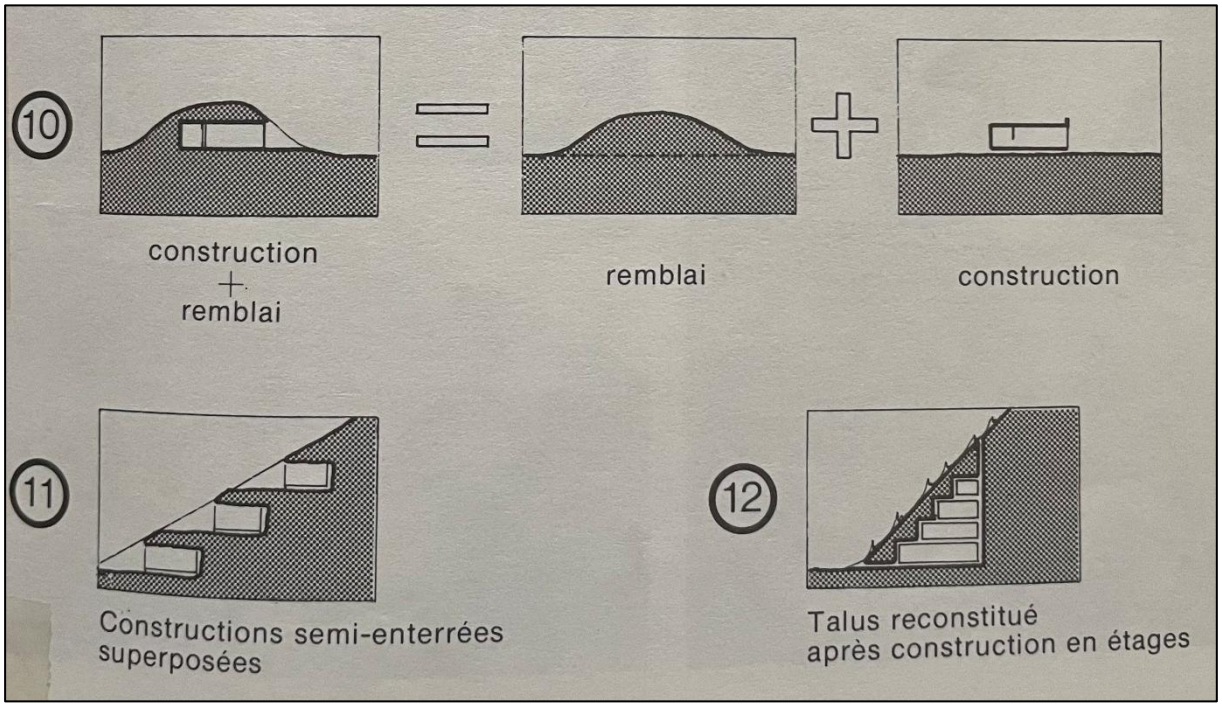


Figure 41 : Typologie des formes troglodytiques - Architectures de remblaiement

1.1.3.4 Solutions mixtes et intermédiaires

Dans le troglodytisme contemporain apparaissent des solutions induites par les techniques modernes de construction: possibilité d'excaver le sol avec des moyens mécaniques importants; possibilité de transporter des grandes quantités de remblais; techniques de fixation des remblais par divers systèmes de soutènement, issus soit des applications du béton armé, soit des techniques de stabilisation de la terre empruntées au domaine des travaux publics.

1.1.4 Morphologie des habitats troglodytiques

1.1.4.1 Organisation des espaces

On distingue deux grandes caractéristiques :

1) En site de falaise et de colline si l'habitat possède plus d'une pièce, les espaces se trouveront répartis soit de part et d'autre de la pièce principale, soit en enfilade les uns par rapport aux autres.

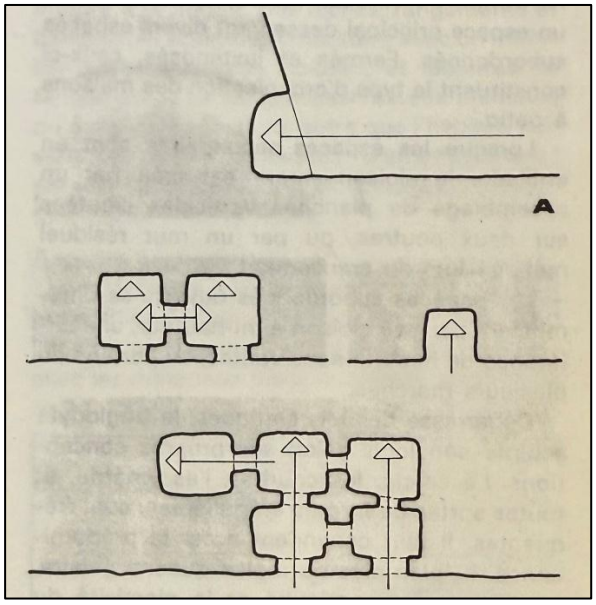


Figure 42- A : Techniques d'excavations : axe horizontal. Répartition des espaces par rapport à la paroi rocheuse et progression du creusement.

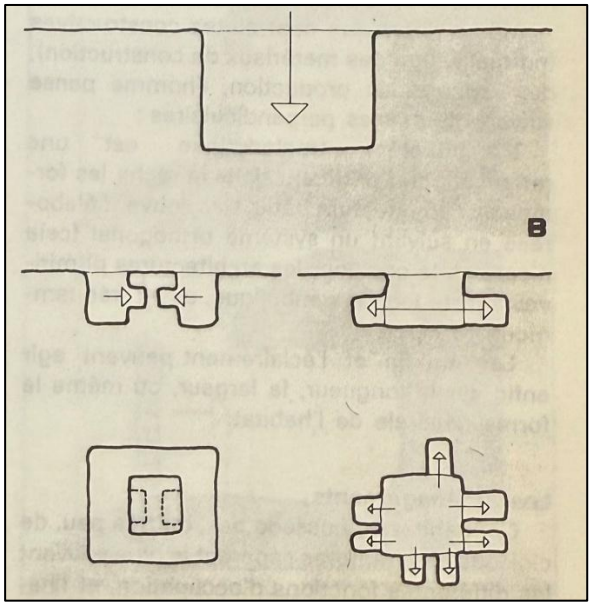


Figure 42 – B : Excavations : Axes vertical.

Une autre organisation consiste à excaver une seule pièce aménagée de plusieurs alcôves, créées pour des fonctions bien définies : dormir, travailler et ranger. La pièce principale sera celle où l'on prend ses repas et le lieu de réunion.

2) En site de plaine, les réalisations sont élaborées en creusant une fosse reliée au niveau du sol naturel par un couloir en pente douce. Autour du patio ou du couloir se répartissent les différentes pièces en suivant le même schéma d'organisation que ceux des sites de falaises.

Lorsque les espaces secondaires sont en enfilade, le cloisonnement est créé par un assemblage de planches verticales cloutées sur deux poutres, ou par un mur résiduel ménagé lors du creusement.

Les espaces subordonnés ouverts se différencient par une cloison à mi-hauteur, une différence de hauteur sous voûtes, ou par une ou plusieurs marches.

Le troglodyte sculpte son logis selon ses propres convictions. Le cercle, les courbes, l'asymétrie, et toutes sortes de formes irrégulières y sont fréquentes. Il faut cependant noter la prédominance du plan plus ou moins quadrangulaire.

La lumière et l'éclairement peuvent agir enfin sur la longueur, la largeur, ou même la forme générale de l'habitat.

1.1.4.2 Les aménagements

L'habitat troglodytique ne possède pas, ou très peu, de cloisons. Des tentures séparent le plus souvent les différentes fonctions d'occupation. Par contre, quand les pièces sont réparties le long d'une paroi rocheuse, elles sont cloisonnées les unes par rapport aux autres.
Les plafonds, traités en voûte non appareillée, possèdent de nombreuses formes : plein cintre, arc brisé ou angulaire, anse de panier, et coupole. Les hauteurs varient suivant la qualité de la roche, de trois à cinq mètres.

Des pavés de terre cuite peuvent se rencontrer dans les salles principales.
Les étables ou dépendances possèdent un sol brut. Quand ces habitations se superposent pour former un ensemble à plusieurs étages, le plancher est taillé dans la masse (figure 9 B).
A l'intérieur d'un même espace, on édifie, après creusement de la pièce, un plancher traditionnel mis en place par un système de poutres et de solives en bois, s'encastrant dans les murs parallèles ou s'appuyant sur des corbeaux (figure 9 C).

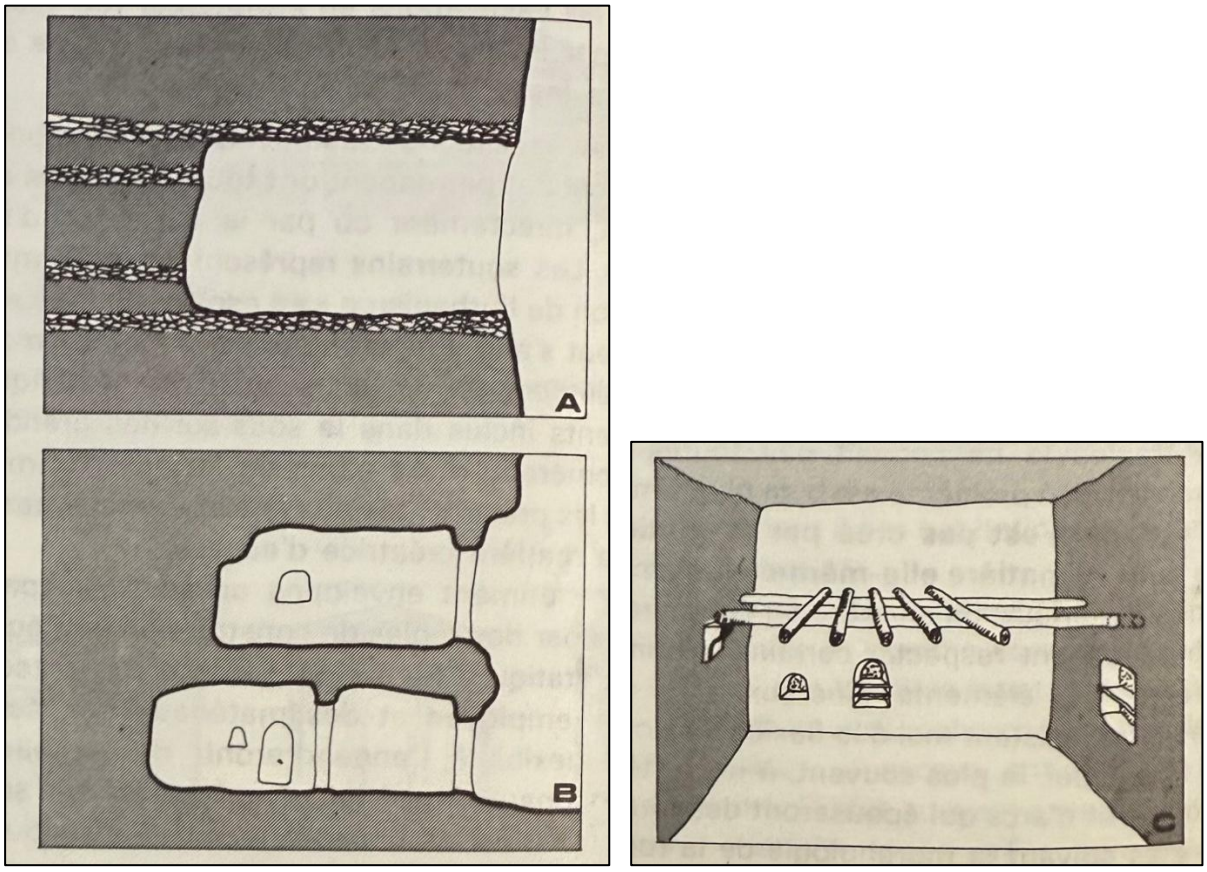


Figure 43 :

A – Utilisation des strates dures tels que des bancs de silex
B – Création d'un niveau dans la masse de la roche
C – Plancher sur poutre encastrée ou corbeau

La création de niveaux correspond à une organisation planifiée de séparation de plusieurs fonctions.

L'accès au troglodyte se fait généralement par le niveau bas, espace de travail, et le deuxième niveau abrite la pièce d'habitation. Les escaliers sont droits et de pente très prononcée.
Ils sont taillés entièrement dans la roche ou composés de marches de bois rapportées sur un mur d'échiffre monolithe. L'escalier se positionne à l'extérieur et dessert les différents niveaux. A l'intérieur, une échelle de bois tient lieu de liaison verticale. Dans les maisons de falaises, nous trouvons des échelles taillées à même la roche,

Les plans obliques servent uniquement à desservir les maisons à patio (figure 10A) ou les différents niveaux des villes souterraines (Kaymakli-Turquie).

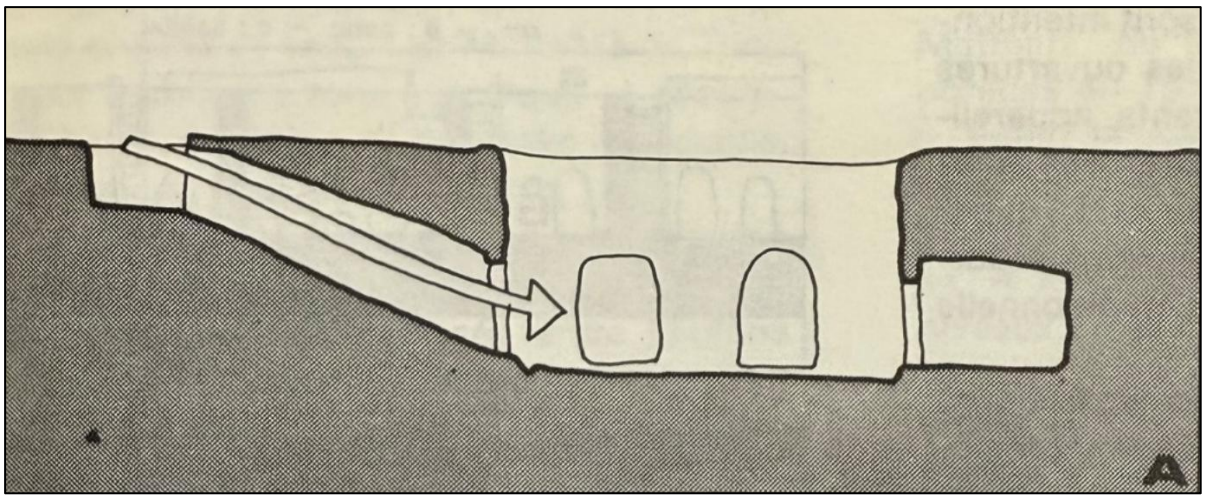


Figure 44 : Liaison entre niveaux pour un habitat creusé en Chine

Le mobilier est totalement ou partiellement intégré à la masse. Des niches, rangements et banquettes sculptées coexistent avec un mobilier en bois : tables, chaises, et tablettes de rangement. Les locaux réservés aux animaux, ou à diverses fonctions autre que l'habitat, suivent le même processus d'aménagement : abreuvoirs, mangeoires, et anneaux d'attache font corps avec la roche.

1.1.4.3 Aspects extérieurs

Les façades sont soit monolithes (taillées entièrement) soit appareillées : l'habitat est excavé et la façade construite avec les matériaux issus du déblaiement.

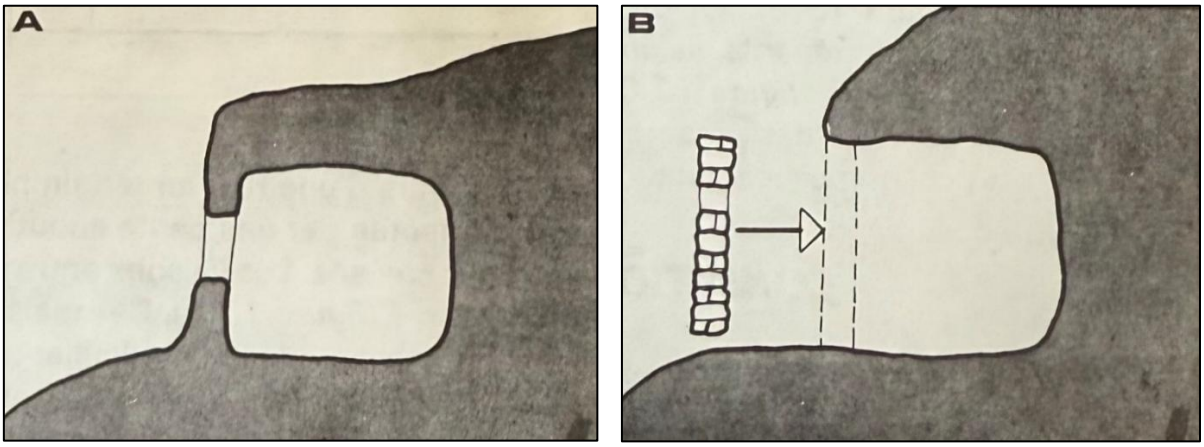


Figure 45 : A – Façade monolithe ; B – Façade Appareillée.

Des sillons surplombant les ouvertures servent de gouttière et des auvents, appareillés ou naturels, protègent la façade. Les ouvertures pratiquées dans la roche, ou dans l'appareillage offrent les mêmes dimensions et formes que celles de l'architecture traditionnelle.

Dans les falaises, les habitations s'échelonnent linéairement, parfois sur plusieurs niveaux reliés par des escaliers ou des sentiers.

Sur le parcours d'une rue, en terrain plat, la transition s'effectue par une pente aboutissant dans une cour creusée. Les liaisons entre cours ne sont pas rares.

En Chine, il existe des groupements répartis selon une trame orthogonale régulière.
Ici, le sol naturel est le domaine des espaces verts et le sous-sol est occupé par les habitations.

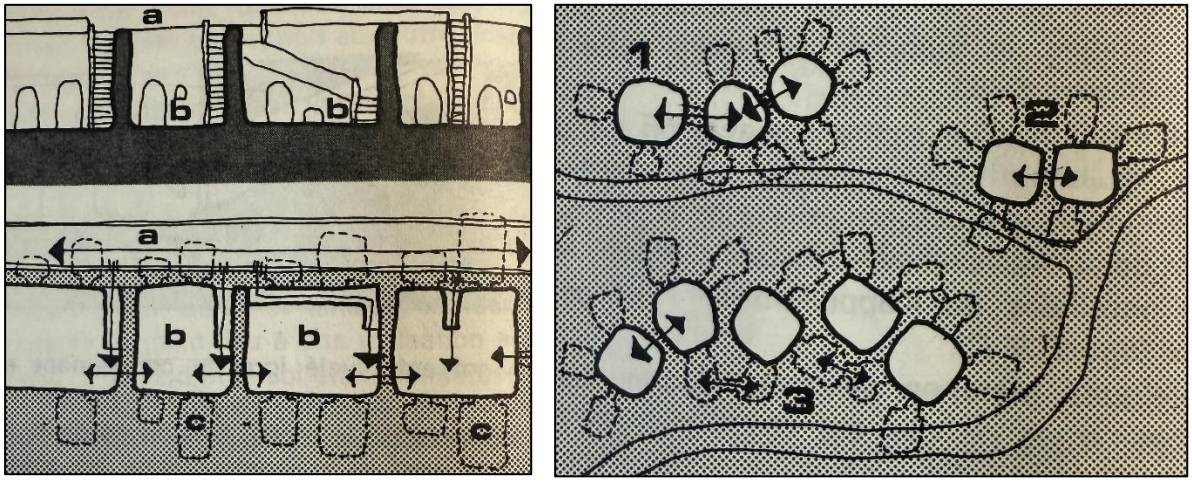


Figure 46 :

A. Autour d'un patio, liaisons entre cours.

a) rue ; b) patio ; c) habitat

B. Groupements d'habitations troglodytiques reliés par des passages souterrains.

1.1.4.4 Conditions d'établissement

Divers paramètres viennent se greffer à la nature géologique du sous-sol, pour la localisation des habitats creusés. Selon les méandres des fleuves et rivières, les coteaux se feront plus ou moins escarpés, se relevant en falaises abruptes ou en terrasses douces.

Les zones climatiques et la nature du sous-sol seront les principales caractéristiques des zones d'établissement des troglodytes.

L'examen d'une carte climatique montre que, dans la grande majorité des cas, les sites troglodytiques se trouvent confrontés à des climats chauds et secs. Les Matmata de Tunisie sont établis en zone steppique et désertique. Shensi, en Chine, et Kaymakli en Turquie, partagent ces mêmes conditions.

Ces conditions climatiques déterminent un type de végétation steppique ou de savane sèche, caractérisé par des buissons d'épineux de faible hauteur, quelques bosquets d'oliviers et des palmiers dattiers, essences impropres à la construction.

L'architecture civile trouve donc sous terre une protection efficace contre le soleil et les trop grandes différences thermiques entre le jour et la nuit. On se protège de la chaleur du jour et la nuit, généralement froide, est tempérée par le rocher ou la terre. Ces éléments diffusent la chaleur emmagasinée pendant la journée.

Pour les constructions civiles, le sous-sol est dans tous les cas tendre et facile à excaver : que ce soit du lœss, comme à Shensi et Matmata; du tuf à Kaymakli; ou de la lave poreuse en Turquie.

Enfin, le choix d'un habitat troglodytique peut être plus simplement d'ordre social.
En Turquie, l'objectif principal des habitats enterrés est la défense. En effet, à Kaymakli, la ville souterraine aux huit niveaux, des milliers d'habitants pouvaient vivre à l'abri des incursions ennemies. Des systèmes de blocage des accès (roues de pierre) attestent ce côté défensif.

Les Pueblos des falaises américaines sont, par contre, de simples villes construites, mises à l'abri des pillards, voilées dans les anfractuosités naturelles. Cette architecture procure non seulement une protection physique, mais aussi psychologique.

Enfin, il est parfois plus facile et plus économique d'excaver que d'élever une construction.
En Chine, le transport des matériaux et leur prix de revient était exorbitant.

1.1.5 L'histoire de l'urbanisation troglodytique

Arguant de critères totalement subjectifs, les spécialistes et les historiens continuent de considérer les habitats troglodytiques comme une aberration architecturale, un pis-aller destiné à une population pauvre et obligée par des conditions économiques ou politiques de recourir à ce type d'habitat. Loin de constituer l'apanage de la seule population miséreuse, nous l'avons vu, le troglodytisme semble au contraire le plus souvent être le fruit d'une intelligence du sous-sol, perpétuée et développée au fil des générations.

1.1.5.1 Les troglodytes refuges, une fonction défensive et stratégique

Les avantages défensifs du troglodytisme et des sites creusés à flanc de coteau ou de falaise jouent évidemment un très important rôle dans le choix de l'emplacement de nombreux villages excavés. Combien de lieux-dits et de seigneuries, parfois d'importance, ont intégré dans leur toponymie locale le souvenir d'une « Roche » fortifiée.

Durant les périodes d'invasions, la solution souterraine offrait de nombreux avantages.
La situation naturelle au sein du relief offrait, dans un premier temps, un accès difficile et une position enviable pour les guetteurs. La discrétion offerte par des structures creusées possédant peu d'ouvertures était parfois presque parfaite. Enfin un dernier avantage résidait en l'impossibilité pour l'ennemi de mettre le feu, comme il était d'usage au cours des conflits des époques reculées, aux caves taillées dans la masse. De nombreuses localités se sont nichées de la même façon dans la roche.

1.1.5.2 Troglodytisme et fonction économique

Cette mise à profit des vides engendrés et des techniques de creusement offrait aux carriers plusieurs avantages. Le premier d'entre eux était celui de l'économie. L'exploitant d'une carrière évitait de nombreuses dépenses obligatoires liées à la construction d'une maison bâtie.
Le recours aux charpentiers et aux couvreurs, souvent très onéreux puisque spécialisés, était économisé. De même, et ceci est particulièrement valable pour la période médiévale durant laquelle une famille se contentait souvent d'un unique coffre de rangement et d'un plateau pour table, l'économie de meubles et de rangements en bois était rendue possible par leur aménagement en pleine masse.

Sans parler des conditions isothermes particulièrement bonnes inhérentes aux habitats troglodytiques, le paysan trouvait dans l'exploitation de la pierre une occasion d'agrandir la surface couverte de sa ferme.

1.1.6 L'urbanisme troglodytique : typologie des groupements

La variété des groupements témoigne de la faculté d'adaptation de l'architecture troglodytique aux conditions de sol, de topographie et de climat. Il semble d'ailleurs que ce soient les potentialités d'un site qui dictent le mode de groupement observé, plus que la fonction des édifices eux-mêmes: habitations, ouvrages de défense ou lieux de culte.

1.1.6.1 Groupements linéaires : les cavités naturelles aménagées : les villages à parois

Les villages des ksours tunisiens se développent sur des versants plus ou moins inclinés. C'est le cas également pour certains villages troglodytiques en Andalousie comme à Cuevas de Almanzora en Espagne ou la vallée de Zelve en Cappadoce (Turquie). Le développement est linéaire et les habitations comportent des pièces de 1, 2 ou 3 niveaux qui sont reliées par des cheminements extérieurs.



Figure 47 : Cuevas del Almanzora (Andalousie). Quartier troglodytique.



Figure 48 : Zelve, Cappadoce
Source : https://www.onegirlwholeworld.com/

En France, les vallées de la Loire, de la Vienne et de la Seine sont riches d'agglomérations troglodytiques de ce type. En Gironde, dans la région de Bourg, dont les terrasses calcaires accueillaient dès l'âge de la pierre un habitat préhistorique (caverne du Pair-Non-Pair), des villages-parois exceptionnellement bien orientés bénéficient d'un microclimat particulier.



Figure 49 : Village paroi de Gauriac, Région de Bourg-sur-Gironde (France). Source : https://www.outdooractive.com/



Figure 50 : Falaise de Saint-Chamas (Provence) dont les grottes jouissent d'une vue et d'une exposition incomparables.

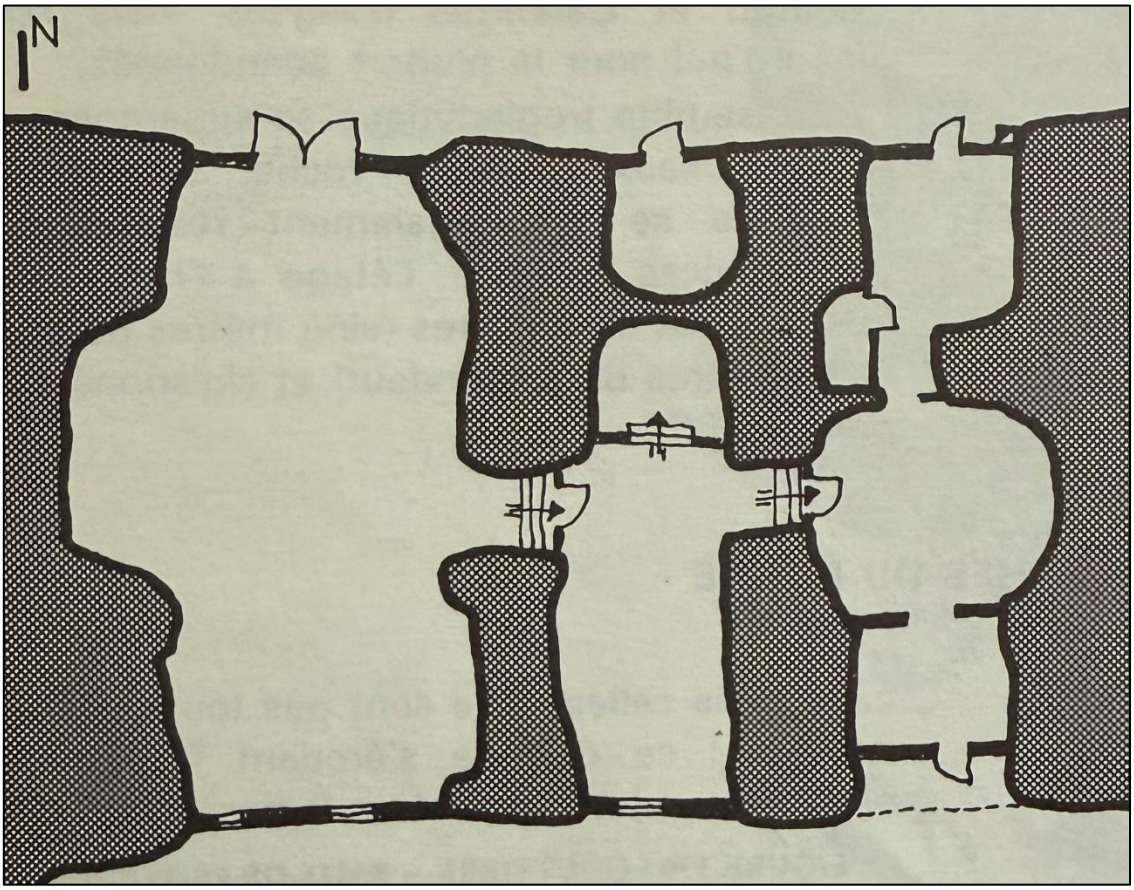


Figure 51 : Plan d'habitation troglodytique a Saint-Chamas.

Par exemple, au sud de Royan, juste en face de la pointe de Grave, se niche dans les creux de la côte escarpée, l'un des plus fantastiques sites troglodytiques de France : Meschers-les-Bains.

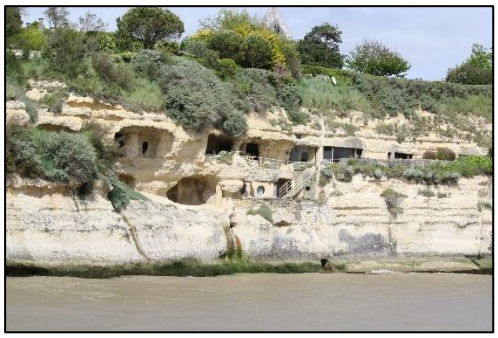




Figure 52 : Habitations dans la falaise - Meschers (Gironde-France). Source : https://fr.pinterest.com/
Les maisons creusées sont maintenant de luxueuses résidences secondaires face à l'estuaire de la Gironde.

La falaise, haute d'une trentaine de mètres, tombe en à pic dans la mer. Au sein de la roche, le village à l'origine entièrement creusé déroule une longue série de troglodytes avec vue sur l'océan. Juchées à une vingtaine de mètres de hauteur, les cavités sont sans conteste d'origine naturelle. Très tôt habitée par une communauté de pêcheurs troglodytes, l'occupation humaine a fini par modeler l'espace en agrandissant et aménageant les cavités d'origine. Les grottes de Meschers-sur-Gironde offraient à leur population une protection efficace. Siècle après siècle les

cavités se sont agrandies. Des familles entières vivaient là du fruit de leur pêche ainsi que de l'exploitation d'importantes carrières ouvrant sur la mer.

Deux niveaux d'habitations s'alignaient sur environ un kilomètre. Une partie des caves tut utilisée par les pêcheurs jusqu'au début du XXème siècle et les derniers habitants authentiques quittèrent les lieux en 1922. Plus tard, dès les années trente, toute une faune d'artistes s'empressèrent d'élire domicile le temps des vacances au sein de la falaise blanche.

Peu à peu, le site est devenu un lieu reconnu pour ces luxueuses résidences d'été qui attirent chaque année de nombreux citadins en quête de tranquillité.

L'organisation en village-paroi peut regrouper un nombre plus ou moins important d'habitations et utilise au mieux les versants bien orientés.

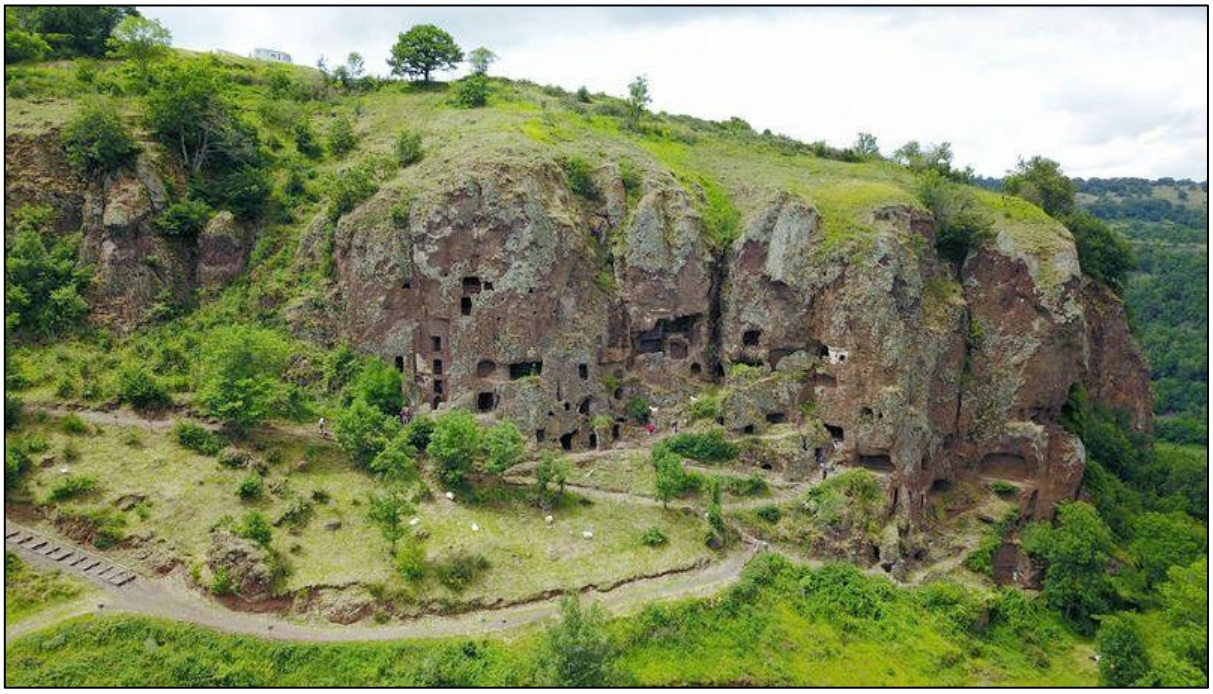


Figure 53 : Village troglodytique de Jonas – Auvergne (France). Village excavé sur 7 niveaux dans le tuf volcanique. Source : jonastroglo.fr

1.1.6.2 Les abris sous roches des maisons des falaises du sud-ouest américain

Les maisons des falaises sont des pueblos construits à l'abri d'une anfractuosité.
Vers 1200, les indiens Pueblos se retranchèrent dans les cavités naturelles des falaises qui leur procuraient un asile contre les incessantes attaques d'envahisseurs étrangers.
Le site était choisi en fonction de sa difficulté d'accès.

L'aire de répartition des maisons des falaises est immense : sur le Rio Colorado, sur le plateau de Mesa Verde, sur les rives du Rio San Juan, dans le sud-ouest de l'Utah, entre le Rio San Juan et le Rio Colorado, et dans le canyon de Chelly.

La région de Mesa Verde. regroupe un grand nombre de ces pueblos installés dans des falaises de grès. Ils peuvent être classés suivant leur position par rapport au sol des vallées ou des plateaux. On distingue ainsi trois types de villages.

Les villages troglodytiques de milieu de falaise :

Le Cliff-Palace de Mesa Verde est construit dans une cavité naturelle formée par érosion hydrodynamique. Il est mis hors de portée des hommes par le vide qui l'entoure : 30 mètres au-dessous de la surface du plateau. Cette position devait poser des problèmes aux personnes âgées et aux très jeunes enfants, car les seules possibilités d'accès n'étaient envisageables qu'avec des échelles ou des trous creusés dans le rocher.

La cavité accueillant les constructions a 100 mètres de largeur, 37 mètres de profondeur, et 20 mètres de haut. Le pueblo de Cliff-Palace comprenait 200 chambres et 23 kivas, répartis sur quatre étages. La toiture-terrasse était supportée par des poutres en bois surmontées de perches recouvertes par des baguettes ou des perches fendues en deux. L'étanchéité se faisait par un revêtement de feuilles d'arbres et de boue séchée. Les chambres, petites (6 m^2) et basses de plafond (1,50 à 1,60 mètre), servaient principalement de lieu de repos pour la nuit et de lieu de stockage des objets et provisions. Les ouvertures donnant sur l'extérieur, minuscules et peu nombreuses, rendaient l'intérieur des pièces sombres, mais cette disposition avait l'avantage de procurer une fraîcheur bienfaisante pendant les chaleurs d'été.

A Montezuma Castle, les habitations ne sont pas abritées par une toiture naturelle, mais s'ancrent à la paroi, semblable à des nids d'hirondelle. Ce petit village de 19 pièces, abritait, entre 1 100 et 1 400, une population de 40 ou 50 personnes. Edifié non loin de Flagstaff, il est réalisé sur les saillies de la falaise et sur des remblayages amenés à dos d'hommes. En cas d'alerte, les échelles d'accès disparaissaient et le village était isolé par un à pic de 33 mètres.

La façade austère, s'élevant sur quatre étages, percée de rares fenêtres, fait penser à une forteresse. Les murs de façade sont édifiés en pierres maçonnées et recouverts par un enduit de terre.

Le passage d'un étage à l'autre, à l'intérieur de la construction, se faisait par l'intermédiaire d'échelles. Les portes ont une forme en T, facilitant ainsi le passage des personnes chargées, de paniers ou autres fardeaux encombrants.



Figure 54 : Montezuma Castle. La fraîcheur des petites grottes situées sous le château était utilisé pour conserver les provisions.

Les pueblos semi-troglodytiques :

La plus grande partie de White House, dans le Canyon de Chelly, a ses fondements sur le sol de la vallée. Ce village nous propose une solution originale au problème de défense.
A cette architecture « aérienne», s'élevant sur plusieurs niveaux, vient s'ajouter un bastion troglodytique édifié dans une cavité naturelle située au-dessus du village. L'accès à ce donjon s'effectuait par les étages supérieurs du pueblo. En cas d'attaque, toute la population se retranchait dans la résidence défensive.

Les pueblos troglodytiques ouverts sur les vallées :

Dans la région de Kayenta, le pueblo Betatakin est construit dans une cavité naturelle donnant directement, de plain-pied, sur la vallée d'un canyon verdoyant. Betatakin est cependant entouré de hautes murailles de grès. Son caractère défensif se trouve renforcé par la descente très ardue dans le canyon. L'accès ne peut se faire qu'à partir des plateaux, ou en longeant le canyon de Tsegi. L'arche gigantesque (138 mètres de large, 112 mètres de haut, et 41 mètres de profondeur) recevant les habitations s'est formée sous l'influence de l'eau absorbée par le grès poreux du canyon.

L'organisation interne de ces demeures est la suivante: une grande pièce était dégagée, puis, selon les besoins, on y accolait d'autres espaces. La grotte principale, polyvalente, tenait lieu aussi bien de séjour que de cuisine. Pour satisfaire à ces fonctions, un foyer fut ménagé au centre de la pièce.

Sur le cours du Rio Mancos, on découpait la porte d'accès dans le tuf volcanique tendre, sur 30 centimètres d'épaisseur, puis on excavait une chambre plus ou moins ronde. Finalement, des petites ouvertures irrégulières étaient percées. Ces pièces, parfois voûtées, avaient une profondeur de 3,50 mètres et 1,70 mètres de hauteur. L'aménagement se réduisait à de petites niches servant de rangement.

On peut rattacher au type « village-paroi» les spectaculaires agglomérations à flanc de falaise qu'occupèrent les indiens américains au XIIIe siècle et dont les témoignages sont aujourd'hui visibles dans les Etats du Sud-Ouest des Etats-Unis, dans l'Utah, le Colorado et en Arizona par exemple avec le Canyon de Chelly. L'aire de ce type d'habitat correspond aux paysages de mesas, creusées de canyons, en particulier par le Colorado et ses affluents.

Les Indiens Pueblos ont su aménager leurs villages à l'abri des immenses porches naturels, les abritant de la vue ainsi que du soleil. Ce sont de véritables forteresses qui s'étagent dans des cavités naturelles parfois agrandies par la main de l'homme. On imagine toujours l'Indien comme étant un éternel nomade, hors ici le patrimoine bâti dans les falaises montre un degré de sédentarisation et de technologie étonnant.

Le fait remarquable est le caractère éphémère de l'occupation des « cliff-villages » par l'ensemble des ancêtres des indiens actuels.

Vers 1000 av. J.-C., la « culture du désert » Co-Chise émerge dans le sud-ouest de l'Amérique du Nord. Sa transformation d'une culture nomade en une culture agricole conduit à sa différenciation en trois branches principales : les Mogollon (centre de l'Arizona et sud du Nouveau-Mexique), les Hohokam (sud de l'Arizona) et les Anasazi (aux frontières de l'Utah, de l'Arizona, du Nouveau-Mexique et du Colorado).

Jusqu'en l'an 1000, l'habitation mogollon était semi-souterraine, de plan arrondi ou rectangulaire. Le toit, d'abord conique et soutenu par un poteau central, puis plat et soutenu par quatre poteaux latéraux, était constitué de poutres recouvertes de nattes tressées, de branchages et de boue, à l'instar de la partie supérieure de la structure.

Les premiers Anasazis, nomades et semi-nomades chasseurs-cueilleurs, vivaient dans des grottes creusées dans les canyons et ne connaissaient ni l'agriculture ni la poterie.
Plus tard, du Ier au VIe siècle apr. J.-C., les établissements agricoles adoptèrent des habitations semi-souterraines, inspirées du modèle mogollon, puis des maisons plus permanentes aménagées dans des fosses circulaires peu profondes de 3 à 6 m de diamètre, couvertes d'un toit à poutres de bois à charpente carrée, sans pilier central. L'entrée se situait sur le côté et, dans le sol d'argile, creusé à plusieurs endroits pour stocker les provisions, se trouvait une fosse où étaient placées des pierres chauffées à l'extérieur.

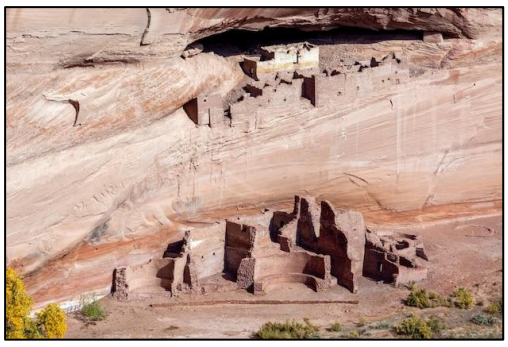


Figure 55 : Canyon de Chelly (Arizona),
la Maison Blanche, XIème siècle après J.C
Source : ouramericandream.fr

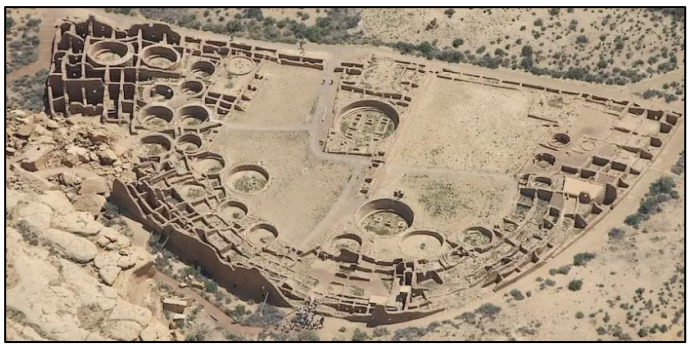


Figure 56 : Pueblo Bonito (Nouveau-Mexique),
vue d'ensemble de la colonie Anasazi, XIIe-XIVe siècle après JC.
Source : labrujulaverde.com

La phase suivante (Période des vanniers modifiés, vers 500-750 apr. J.-C.) vit l'établissement de communautés permanentes à ciel ouvert sur des mesas, à proximité des cultures.
La typologie de base demeura inchangée, mais l'habitation était entièrement semi-enterrée et le toit s'ouvrait en son centre par un trou d'évacuation des fumées.
Ce trou devint par la suite l'unique entrée, tandis que l'entrée latérale d'origine fut transformée en une aération protégée par une dalle de pierre.

Durant la période suivante (développement des Pueblos, env. 700-1100), l'organisation villageoise se formalisa selon un axe nord-ouest/sud-est, les maisons étant orientées sud-est et précédées de kivas. La croissance démographique étendit les établissements vers le Rio Grande et augmenta la taille des bâtiments, qui finirent par compter 30 pièces ou plus sur deux étages. Dans les villages, les habitations, généralement disposées en demi-cercle, entouraient une cour où étaient creusées de grandes kivas rituelles, aux murs revêtus de pierres polies.

Ensuite, suivi l'ère classique des Pueblos (1100-1300) caractérisée par de grands ensembles urbains avec de vastes complexes d'habitation concentrés dans trois centres sédentaires : Chaco Canyon, Mesa Verde et Kayenta.

Chaco Canyon, le plus ancien, accueillait environ 700 habitants en 1100. En son sein, outre de nombreux autres centres (Chetro Ketl, Pueblo del Arroyo, Kin Kletso), s'est développé le Pueblo Bonito, la plus grande communauté du Sud-Ouest, conçue comme une mégastructure unitaire de plus de 800 habitants.

Les pièces étaient disposées en amphithéâtre, sur quatre ou cinq niveaux descendant vers des terrasses entourant les kivas des clans familiaux et deux kivas plus grandes, d'environ 18 à 20 mètres de diamètre, destinées à la communauté. Bien que construites au niveau du sol, l'impression d'être souterraines était maintenue par le remplissage des espaces intermédiaires avec de la terre et des pierres. Dans les habitations, les pièces intérieures servaient de réserve, tandis que les quartiers d'habitation, menacés par les raids des nomades shoshones, réactivaient l'entrée par le haut.

D'autres établissements similaires apparurent dans la Mesa Verde vers 1100.
Les kivas étaient protégées par des murs et souvent reliées par des tunnels souterrains à de hautes tours de pierre circulaires ou carrées. Mais après environ un siècle, les Anasazis, probablement chassés par les incursions Shoshones, retournèrent dans les grottes naturelles des parois du canyon, y construisant des villages qui conservaient la même structure que ceux à ciel ouvert. Parmi les innombrables « Cliff-village» recensés à Mesa Verde, Longhouse, Mug House, Spring House, Cliff Palace, Spruce Tree House, Balcony House et Square Tower House sont les plus remarquables et présentent des proportions impressionantes. Le Cliff Palace compte 200 pièces et 23 kivas. De nombreux autres villages troglodytiques se sont également développés en dehors de la Mesa Verde (Canyon de Chelly et Canyon de Muerto, en Arizona).

Kayenta s'est développée plus lentement. Son centre névralgique était le canyon de Tsegi, où se trouvent Keet Seel et Betatakin, avec leurs structures semi-souterraines.

En résumé, les plateaux constituant le site de Mesa Verde accueillirent les premiers habitants au début de l'ère chrétienne. Les premiers témoignages connus de leur architecture remontent au IVe siècle après J.-C., ce sont des ruines d'habitations en excavation et des kivas (salles liées à un rituel). Des groupements de cet habitat constituent les premiers pueblos (villages) sur les plateaux. Vers 750, ils atteignent leur niveau de développement le plus avancé. Les techniques de constructions sont diverses: adobe (terre et paille), pierre, pierre-adobe, et maçonnerie de pierre appareillée. C'est au XIIIe siècle que l'on constate le déplacement des pueblos vers le fond des canyons où ils vont occuper un nombre impressionnant de cavernes naturelles à flanc de falaise. Cette migration est due, semble-t-il, à Mesa Verde, à des nécessités de défense devant les harcèlements de tribus voisines.

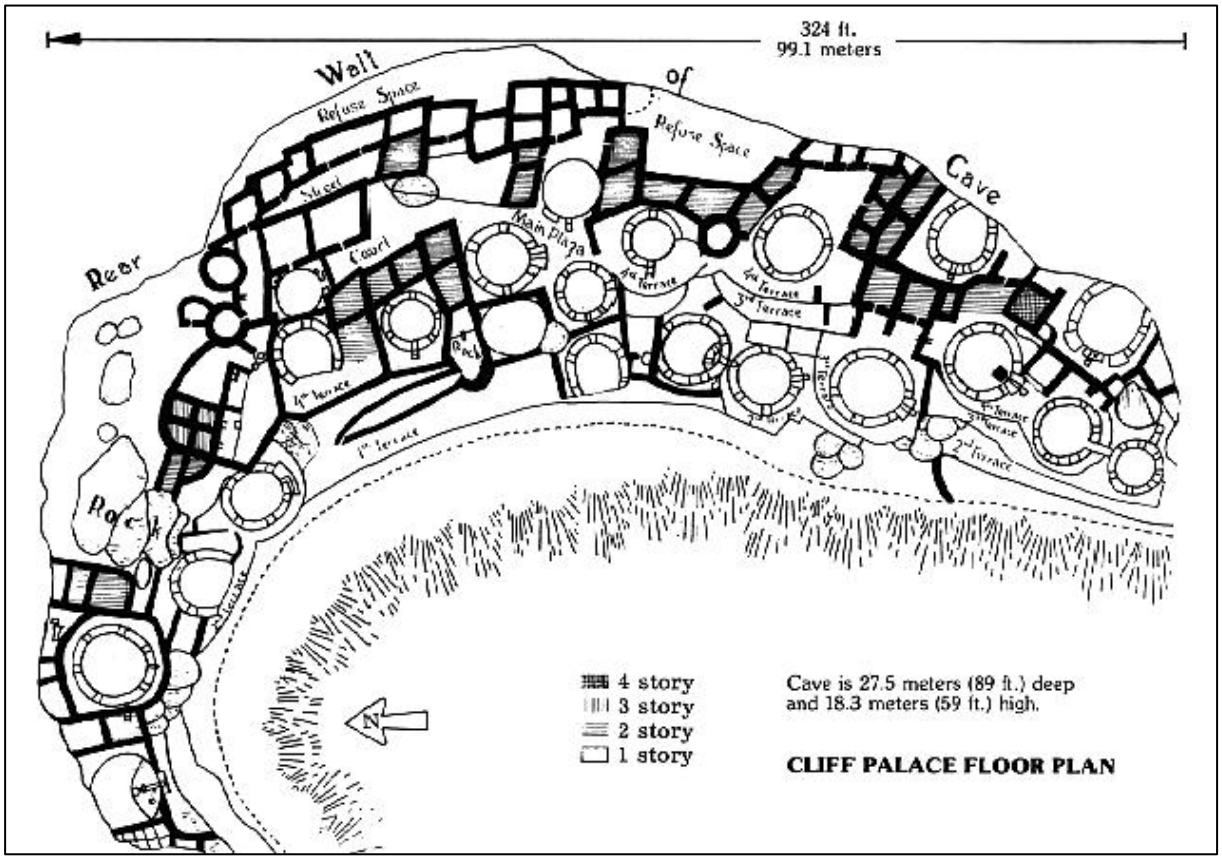


Figure 57 : CLIFF PALACE (COLORADO – ETATS-UNIS) Plan.

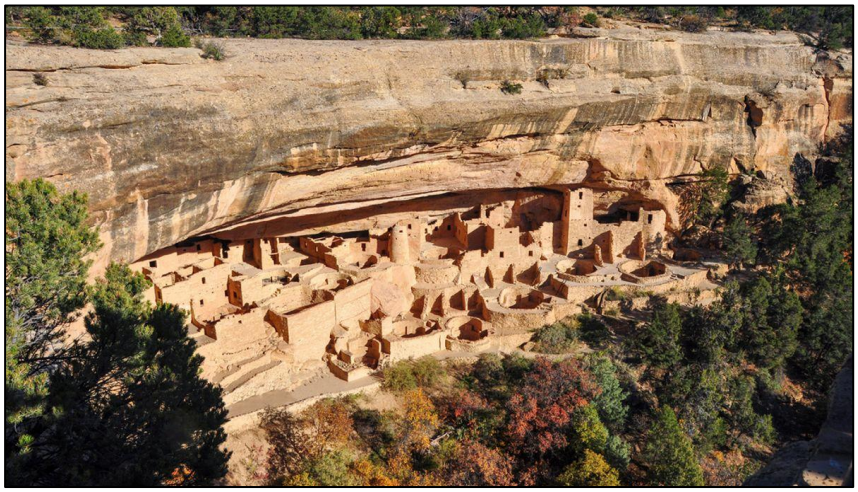


Figure 58 : VILLAGE DEFENSIF DE CLIFF PALACE DES INDIENS PUEBLOS DANS LE SITE DE MESA VERDE (COLORADO- ETATS-UNIS). Exemple type de réutilisation de cavités naturelles sous porche. Source : https://thetrekplanner.com/

Orientée sud-ouest, la cavité de 100m de long sur 20m de large abrite plus de 217 salles, dont 23 kivas. Une population de 250 personnes environ était ainsi abritée aussi bien du soleil estival (40° à l'ombre) que des rigueurs de l'hiver (neige abondante). Le site a été occupé jusqu'au XIV siècle.

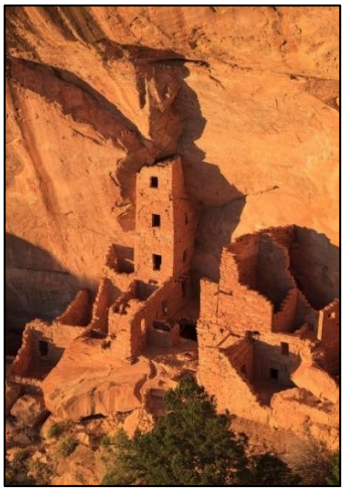


Figure 59 : SQUARE TOWER HOUSE A MESA VERDE (COLORADO). Source : https://pixels.com/

Le pueblo de Betatakin, construit au début du XIIIème siècle par les ancêtres des Navajos actuels, est l'un des plus spectaculaires en Arizona. Une immense caverne creusée par l'érosion dans les grès, profonde de 46 m, dessine une arche de 135 m de hauteur et de 110 m d'ouverture. Des formations de grès de porosité différente dans la constitution de la falaise font apparaître des sources accessibles aux anciens habitants.

Une agglomération de quelque 135 salles (habitations, kivas rituelles, greniers) correspondant à une quarantaine de familles, se loge sur plusieurs niveaux sous la voûte naturelle.

La descente des plateaux vers le fond des canyons, s'expliquerait par une recherche d'humidité, liée au développement de l'agriculture et à l'arrivée de la sécheresse de 1276.

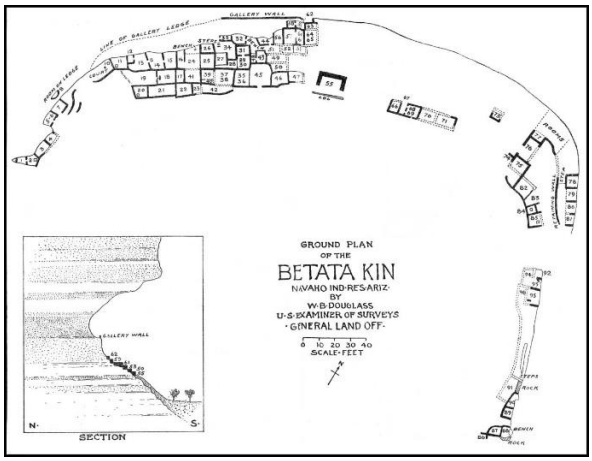


Figure 60 : LE SITE DE BETATAKIN (ARIZONA – ETATS-UNIS)
Plan des ruines.



Figure 61 : BETATAKIN (Arizona).
Source : https://fineartamerica.com/



Figure 62 : PUEBLO DE BETATAKIN (NAVAJO NATIONAL MONUMENT).
Source : jqjacobs.net

1.1.6.3 Groupements en cirques

Lorsqu'une paroi ne se développe pas linéairement mais dessine une courbe, le site permet une disposition plus centrée, renforçant l'autonomie du groupement. C'est le cas du cirque de Gorème, en Cappadoce, où la paroi regroupe habitations, services, cellules, réfectoires des communautés de religieux. L'ensemble est focalisé sur les églises creusées dans trois cônes occupant le centre du cirque.

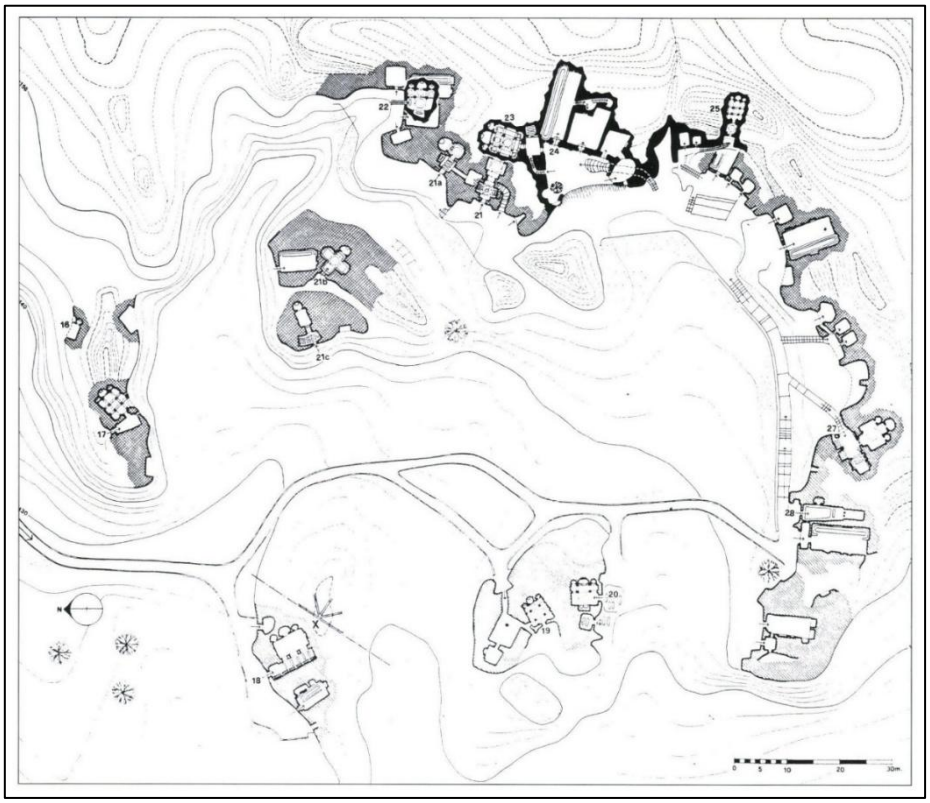


Figure 63 : CIRQUE DE GOREME (CAPPADOCE). Cônes creusés d'églises rupestres occupant le centre.



Figure 64 : CIRQUE DE GOREME (CAPPADOCE). Source : https://slideplayer.fr/

1.1.6.4 Villages en surface

Les villages à cônes de Cappadoce utilisent des monticules naturels qui s'organisait déjà comme une structure de village. Une démarche soustractive de construction, puisqu'il y a creusement dans la roche, aboutit cependant à un urbanisme « de surface».

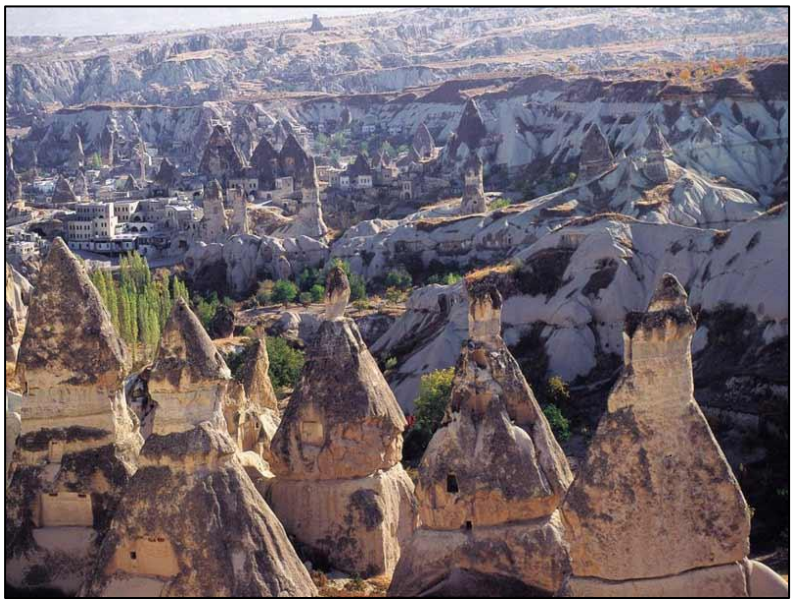


Figure 65 : LES CONES DANS LA VALLEE D'AVCILAR (CAPPADOCE). Source : https://anatoliaculturatravel.com/

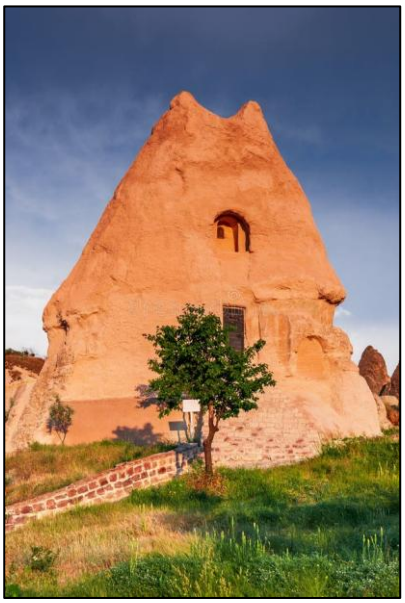


Figure 66 : EGLISE EL-NAZAR (CAPPADOCE). Source : https://fr.dreamstime.com/

1.1.6.5 Villages creusés

A Matmata (Tunisie), Salillas De Jalon (Espagne) ou dans le Shensi (Chine), les puits creusés verticalement déterminent l'unité d'habitation. Ces puits peuvent être reliés entre eux par des cheminements souterrains (Matmata) ou en surface, constituant ainsi des unités urbaines plus vastes.

Si l'on compare la morphologie de ces tissus, leur organisation est très rigoureuse en Chine où elle se réfère à une trame orthogonale systématique. Ceci étendit, une même technique de creusement, une même situation par rapport à la surface du sol, ont conduit à des expressions d'habitats creusés nettement différenciés. Elle est plus libre en Tunisie où les formes souples prédominent dans la taille des grottes.

Les villages creusés constituent l'exemple d'un urbanisme enterré qui a réussi à conjuguer les avantages thermiques liés au climat souterrain, avec l'ouverture au climat extérieur.
Le puit central structure très fortement cet habitat, d'une part parce qu'il organise et distribue les pièces d'habitation, d'autre part parce qu'il assure la pénétration de l'ensoleillement, vecteur de lumière et de chaleur. Le rapport entre milieu souterrain et soleil est fortement établi. *« Ici la terre fait double usage, avec les habitations en sous-sol et les champs au rez-de-chaussée*[1]*.»*

1. George B Cressey, Land of the 500 millions : a geographie of China, Paris, Ed du Chêne, 1977.

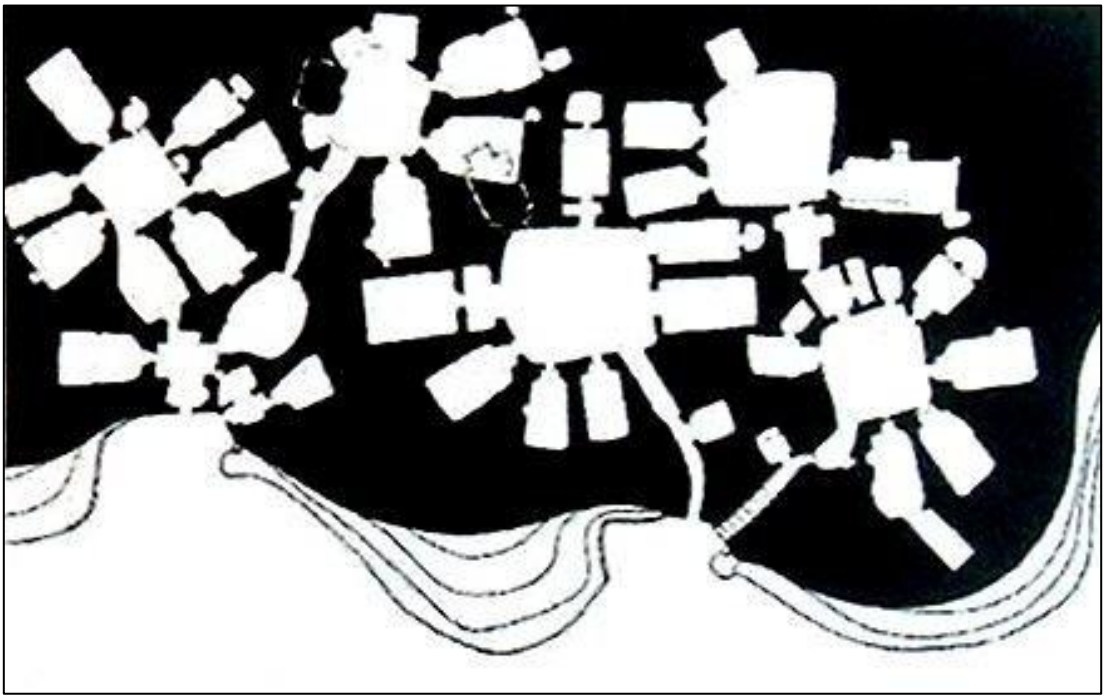


Figure 67 : GROUPEMENT D'HABITATIONS ENTERREES A MATMATA (TUNISIE).

On peut également citer l'exemple de Doué la Fontaine (Maine-et-Loire), situé près de Saumur, dans la vallée de la Loire, où de nombreuses habitats troglodytiques sont creusées verticalement dans le falun. En effet, l'Anjou fut la proie de guerres et d'invasion incessantes. Construire des maisons en bois revenait à recommencer les travail après chaque pillage. Les paysans profitèrent ainsi de la nature du sous-sol, facile à creuser, pour se loger à peu et se défendre des attaques.



Figure 68 : Vue d'une maison souterraine creusée dans le falun de Doué-la-Fontaine.
Source : alovelyworld.com

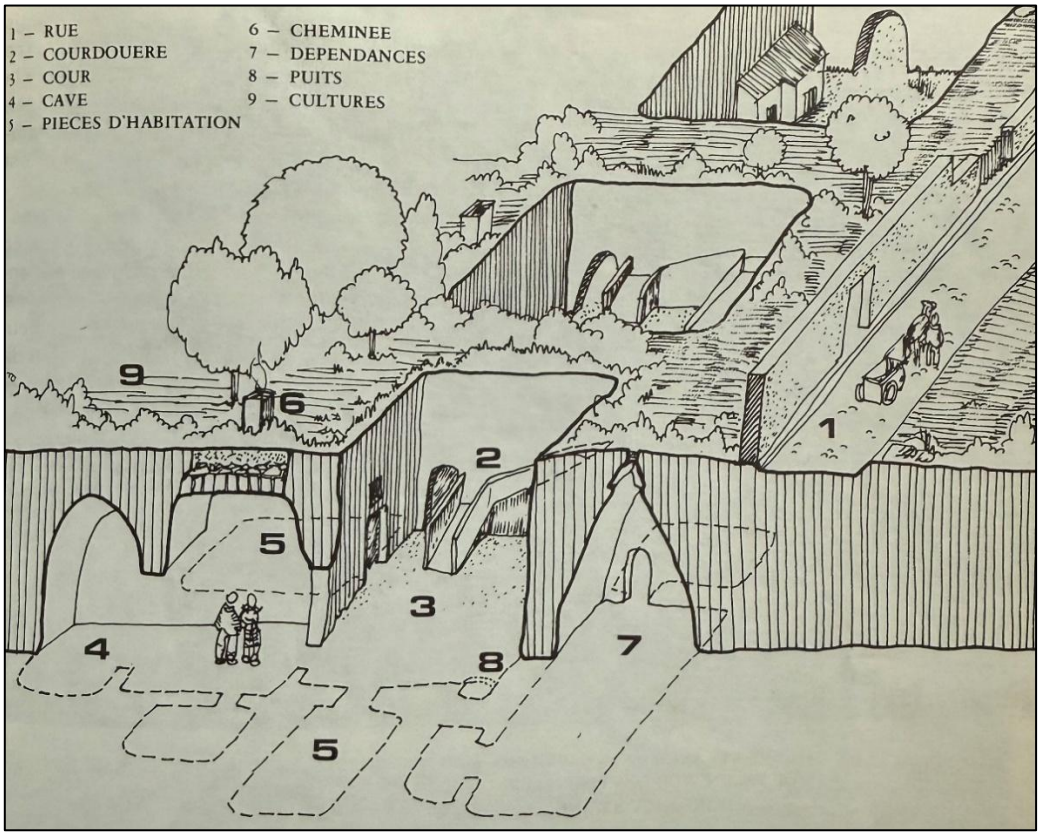


Figure 69 : Schéma d'habitation souterraines à Doué-la-Fontaine.

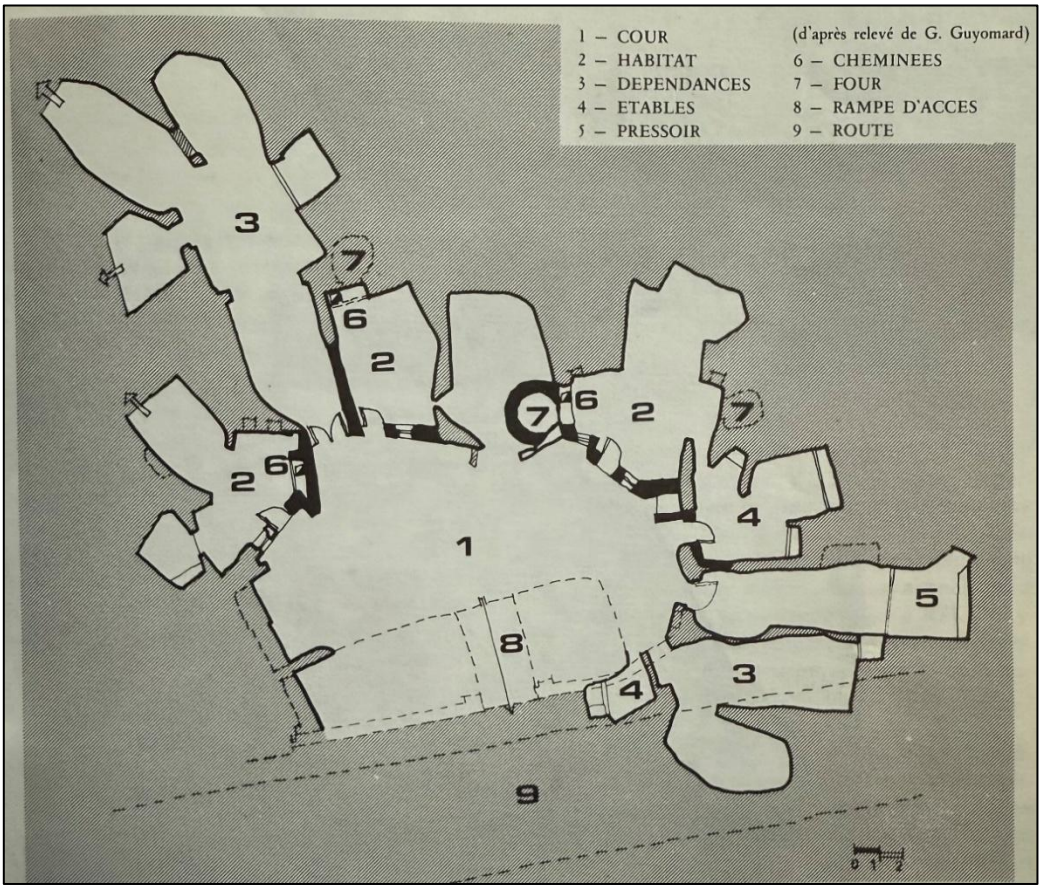


Figure 70 : Relevé partiel de groupement de plusieurs habitats en cave dans le tuffeau – Denezé-sous-Doué.

1.1.6.6 Villages et groupements souterrains refuges

Ce type d'urbanisme souterrain particulièrement discret doit son existence aux conflits qui ont opposé les hommes entre eux. Les impératifs de défense ont parfois poussées les habitations à s'enterrer totalement. La communication avec l'extérieur ne se fait plus alors que par quelques accès et orifices techniques (ventilation).

En examinant les divers plans et les systèmes de fermeture de ces espaces souterrains, on comprend que le but défensif était de se terrer et de ne pas être délogé. L'inexistence quasi-générale de structures telles que cheminées, ouvertures de taille normale, galeries aisément parcourables permettent de déterminer qu'il ne s'agissait pas d'habitats permanents.

Les villes souterraines refuges de Turquie :

Les villes souterraines de Kaymakli et Derinkuyu, qui furent creusées aux premiers siècles de l'ère chrétienne sur le plateau anatolien, distantes toutes deux d'une dizaine de kilomètres, ont la même organisation. Ces villes ont surtout été utilisées comme refuges par les premiers chrétiens, quand les Arabes envahirent la Cappadoce.

A partir d'un tertre rocheux, la ville de Kaymakli s'enfonce dans un tuf tendre sur sept niveaux.

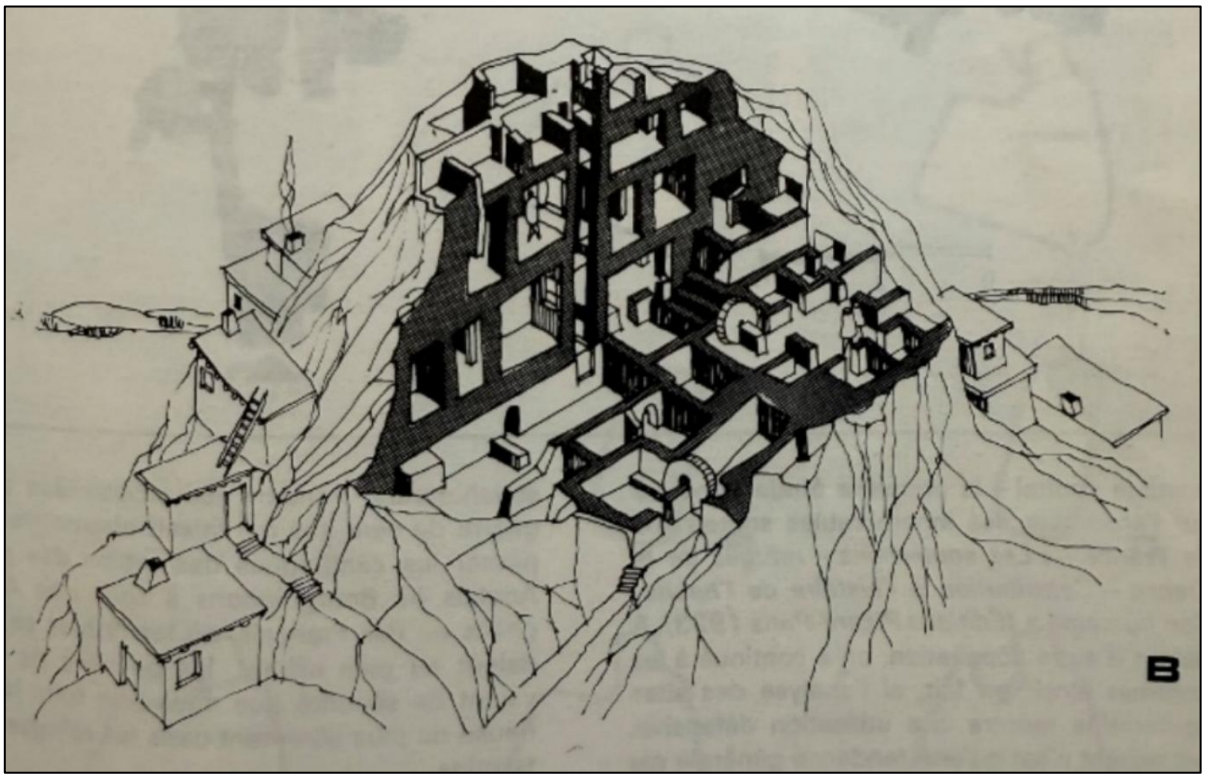


Figure 71 : Kaymakli, Vue éclatée.

On y circule au moyen d'un réseau de tunnels, desservant les différentes pièces creusées dans le roc : chambres, cuisines, celliers, pressoir à vin, chapelles. Le mobilier est entièrement intégré à la masse rocheuse. La ville, aérée par de profonds puits et conduits, est divisée en plusieurs parties se groupant autour de places. Des rues desservent les quartiers d'habitations. De grandes meules de pierre, d'un diamètre d'environ un mètre cinquante, et d'une épaisseur de cinquante centimètres, ferment les passages.

Aménagement :

Les dimensions des chambres souterraines peuvent aller de 4 à 40 m^2. Pour les grandes salles, l'homme aménage lors du creusement des piliers (aménagement identiques aux habitations troglodytiques). Des petites niches, le long des galeries, reçoivent des lampes à huile, à graisse ou encore des bougies. De grandes niches, des mangeoires, et silos sont excavés dans les diverses salles. Des silos-réserves sont aménagés le long des galeries. Des banquettes monolithiques servent de sièges et de lits.

Aération :

Le « climat souterrain » est défini dans une zone de 5 à 15° C, pour 3 à 15 grammes d'eau par mètre cube d'air, ce qui revient à un degré d'humidité situé entre 60 à 85%. Si l'on considère que le degré hygrométrique nécessaire à un comportement normal varie entre 5% et 65%, l'humidité provenant du terrain et de la condensation de la vapeur contenue dans l'air doit être contrôlée. Le souterrain ayant pour but le rôle d'habitat, temporaire ou permanent, il doit être suffisamment aéré pour renouveler l'air et l'assainir. Le nombre d'heures s'écoulant avant que l'atmosphère d'un souterrain devienne irrespirable est proportionnel avec le cube d'air mis à la disposition des occupants. Des conduits verticaux, creusés avec ingéniosité dans la voûte, ventilaient ainsi le souterrain.

Kaymakli, Derinkuyu et Ozkonak sont des villes souterraines en Turquie dont les parties connues s'étendent sur plusieurs kilomètres en un réseau de tunnels, jusqu'à 8 ou 10 niveaux de profondeur. À Kaymakli, les galeries s'ouvrent sur des places entourées d'espaces communs, se ramifiant en couloirs plus étroits menant à des groupes de pièces, probablement les habitations de familles. Tout le mobilier est taillé dans le tuf, de même que diverses cheminées de ventilation, des puits et des systèmes de protection : des logements concaves, transversaux aux galeries d'accès, fermés par des meules de pierre selon la méthode sémitique, également employée dans les sites religieux.

Les trois cités souterraines de Sivasa, Kaymakli et Derinkuyu, situées dans un rayon d'environ 30 km autour de Nevşehir, constituent les plus importants ensembles d'une série de cités souterraines, dont la plupart restent encore inexplorées et qui étaient peut-être reliées entre elles. Leur utilisation se prolongera durant tout le moyen-âge et le début de la période moderne.

Des systèmes d'agrégation en grappes, situés dans des cratères, conçus comme le centre de la vie communautaire, sont reconnaissables le long des rues et des places entièrement souterraines de la ville hypogée de Kaymakli.

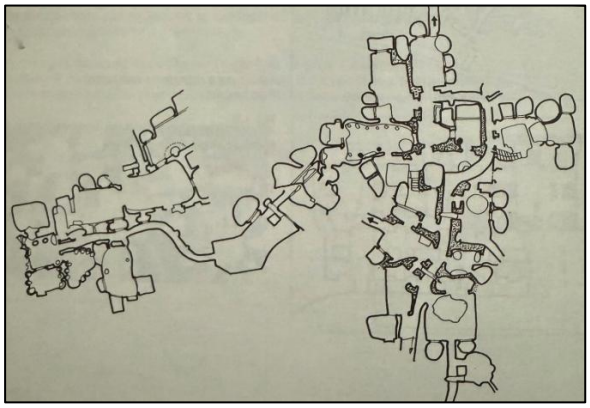


Figure 72 : KAYMAKLI (CAPPADOCE).
Plan partiel de la ville souterraine.



Figure 73 : KAYMAKLI (CAPPADOCE).
Source : https://toutelacappadoce.com/

La cité souterraine de Naours :

Se rapprochant du complexe de Kaymakli en Turquie, les galeries souterraines de Naours représentent près de trois cent chambres qui furent aménagées dans le but d'abriter la population pendant les guerres et invasions.

Situé à 33 mètres sous terre, ce vaste réseau put recueillir les habitants, leurs troupeaux, et leurs moissons. Les entrées dissimulées sont multiples et les galeries distribuent des chambres latérales, des places publiques, un tribunal, une prison, et des chapelles. Les diverses familles se groupaient par pièces, par quartiers, le long des galeries aux cellules régulières disposées symétriquement. Six énormes cheminées permettaient l'évacuation des fumées des cuisines collectives. Pour deux d'entre-elles, un système ingénieux détournait l'attention de tout éventuel ennemi. La température constante de ces lieux est de 9,5°C, quelle que soit la saison.



Figure 74 : Vue du complexe souterrain-refuge qui s'étend sous la petite ville de Naours. Source : citesouterrainedenaours.fr

1.1.7 Les espaces de l'architecture troglodytique

Dans l'habitat, le but est l'élaboration d'un milieu propice à la vie améliorant le climat extérieur. Le matériau (le sol en place) et la technique de production des espaces (le creusement) sont fortement déterminants dans l'expression des espaces obtenus. La douceur ou la rugosité des parois, la mollesse ou la rudesse des lignes, des tracés, sont des caractères également déterminants dans la perception de ces espaces. Dans l'architecture souterraine, ils sont le lieu privilégié de ruptures intérieur - extérieur, auxquels l'architecture construite nous a peu habitué.

La position face à cette spécificité des formes creusées varie entre deux extrêmes.
D'un côté il y a l'affirmation, de l'originalité que confèrent à l'architecture creusée son matériau et la technique du creusement. De l'autre, il y a le désir d'oublier que ces lieux sont enterrés en leur donnant des qualités, des formes et un traitement qui les présentent comme des architectures construites. Dans tous les cas, l'habitat troglodytique en général, s'affirme toujours en tant que tel : creusé.



Figure 75 : Intérieur d'une maison troglodytique, Région de Madrid, Espagne.
Source : https://www.flemarie.fr/

Accepter que l'espace creusé affirme son caractère troglodytique, ou, au contraire, le charger d'éléments architecturaux qui vont tendre à atténuer ce caractère, pour le ramener à l'expression du « construit», tels sont les deux positions entre lesquels oscille la problématique de l'architecture troglodytique traditionnelle.

Il en va tout autrement avec les architectures souterraines modernes. Les matériaux contemporains qui induisent une logique constructive très spécifique, comme le béton armé, caractérisent de façon si forte les espaces qu'ils définissent, qu'ils peuvent masquer totalement le milieu souterrain qui les englobe.

Cette remarque sera à étendre d'une façon générale au troglodytisme contemporain, marqué avant tout par les techniques nouvelles de mise en œuvre ou de creusement, plus que par les caractéristiques de couleur, texture, du matériau englobant.

L'espace troglodytique se décrit et se vit de l'intérieur. Toutefois, certains éléments extérieurs composant les façades d'un habitat troglodytique, permettant d'indiquer l'existence de volumes en creux : percements, fenêtres, portes, toiture percée de châssis, nous rappellent l'habitabilité d'une maison « traditionnelle ».

Cependant, au sein des espaces troglodytiques, il y a une réduction de cette façade « traditionnelle ». Ces éléments peuvent être plus ou moins visibles, traités simplement, strictement utilitaires (ouvertures, fenêtres, conduit de fumée) ou plus élaborés, plus travaillés, se voulant évocateurs ou symboliques comme avec certaines architectures religieuses à l'image de l'église souterraine de Saint-Emilion dans la Gironde en France, voulant par-là se démarquer de la grotte naturelle

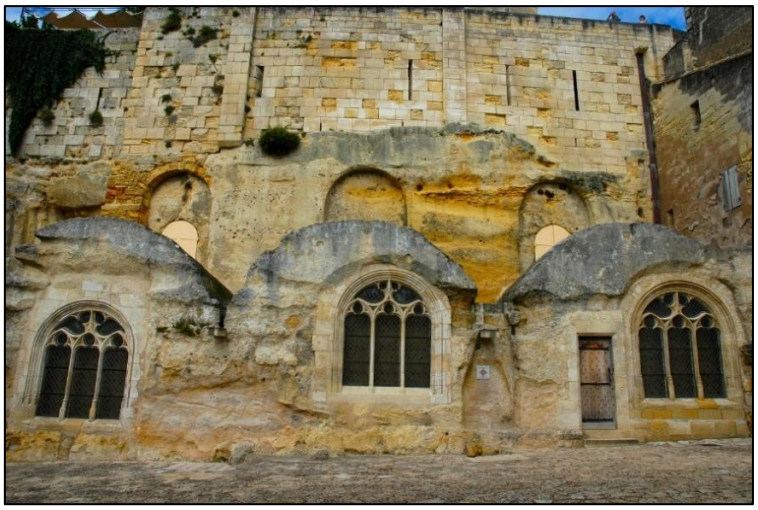


Figure 76 : Saint-Emilion, Gironde (France). Partie inférieure de l'église souterraine.

Dans le cas d'agglomérations souterraines, parfois, c'est l'organisation urbaine elle-même qui n'est pas lisible immédiatement. Le système de tunnels qui, à Matmata, relie entre elles les unités d'habitations souterraines, n'est pas décelable en surface, pas plus que le détail et l'organisation des habitations qu'il relie. Le seul repère dans ce cas de figure demeure l'ouverture des puits, cours intérieures.

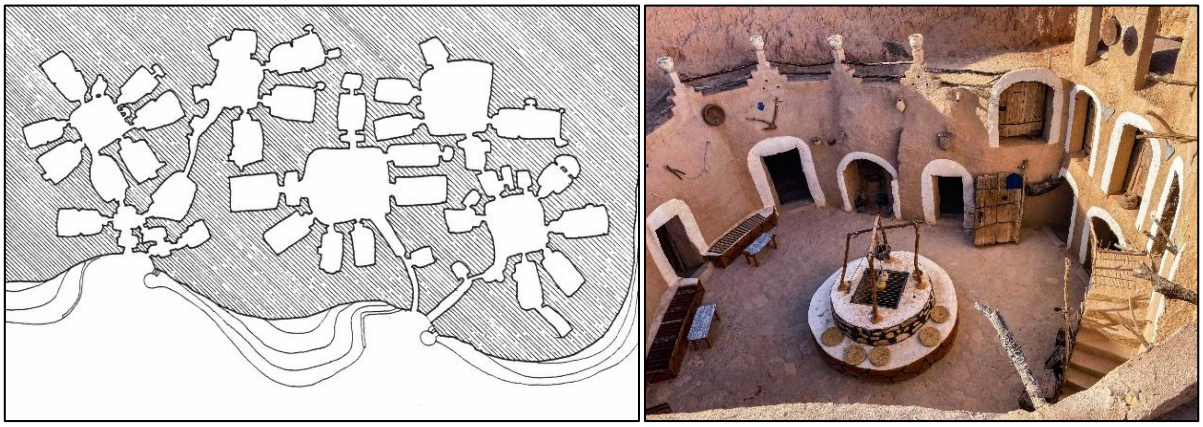


Figure 77 : Habitation creusées à Matmata. Source : https://www.leben-pur.ch/.

1.2 Les usages et les fonctions des habitats troglodytiques dans le monde et leurs adaptations face aux conditions climatiques extrêmes

Le phénomène troglodytique englobe des critères définissant une technique d'excavation, une organisation des espaces, des aménagements et des conditions d'établissement spécifiques et différentes selon les régions du monde. En effet, l'habitat « troglodytique» se retrouve éparpillé dans des régions du monde qui ne partagent pas les mêmes conditions climatiques. Ceux-ci se répartissent par groupes distincts et présentent diverses variantes selon la situation géographique, l'aspect social et culturel des réalisations.

On trouve la présence d'habitats souterrains partout où la géologie le permet.
Ce type particulier d'architecture se retrouve dans des contrées où les habitants étaient soit exposés aux agressions extérieures que sont l'ensoleillement, trop fort ou le froid trop intense, soit tout simplement exposés à la menace exercée par d'autres groupements humains hostiles.

D'une grande variété de forme et de conception, les divers types de maisons enterrées, creusées voire aménagées dans des cavités naturelles se retrouvent sous toutes les latitudes.

Les habitations troglodytes, dans des régions aux conditions climatiques extrêmes comme l'Andalousie, le sud de la Tunisie, la Cappadoce en Turquie et le Shensi en Chine, témoignent d'une adaptation multifonctionnelle aux contraintes environnementales.

En effet, en Andalousie, ces logements creusés offre une protection efficace contre les fortes chaleurs estivales et les vents secs, tout en minimisant les coûts de construction grâce à l'utilisation de l'argile et du calcaire disponibles localement. Dans le sud de la Tunisie, où les températures dépassent souvent les 40 °C, ces habitations sont un refuge thermique exceptionnel, permettant de maintenir une fraîcheur constante à l'intérieur de l'habitat toute l'année. En Cappadoce, les formations en tuf volcanique, facilement creusable, étaient utilisées non seulement pour l'habitat, mais aussi pour des fonctions défensives et religieuses, offrant un abri contre les envahisseurs et les intempéries. Enfin, dans le Shensi, les habitations troglodytiques dans le lœss profitent de la capacité isolante naturelle de ce matériau pour protéger les résidents des étés chauds et des hivers rigoureux, tout en intégrant des fonctions agricoles et de stockage grâce à l'aménagement de vastes caves souterraines.
Ces habitats, combinant protection contre les intempéries, économie d'énergie et de matériaux et adaptation climatique, illustrent une résilience et une optimisation des ressources locales dans des environnements extrêmes.

1.2.1 L'habitat troglodytique dans la péninsule ibérique

Nous commencerons notre étude à travers l'Espagne et ses régions troglodytiques.

L'habitat creusé ou enterré se répartit en deux ensembles importants en Espagne :
un ensemble situé au sud, précisément en Andalousie et dans la zone géographique du Levant près de Valence ; et un ensemble situé au nord recouvrant essentiellement l'Aragon et une partie de la Navarre et de la Nouvelle Castille.

Restes d'une culture ibère disparue, technique importée par les populations venues d'Afrique du nord, les habitations troglodytiques de ces régions possèdent des formes et des plans variant avec le type de roche qui les accueille.

Chose curieuse, une majorité de caves y sont creusées en terrain plat.
Cependant, une remarque peut être faite qui concerne les habitats troglodytiques horizontaux et verticaux espagnols. Loin de répondre à une tendance visant à rechercher la discrétion, les creusements sont plutôt le fruit d'une réflexion différente. L'inexistence d'habitats souterrains pourvus d'aménagements défensifs et leur implantation au vu et aux yeux de tout le monde, montre que l'objectif premier guidant le choix du troglodytisme local semble être une recherche de confort isothermique alliée à celle du moindre coût.



Figure 78 : Vue des habitations troglodytiques du village de Cuevas del Almanzora (Andalousie).
Les pièces d'habitation s'étendent profondément sous le relief.

La densité de l'habitat troglodytique est variable dans chacune des six provinces constituant ces régions et très inégale d'une province à l'autre.

Sans être exhaustif, on peut citer les principaux sites troglodytique suivant en Andalousie : Guadix, Grenade, Purullena, Cuevas de Almanzora, Cuevas de Velasca, Cuevas de Aylon, Valencia, Paterna, Patina, Setenil de las Bodegas, Caniles, Baza, Gor et Almeria.

Le patrimoine troglodytique espagnol est très riche. La seule région de Valence regroupe des ensembles et des villages troglodytiques de plusieurs centaines d'habitations, les unes en terrain plat, les autres nichées dans le creux des falaises.

Betera, Paterna, Manises, et bien d'autres villages possèdent des quartiers souterrains entièrement habités. Bocairente, petite ville au sud de la capitale régionale de Valence, possède à elle seule plusieurs centaines de caves encore habitées. On y trouve même une place de toros taillée dans la base de la falaise ainsi que six niveaux de souterrains dans la colline.



Figure 79 : Vue du village troglodytique en plaine de Paterna dans la région de Valence. Seules les cheminées et les puits de lumière dépassent du niveau du sol. Source : comunitatvalenciana.com

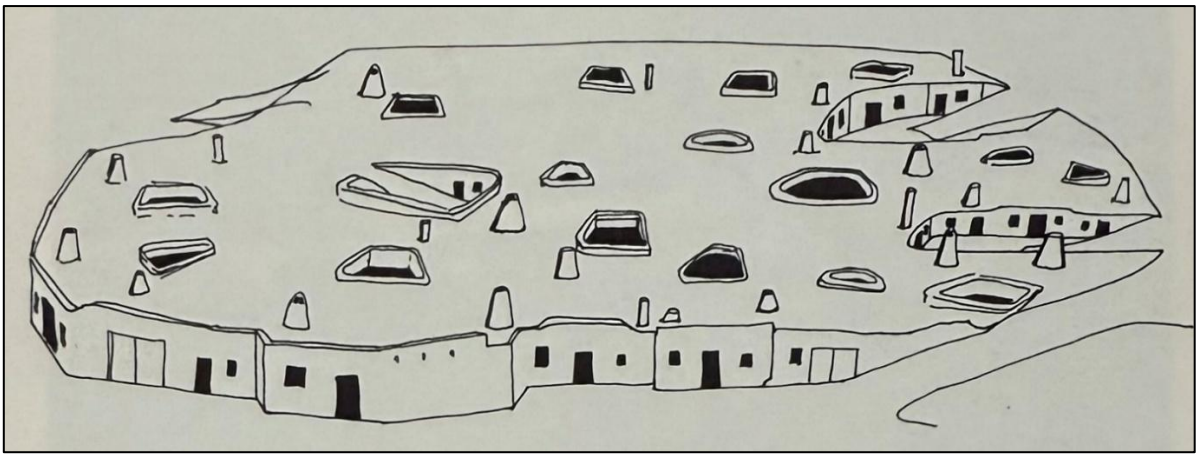
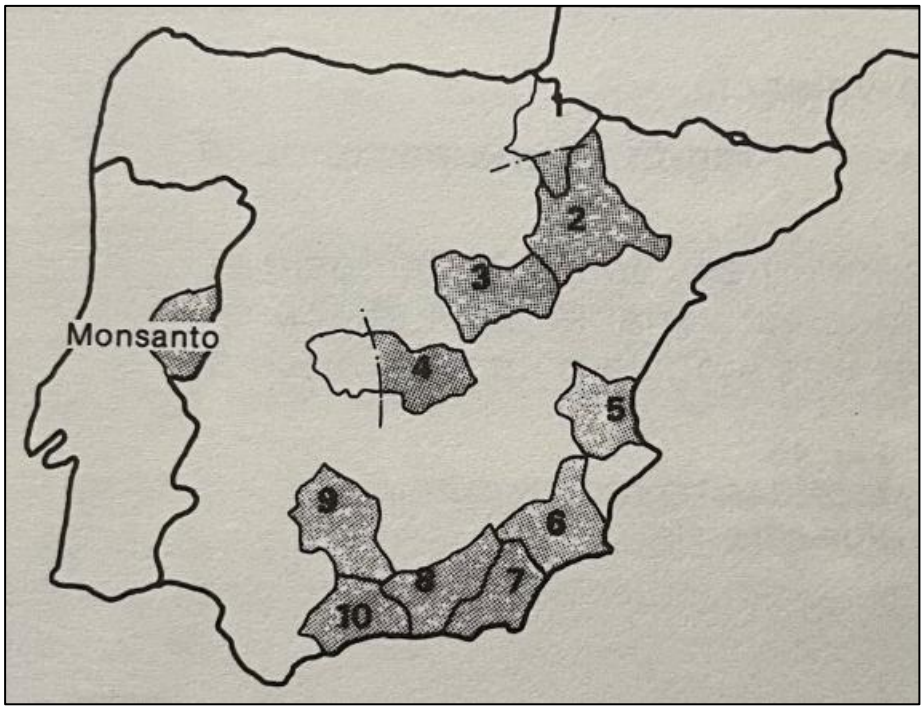


Figure 80 : Schéma représentant le village souterrain de Betera dans la région de Valence. La faible hauteur du relief a permis de réaliser un urbanisme troglodytique ne laissant pas deviner l'organisation spatial du plan des habitats troglodytiques.

Au Nord, en Aragon et Navarre, c'est dans les régions des rios Ebro (de Saragosse à Arguedas), Jalon (de Alagon à Ariza) et Huerva (de Saragosse à Daroca) que l'on retrouve abondamment des habitats creusés ou enterrés.

Les agglomérations concernées sont les suivantes : Calatayud, Epila, Ariza, Aninon, Calatorao, Alhama, Muel, La Muela, Almonacid, Carinena, Magallon, Alpatir, Borja, Ainzon, Tabuenca, Molejan, Zuera, Juslibol, Azaïla, Muniesa, Tarazona, Remolinos, Ricla, Tudela, Valtierras, Caparros, Urea de Jalon, Ablitos, Lucena, Salillas de Jalon, Longares et Fuendejalon.



1. *Navarre*
2. *Saragosse*
3. *Guadalajara*
4. *Toledo*
5. *Valencia*
6. *Murcia*
7. *Almeria*
8. *Granada*
9. *Cordoba*
10. *Malaga*

Figure 81: Carte représentant les principaux régions troglodytiques de la péninsule ibérique.

1.2.1.1 L'habitat troglodytique en Aragon (Espagne)

L'habitat creusé des régions de Guadix est l'un des ensembles troglodytiques les plus connu en Espagne. Pourtant, les types de solutions de creusement y sont variés, ainsi que les fonctions concernées par une réponse troglodytique : annexes agricoles de la maison, cave, grenier à blé, habitation rurale ou urbaine.

Au sein de certaines régions comme l'Aragon, l'habitat troglodytique n'est pas une forme d'habitat marginale mais bien une architecture populaire qui s'est développée en milieu rural, ou dans certains cas comme habitat urbain, constituant des quartiers entiers.
Certaines agglomérations de la région du Rio Jalon, d'Epila à Calatayud, ont compté jusqu'à un cinquième de leur population logeant dans les quartiers troglodytes.

En effet, la cité d'Epila, accrochée aux collines bordant le Rio Jalon, a compté jusqu' à 750 habitations troglodytes, groupées en cinq quartiers d'habitations formant les cinq collines de la ville. Cela correspond à une population de 2500 personnes environ.

La pérennité des villages troglodytes d'Aragon est très variable. La partie troglodytique de la petite cité de Juslibol par exemple, proche banlieue de Saragosse, est restée très animée. En effet, les dernières habitations creusées ont fini d'être achevées récemment. La voirie récente en excellent état et aux normes modernes ainsi que quelques aménagements urbains, témoignent d'une volonté de la municipalité de ne pas exclure «les troglos» de la communauté mais au contraire de les y intégrer.

En revanche, pour le village d'Arguedas, à l'ouest de Saragosse, la situation est totalement différente dans le sens où la population qui occupait les grottes creusées dans la falaise dominant la ville basse a dû être déplacée par la contrainte.

Les motifs de ces expulsions explicités par les habitants tiennent du fait que la totalité des familles établies dans la falaise échappaient aux impôts, ainsi qu'à la consommation d'eau et d'électricité. La cinquantaine de familles expulsées des grottes au début des années soixante ont depuis été relogées dans des logements sociaux.

L'organisation des habitations d'Arguedas par rapport au site était proche de celle de Cuevas de Almanzora (région de Guadix), avec notamment certaines maisons comportant des pièces établies sur plusieurs niveaux.



Figure 82 : L'ancien site troglodytique de Arguedas (Aragon). Source : https://www.flickr.com/

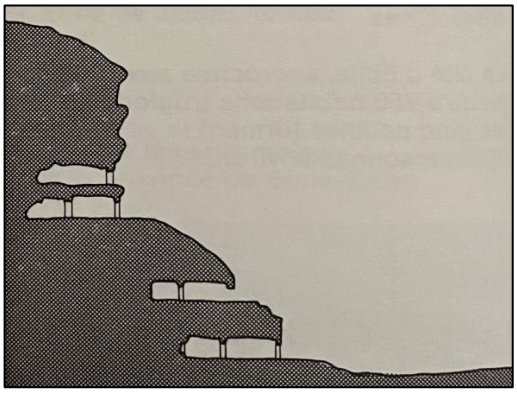


Figure 83 : Cuevas del Almanzora (Guadix). Coupe schématique sur le site des cuevas.

1.2.1.2 Typologie des « cuevas » aragonaises

Le mot cuevas, s'il désigne bien les caves à vin, désigne aussi les greniers à blé et par extension, dans un village, le quartier des « grottes», des maisons troglodytes.
Beaucoup de villages possèdent leurs « rue des grottes» (calle de las Cuevas) qui désigne soit un quartier de caves à vin ou grenier à blé, soit un quartier de caves reconverties en habitations, soit la partie du village constituée par des habitations creusées.

Les maisons rurales à La Muela (Aragon) :

Le quartier des cuevas du village de La Muela est constitué par deux rues au flanc d'une colline de marne calcaire. L'exposition y est plein sud. Le sol est constitué de couches horizontales de calcaire dur alternant avec des couches plus tendres. La technique de creusement exploite cette disposition géologique. La couche la plus dure, sorte de banc horizontal, est laissée en place et constitue le plafond. C'est dans les couches intermédiaires plus tendres que sont creusées les habitations. Les maisons de La Muela sont séparées de la rue par une cour.
Un muret délimite cet espace privatif où l'on trouve le puits et des annexes destinées aux animaux.

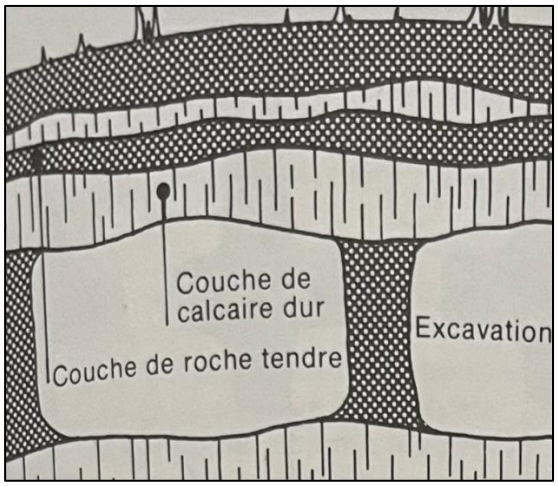


Figure 84 : Processus d'excavation, La Muela (Aragon).

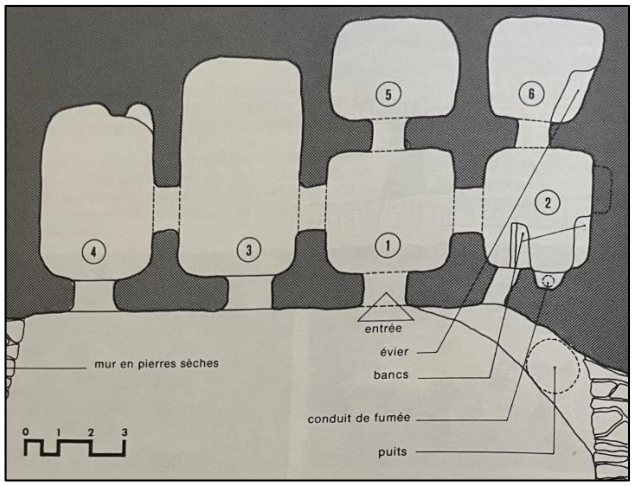


Figure 85 : Plan d'habitation à la Muela, Aragon (Espagne).

1. Vestibule d'entrée
2. Cuisine
3. Chambre
4. Chambre
5. Réserve
6. Cellier

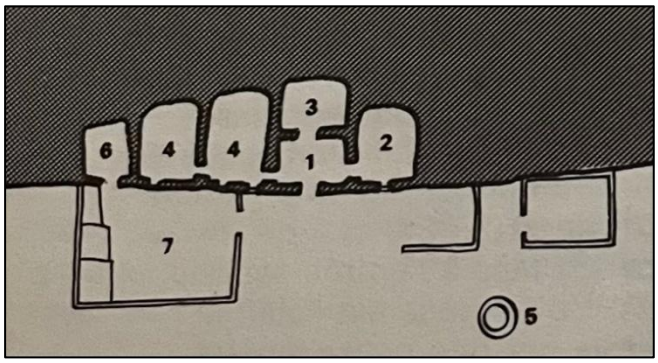


Figure 86 : Habitation a la Muela, Aragon (Espagne).

1. *Entrée*
2. *Cuisine*
3. *Remise*
4. *Chambres*
5. *Puits*
6. *Remise*
7. *Enclos de la basse-cour*

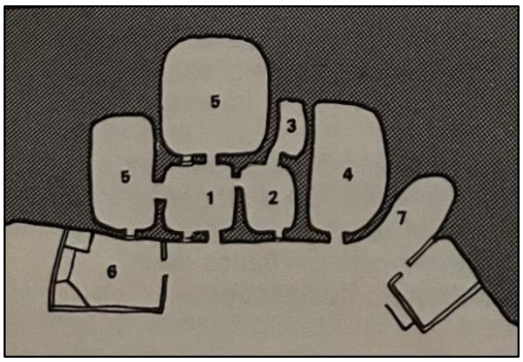


Figure 87 : Habitation a la Muela, Aragon (Espagne).

1. *Entrée*
2. *Cuisine*
3. *Cellier*
4. *Etable*
5. *Chambres*
6. *Enclos de la basse-cour*
7. *Remise de charrettes*

Les trois plans (voir figure 47, 48 et 49) montrent une souplesse d'interprétation d'un principe de distribution à partir d'un vestibule d'entrée. L'entrée (figure 47) s'effectue par un vestibule distribuant à gauche deux chambres directement éclairées sur l'extérieur (3 et 4) et à droite la cuisine (2) où se trouve la cheminée. La pièce (5) face à l'entrée est une réserve. Cette pièce est éclairée indirectement sur l'entrée par la porte ou parfois par une petite fenêtre donnant sur l'espace d'entrée (1). Il peut arriver, exceptionnellement, que cette pièce serve de chambre à coucher. Des constructions complémentaires, en pierre, viennent constituer les annexes de la basse-cour, l'étable, le grenier à foin. Un puits et quelques arbres fruitiers occupent la cour. La couleur des menuiseries, portes ou fenêtres, est le rouge vif ou le bleu qui se détache sur le blanc de chaux de la façade.

La Muela comptait une cinquantaine de cuevas creusées dans les années 1910, à une période de prospérité démographique. On peut penser que les habitants de ces cuevas ont vu en l'habitat souterrain, une solution plus économique que la construction en surface. Actuellement certaines sont restaurées en résidences secondaires par des habitants de Saragosse.

Habitations urbaines à Juslibol (Aragon) :

Les habitations de Juslibol sont presque toutes occupées, les unes en permanence, les autres le week-end seulement, leurs propriétaires travaillant et habitant la semaine à Saragosse.

Creusement des habitations de Juslibol :

Le sol est ici relativement homogène et le processus de creusement est différent de celui observé à La Muela. On met ici à profit la pente du terrain, ce qui donne comme résultat un ensemble maison-placette.

Phase 0 - La pente du terrain et la hauteur de façade que l'on se fixe (H) déterminent la longueur (L) à partir de laquelle on peut creuser les pièces d'habitation.

Phase 1 - Pour atteindre la cote (L) on créée un chemin étroit dans la roche jusqu'à l'obtention de la bonne hauteur (H). On réalise alors une première pièce.

Phase 2- A partir de cette pièce, on peut creuser de part et d'autre, pour réaliser de nouveaux locaux. On ouvre également un couloir extérieur (c) qui permet la ventilation des nouvelles pièces obtenues.

Phase 3- On peut créer une nouvelle pièce. En enlevant la terre laissée en place lors du creusement des couloirs, on crée la placette considérée comme faisant partie de la maison, donc propriété de ses habitants.

Les caves sont creusées progressivement par les habitants du village, généralement à la cadence de une pièce par an. Il faut donc de 3 à 5 ans pour constituer une habitation troglodytique de dimension moyenne entièrement. Généralement, il n'existe pas de chauffage autre qu'une cuisinière à bois dans ces maisons enterrées. La température à l'intérieur de ces logements oscille entre 16° et 20° suivant la saison.

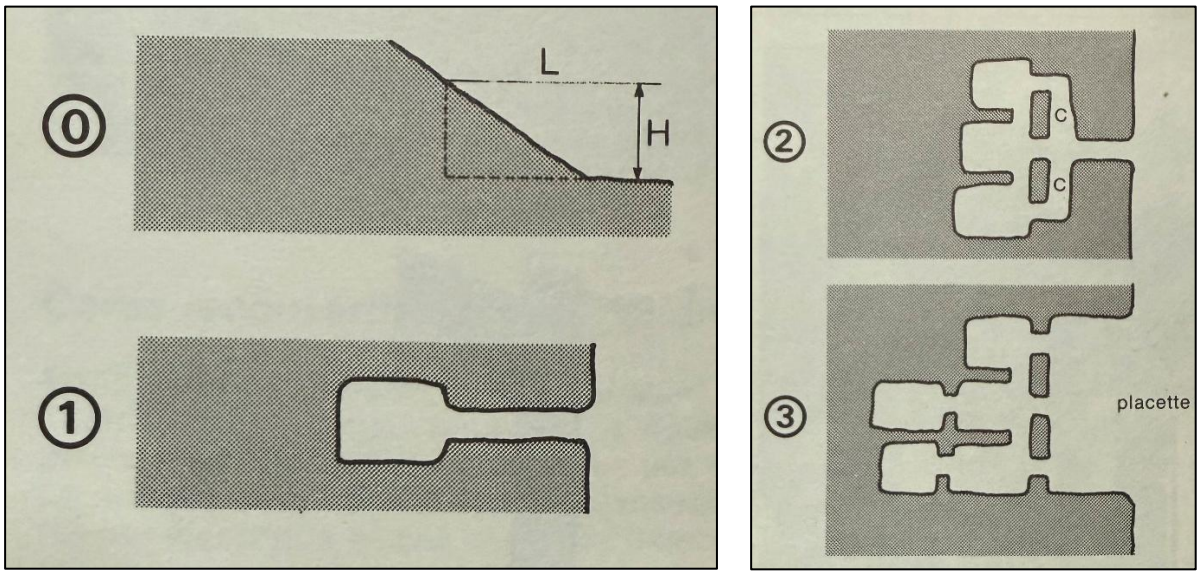


Figure 88 : Schéma du creusement d'une habitation, Juslibol (Aragon).

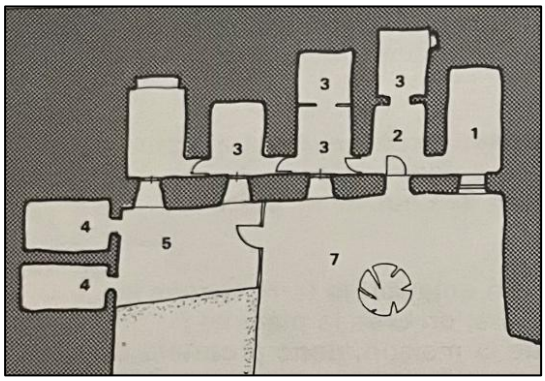


Figure 89 : Plan d'une maison enterrée de Juslibol

1. *Cuisine*
2. *Repas*
3. *Chambres*
4. *Animaux*
5. *Enclos des animaux*
6. *Placette d'entrée*

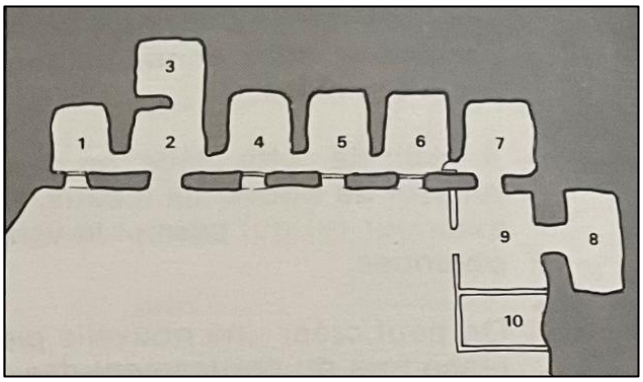


Figure 90 : Plan d'une maison enterrée de Juslibol

1. *Cuisine*
2. *Entrée*
3. *Débarras*
4. *Salle à mange*
5. *Chambre 1*
6. *Chambre 2*
7. *Bodega*
8. *Remise*
9. *Cour*
10. *Abri à mouton*

Le problème de la toiture :

Deux cas peuvent être observés : l'épaisseur du terrain au-dessus de l'habitation est suffisante (de l'ordre de 2m) pour éviter tout risque d'humidité ou bien l'épaisseur de la couche de terrain n'est pas respectée, il faut alors réaliser une toiture étanche en tuiles ou en plaques de fibrociment, qui est posée directement sur la couverture de l'habitat enterré.

Traitement des parois :

La paroi creusée est enduite d'une couche de plâtre très liquide puis on vient rattraper certaines irrégularités par une ou deux couches supplémentaires. Le sol est soit en terre battue soit recouvert d'un revêtement plastique. Une rigole creusée dans la terre, en bordure de toit, reçoit les eaux de pluie et les canalise. Un avant-toit de branches minces, bloquées par des pierres et de la terre, vient protéger la façade des ruissellements. Cet avant-toit est aujourd'hui le plus souvent réalisé en matériaux tels que des plaques de fibrociment ou en tôle.

Caves et greniers :

Les annexes d'un habitat troglodytique, liées à une activité agricole se rencontrent dans les villages regroupées en quartiers. C'est le cas à Posuello, à Fuendejalon (Navarre) ou à Lucena.

Caves reconverties en habitations :

Dans certains villages. comme Aïnzon, de nombreuses caves ont été aménagées en petites maisons de week-end. Les entrées autrefois en pierre sont maintenant soulignées par des encadrements de briques, de céramique ou de ciment peint. L'ensemble du quartier troglodyte est desservi par le réseau électrique et des escaliers extérieurs courent d'une cave à l'autre.

A Fuendejalon (Navarre), une vaste cave primitivement utilisée pour entreposer le vin a été réaménagée en bodega et restaurant. Cet ensemble complexe que rien, au vu du bâtiment d'entrée, ne laisse soupçonner, s'enfonce dans le sol en une série de pièces à des niveaux différents. De vastes salles ou de petites niches creusées délimitent des espaces extrêmement variés. L'ensemble est chauffé par deux poêles judicieusement disposés et un dispositif d'extraction d'air a été installé.

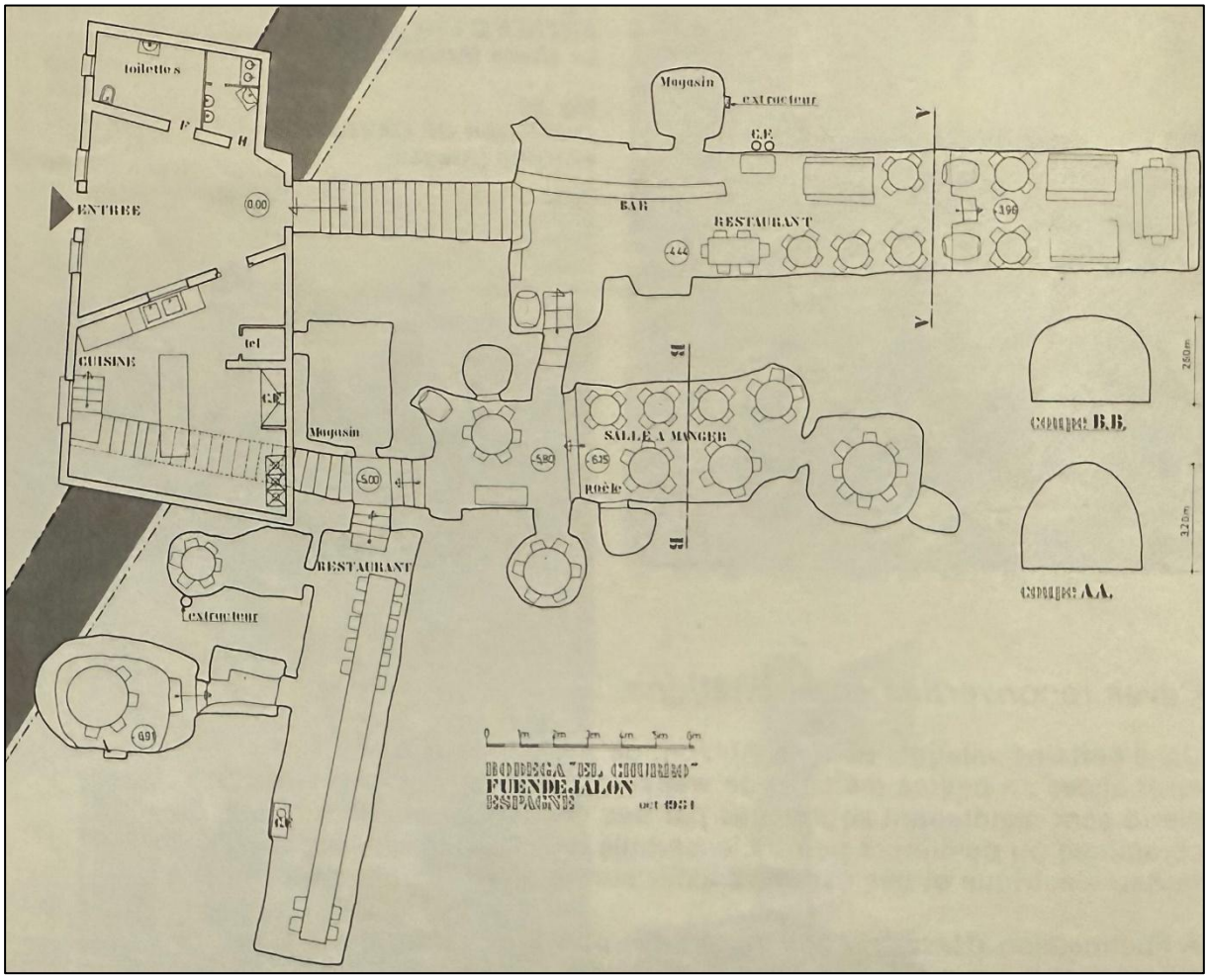


Figure 91 : Plan de la bodega « El Churro » à Fuendejalon, Navarre (Espagne).

Habitations creusées en terrain plat à Salillas de Jalon (Aragon) :

Le village de Salillas de Jalon constitue une singularité en Aragon qu'on peut comparer avec l'habitat enterré de Matmata (Tunisie) ou à celui de la province du Henan (Chine).
Ce qui est intéressant d'analyser, c'est le fait que des climats et des structures sociales et religieuses très différents ont conduit à des réponses relativement semblables au problème de l'habitat. La théorie de la causalité du climat ne s'applique pas ici, les amplitudes de température, le régime des précipitations étant très différents pour les trois régions.
Le point commun, dans ces trois cas, pourrait être la similitude des qualités mécaniques du sol, se prêtant bien au creusement.

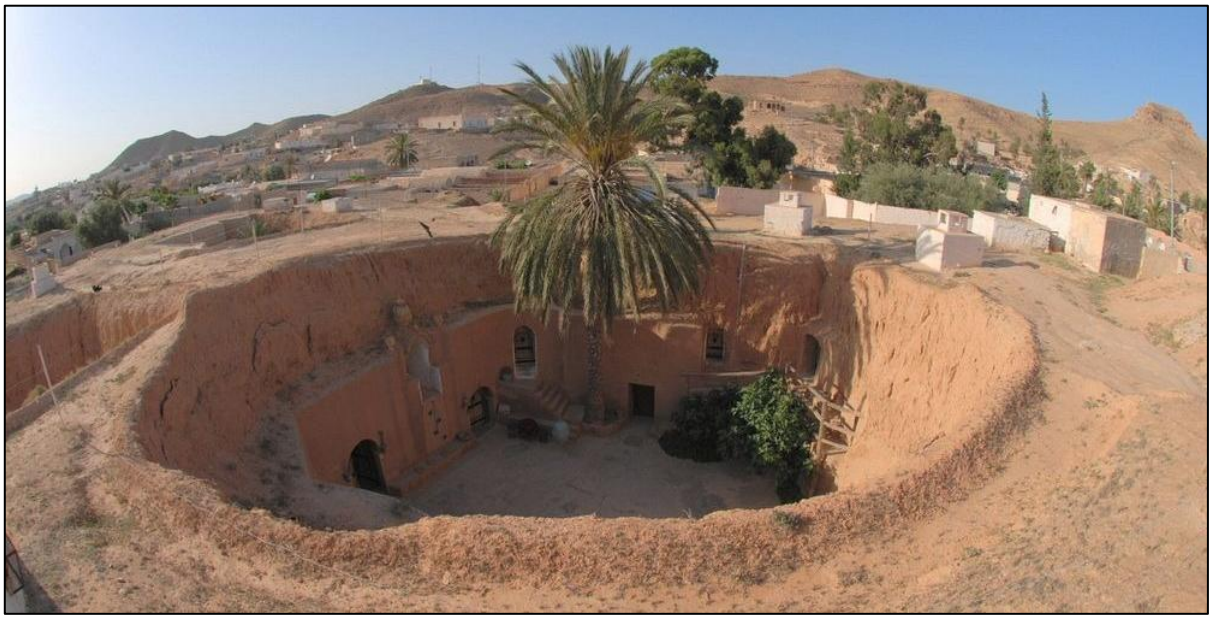


Figure 92 : Matmata (Tunisie). Cour creusée, sans protection.
Source : https://www.amusingplanet.com/



Figure 93 :
Muret en maçonnerie autour d'un puits de jour et conduit de cheminée d'un habitat trogloytique à Salillas de Jalon, Aragon.
Source : https://turismo.dpz.es/



Figure 94 : Salillas de Jalon, Aragon.
Muret ancien entourant la cour creusée.
Source : https://turismo.dpz.es/

C'est probablement le croisement d'un grand nombre de facteurs par des processus différents qui aboutit à produire des architectures relativement semblables. En effet, la forme architecturale d'un habitat ne se détermine pas avec un seul facteur unique. Nous allons le démontrer grâce au parallèle effectué entre ces trois formes d'habitat très semblables appartenant pourtant à des contextes géographique et de civilisation très différents.

A Matmata, comme à Salillas, un patio creusé verticalement dans le sol distribue des pièces creusées horizontalement à partir de ce puits. A Salillas, un muret entoure ces puits, de section carrée. Ce muret, fait de terre crue, était couronné par plusieurs lits de branchages de roseaux très serrés maintenus par de la terre et destinés à le protéger des dégradations dûs aux intempéries. Il a été peu à peu remplacé par un muret de maçonnerie.

Il n'y a à Salillas de Jalon qu'un seul niveau d'habitations alors que l'on trouve fréquemment deux niveaux à Matmata, où la section du puits est circulaire. L'accès aux habitations peut se faire de diverses façons. En terrain plat, c'est par un escalier ou un plan incliné que l'on accède à la cour surbaissée précédant l'habitation.



Figure 95 : Entrée d'une habitation à Salillas de Jalon. Source : https://turismo.dpz.es/



Figure 96 : Entrée d'une habitation à Salillas de Jalon. Source : https://turismo.dpz.es/

Parfois, une cassure de terrain permet un accès direct par une façade principale, le puits formant alors une cour intérieure qui éclaire les pièces en bordure mais où l'on n'accède pas depuis la voie publique. A la surface du sol, entre les ouvertures des puits et les accès, les conduits de fumée semblent posés à même le sol. Leur hauteur est d'environ 1.50 m.
Les voies de desserte et les sentiers se faufilent entre ces cheminées sur le « toit du village ».

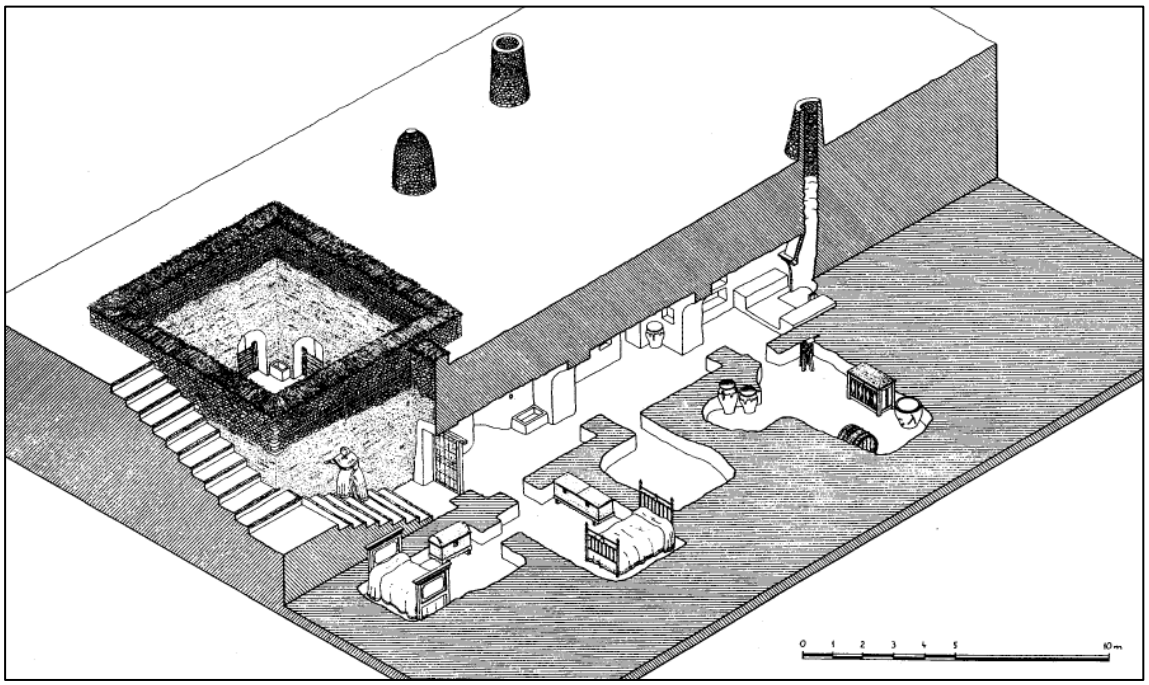


Figure 97 : Axonométrie d'une habitation creusée en terrain plat de Salillas de Jalon. Source : https://turismo.dpz.es/

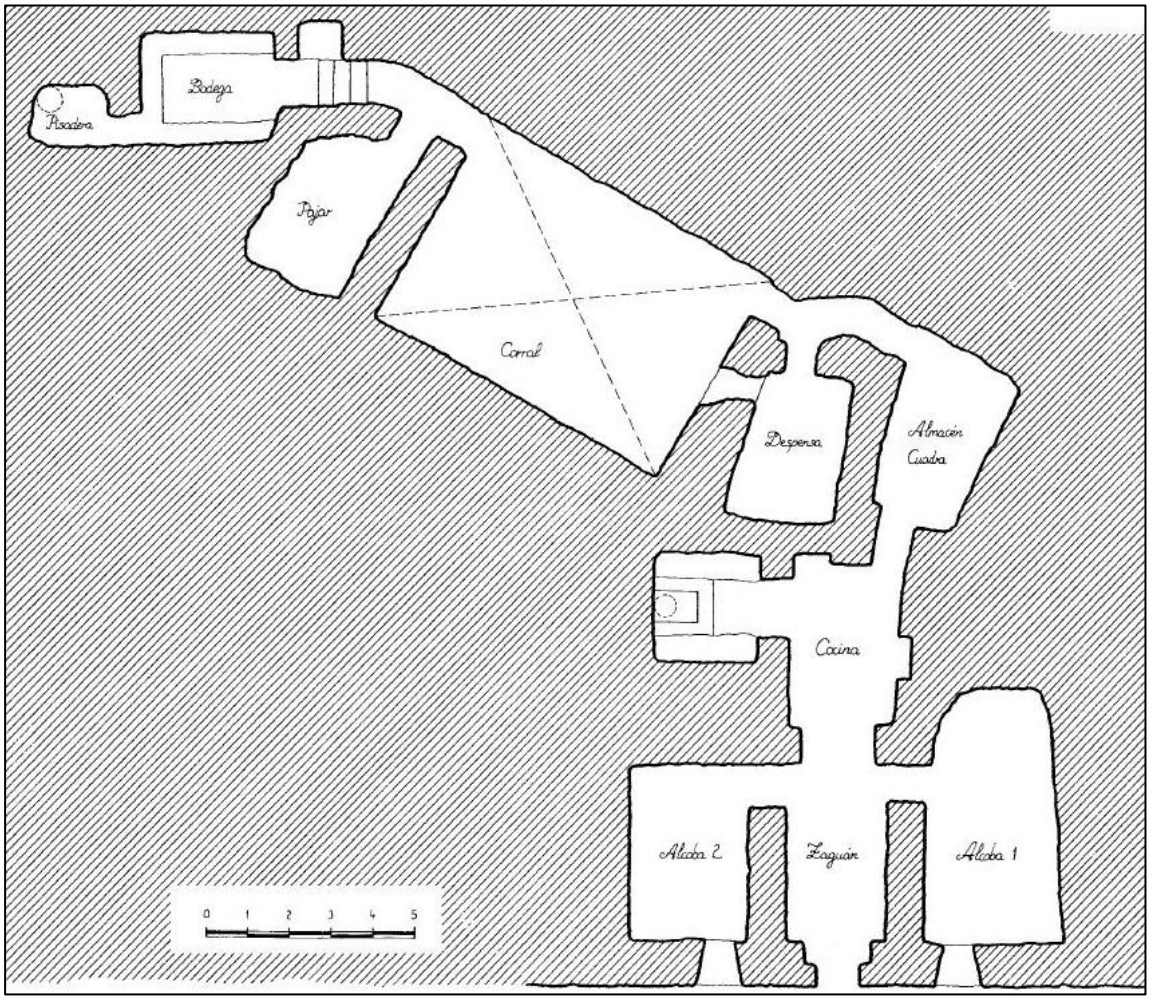


Figure 98 : Plan d'une habitation de Salillas de Jalon

1.2.1.3 Habitations troglodytiques en Andalousie

On trouve des troglodytes dans toutes les parties de l'Andalousie. En effet, les régions de Grenade, de Guadix, de Motril, où l'on trouve des caves de pêcheurs situées en bord de mer (site de Cala-Onda), renferment encore des milliers de maisons souterraines habitées.



Figure 99 : Vue d'une habitation du village troglodytique de Guadix dans la région de Grenade en Espagne.

Les étroites vallées encaissées de la Sierra andalouse restent l'écrin ibère en Espagne qui recèle le plus d'habitats troglodytiques. Dans cette partie du pays, les conditions climatiques alliées aux problèmes de propriété de la terre, réservée aux grands propriétaires, ont poussé les habitants aux revenus modeste à fuir les maisons traditionnelles pour se réfugier au creux des falaises et des reliefs exploitables dans des habitats troglodytiques.

Ceci dit, les habitats troglodytiques andalous les plus célèbres, sont sans conteste ceux encore habités de nos jours par les gitans de Grenade, les « cuevas del Sacromonte ». En effet, elles ont une origine très ancienne remontant au moins au VIIIe siècle. Profondes d'une dizaine de mètres, ces habitations souterraines sont confortables. Plusieurs pièces donnent en façade et permettent d'éclairer la partie salon-cuisine. Les chambres sont souvent situées en retrait, plus profondément dans la masse. Percées et creusées dans un conglomérat très friable, les caves d'habitation sont spacieuses. La dimension des pièces (on en compte parfois jusqu'à quinze) est en fonction de la résistance de la couche géologique dure qui forme le toit rocheux.
Les différentes habitations se répartissent au gré du relief, soit en plusieurs groupes superposés, soit en petits groupes disparates.

Dans le villages de Baza, près de Guadix, le processus de creusement est sensiblement le même qu'en Aragon. Il consiste, en premier lieu, à obtenir, par un creusement de la pente du sol, un front de taille de 2,5 m à 3 m de haut, qui permet d'entreprendre l'excavation des pièces d'habitation. La terre ainsi déblayée participe à la création de la plate-forme précédant la maison. Ce terre-plein sera souvent planté d'arbres fruitiers.

« A l'aide d'un pic, d'une brouette, d'une pelle, chacun peut évider au maximum l'intérieur de la grotte. Certaines parties, comme les plafonds, peuvent nécessiter des avis ou des aides complémentaires, données par des hommes dont le métier est la finition de ces parties spécifiques et délicates[1]».

Ces remarques démontre bien la part importante de l'auto construction dans l'élaboration de ce type d'habitat. Ainsi, l'essentiel de l'habitat troglodyte peut être exécuté par chacun et ne nécessite qu'un savoir-faire et une technicité (outils) que tout le monde possède. Néanmoins, on peut observer des exceptions, où la participation de « spécialistes » est indispensable pour le creusement et l'édification des grottes comme dans le Henan en Chine par exemple.

1.2.1.4 Adaptation climatique

Comparons et analysons l'habitat enterré aragonais et andalou. On observe un certain nombre de différences dans un contexte de site, de sol et de technicité très proche.

Orientation :

En Andalousie, l'orientation préférentielle est à l'ouest. En effet, au sud de l'Espagne, on cherche à se protéger surtout du soleil de midi. En Aragon les grottes recherchent le soleil sous une latitude beaucoup plus septentrionale, l'orientation préférentielle de ces habitations est alors davantage plein sud.

Le plan :

Les habitations s'organisent selon deux types de plans qui diffèrent dans leur mode de distribution des pièces, mais présentent des dispositions communes.

En Aragon les pièces d'habitation sont immédiatement disposées derrière la paroi qui constitue la façade. Les salles creusées au-delà de ce premier alignement sont rares et réservées à des fonctions de service, exceptionnellement transformables en chambres d'appoint. L'ensoleillement maximal des pièces de vie (chambres et autres) est recherché.

En Andalousie, au contraire, les chambres s'enfoncent profondément vers l'intérieur du sol et sont éclairées « en deuxième ou troisième jour». Souvent des « espaces tampons» (cuisines, celliers) séparent ces chambres, ou même les pièces de jour de la chaleur extérieure. Il y a donc une progression des espaces, depuis le climat extérieur (la cour) jusqu'au climat souterrain (la chambre) et l'on ajuste, selon leurs fonctions, les autres pièces d'habitation aux phases intermédiaires de cette progression. Ainsi dans l'organisation spatial d'un plan d'une habitation troglodytique en Andalousie, on peut distinguer clairement : un climat extérieur qui comprend la cour et ses annexes; une première zone tampon avec un cellier, débarras et la cuisine; une deuxième zone tampon comprenant le salon, le séjour et la salle à manger; et enfin, la zone la plus profonde : les chambres.

1. Amos Rapoport, Anthropologie de la maison, Paris, Ed, Dunod, 1972.

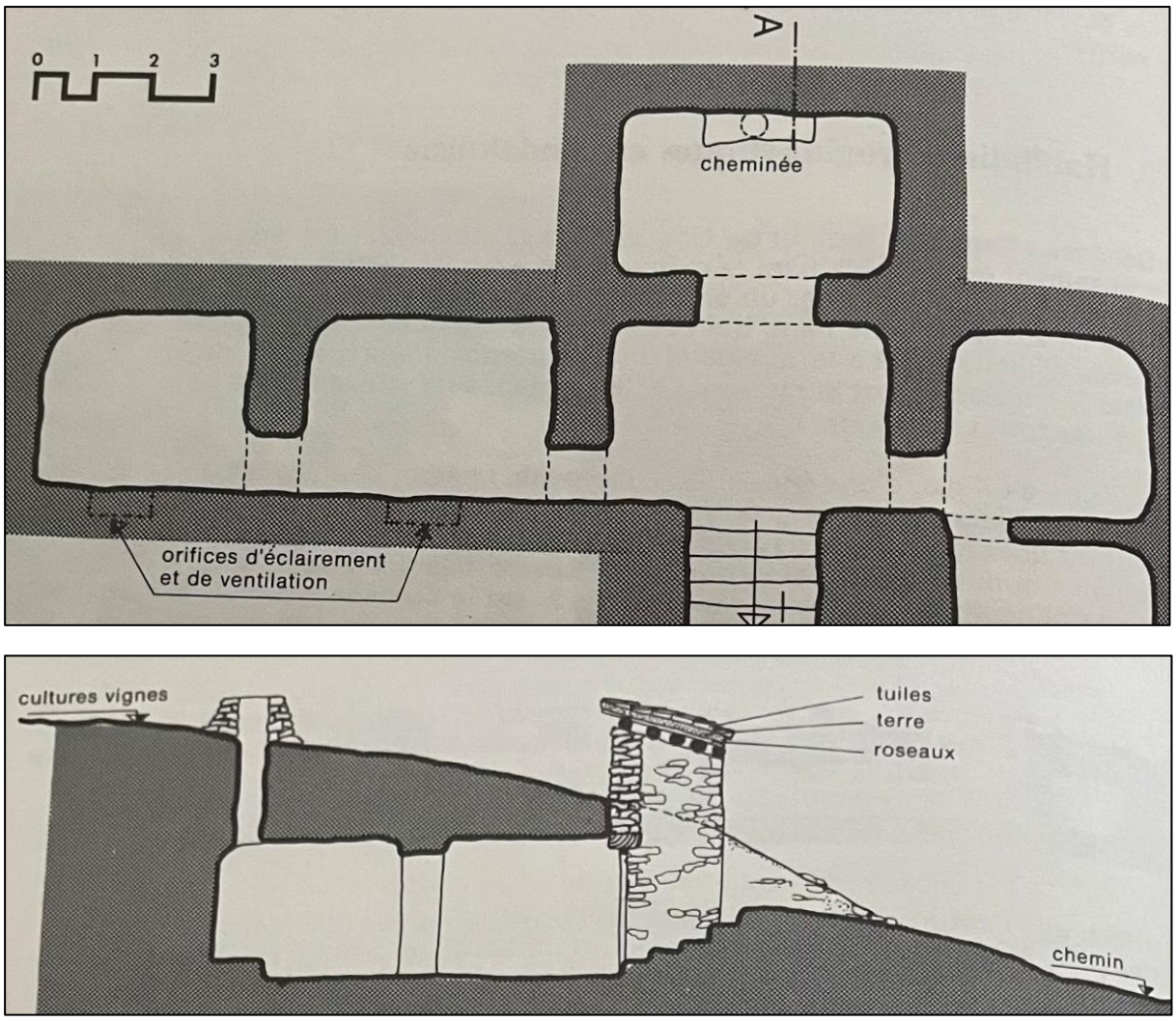


Figure 100 : Plan et coupe d'une habitation à Carinena, Aragon (Espagne).

D'autre part, il est à noter que le creusement d'une grotte de 4 à 5 pièces peut se faire en 6 mois, a raison d'un rythme d'extraction de 3 m de terre par jour[2].

Sur la page suivante, on peut s'apercevoir des différences et des similitudes que partagent les habitations troglodytiques en Andalousie et en Aragon dans le mode de distribution de leur plan respectif.

2. David Blasquez, Pour un habitat troglodytique, Bordeaux, U.P. d'architecture, 1978

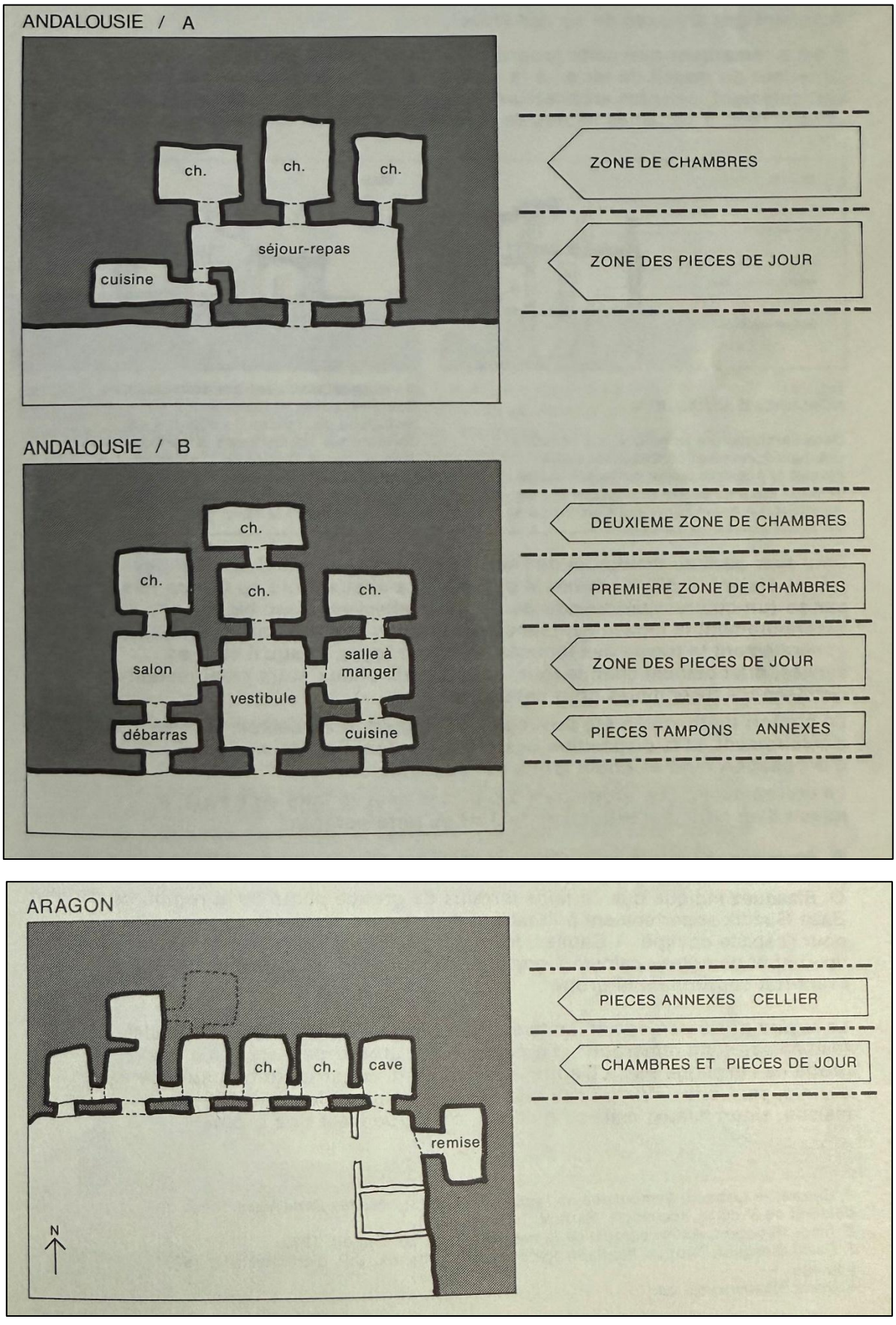


Figure 101 : Comparaison entre l'Aragon et l'Andalousie : adaptation du plan aux données climatiques.

Dans certains cas on observe deux cuisines et deux salles à manger. La cuisine et la salle à manger les plus enfoncées étant utilisées l'été et devenant des annexes de service l'hiver.

Il est à remarquer que cette progression, dans le sens horizontal, vers l'intérieur du massif de terre, à la recherche de la fraicheur, se retrouve, verticalement, dans les architectures islamiques ou la cave (ventilée) est utilisée l'été, à certaines heures de la journée, car c'est le lieu le plus frais.

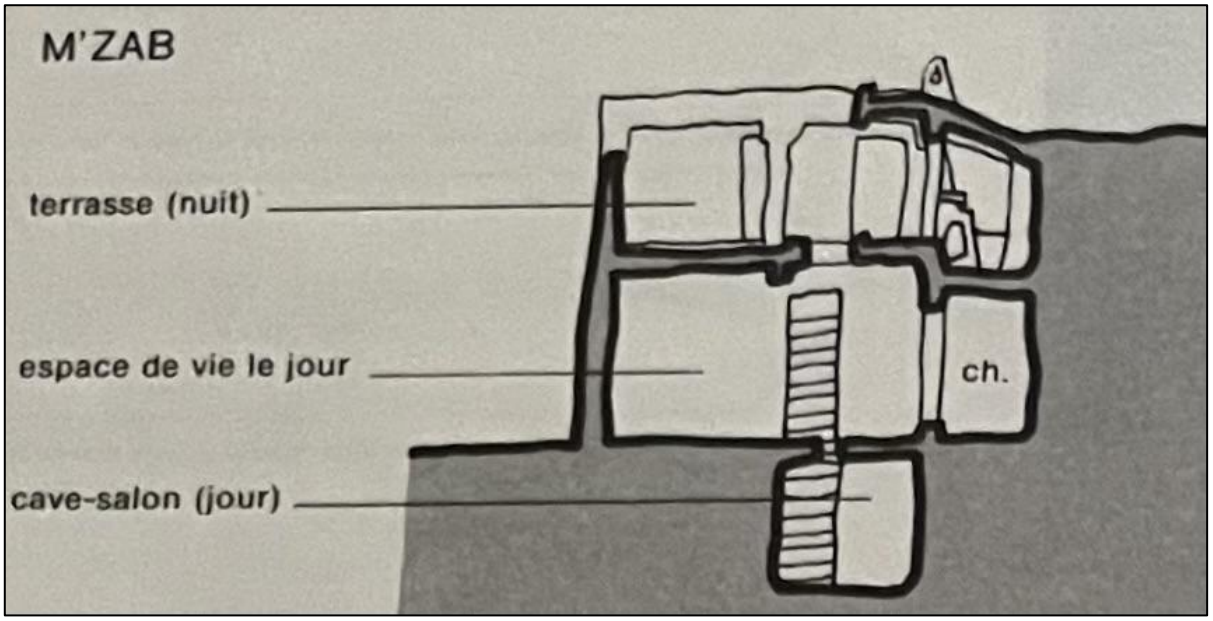


Figure 102 : Nomadisme quotidien dans une habitation troglodytique à M'zab en Algérie en plein désert du Sahara.

Pour tirer parti au maximum de l'éclairement parvenant à l'intérieur, les pièces étaient traditionnellement passées à la chaux de couleur blanche, trois ou quatre fois par an (un colorant produisant parfois des reflets roses ou bleus) afin de réfléchir les rayons solaires et réduire la chaleur à l'intérieur des habitations. Extérieurement, la façade du troglodyte est blanchie au moins une fois par an. Le foyer, lorsqu'il était en service, était blanchi également chaque jour. Dans la plupart des cas vu précédemment, le confort thermique a été privilégié par rapport aux qualités d'éclairement au sein de l'habitat enterré. La disposition des pièces en fonction de leur type d'occupation rend ce choix tout à fait acceptable.

1.2.2 L'habitat troglodytique en Tunisie

La nécessité de s'abriter des intempéries et d'éventuelles attaques fit choisir en Tunisie l'habitat troglodytique.

L'Afrique du nord tout entière est creusée à des fins d'habitat taillé dans une géologie très variée. En Tunisie, les hauts plateaux et les régions désertiques accueillent des populations recherchant sous la terre un refuge contre les hommes et les variations journalières de températures. En effet, fuyant le soleil de plomb, des populations entières vont essaimer dans le creux des falaises et occuper longtemps les lieux en les transformant en habitations.

Le Sud tunisien offre une grande variété d'habitations troglodytiques.
Les caractéristiques du climat, le relief particulier de ces zones désertiques ont fait de la région des ksour tunisiens, un refuge pour les tribus berbères face à l'envahisseur musulman, il y a plus de treize siècles.

Refusant de se laisser islamiser, c'est vers les montagnes de la chaine des ksour, les zones des steppes et de désert, que ces populations ont fui. Certaines tribus s'installent sur les crêtes montagneuses en établissant des villages fortifiés; d'autres, les Matmata, creusent a même le sol pour trouver un refuge.

Traversée par les montagnes de l'Atlas et majoritairement rocheuse, la Tunisie abrite de nombreux établissements troglodytiques depuis la préhistoire. Parmi ceux encore habités, on distingue deux types. Le premier, appelé matmātā, concentré autour de la région et du village du même nom, situé au sud de Gabés, sur les plateaux septentrionaux du massif du Ksour, se démarque par un troglodytisme vertical désormais célèbre. Toute la région entourant cette dernière localité est ponctuée de villages établis en terrain plat où les falaises inexistantes sont recréées artificiellement en forant de vastes cours autour desquelles s'enfoncent les grottes d'habitation. Les habitants ainsi abrités du soleil, communiquent de maison en maison par des couloirs et des galeries forés dans la masse rocheuse.

1.2.2.1 Demeures troglodytiques élémentaires

C'est dans la zone de labour, la plaine de la Djeffara, que l'on trouve cet habitat élémentaire, utilisé par les populations le temps des semailles.

Occupé deux fois par an (semailles et récoltes), ce type d'habitation est une réponse à un nomadisme à date fixe.

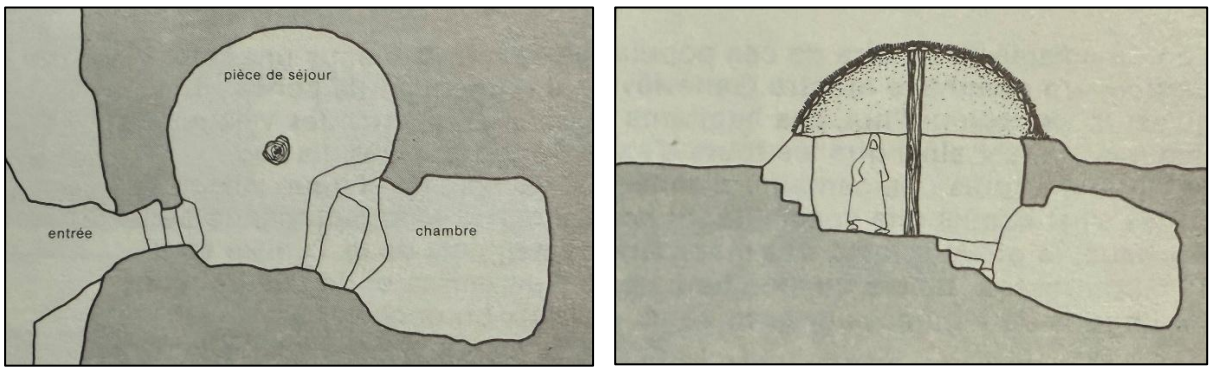


Figure 103 : Plan et coupe d'une habitation troglodytique élémentaire.

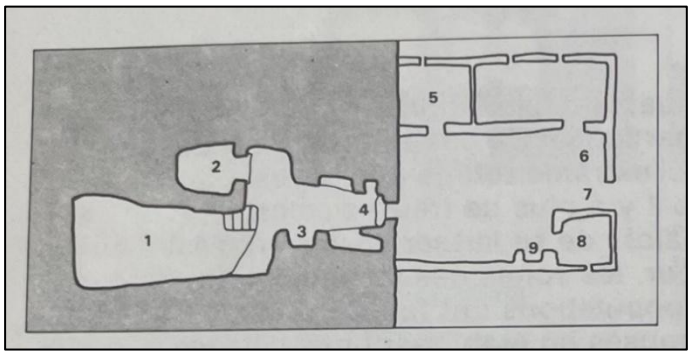


Figure 104 : Habitation du semi-nomade sédentarisé. Djebel (Tunisie).

1. *Pièce principale*
2. *Réserve*
3. *Niche à bois*
4. *Couloir*
5. *Chambre secondaire*
6. *Cour*
7. *Entrée*
8. *Cuisine*
9. *W.C.*

A la partie creusée est ajoutée une partie extérieure construite. Au nomadisme saisonnier d'un habitat vers un autre, s'est substitué un nomadisme à l'intérieur d'une seule habitation.
Ce nomadisme est journalier l'été : la partie creusée est utilisée en partie comme réserve, et en partie comme pièce de séjour durant les heures chaudes de la journée.

1.2.2.2 Les troglodytes latéraux

Le regroupement des villages de montagne est dicté par la morphologie du relief, suivant les terrasses qui, à Douiret par exemple, entourent un acropole conique et, à Ghoumrassen, surplombent les flancs d'une vallée. L'évacuation des eaux pluviales et la protection contre le vent et le soleil ont déterminé l'aménagement des villages berbères de Douiret ou de Ghoumrassen, ainsi que leurs structures extérieures.



Figure 105 : Ghoumrassen, la ville basse et les ghorfas devant les habitations troglodytiques, Tunisie.
Source : voyagevirtuel.co.uk



Figure 106 : Douiret (Tunisie), ghorfas dans l'espace extérieur des habitations troglodytiques.
Source : natureetvoyage.com

Creusé sur deux ou trois niveaux, le roc s'est peu à peu transformé en habitation.
Le mode de creusement des troglodytes latéraux exploite l'alternance des couches de sols durs (calcaires ou lits de silex) ou tendres.

Dans l'habitation troglodytique latérale, le lieu d'habitation est la grotte; les constructions extérieures organisées autour d'une cour, abritent les animaux et les greniers à grains[1].

En effet, certains ensembles abritent des espaces à fonctions diverses, comme à Douiret où l'habitation regroupe une huilerie souterraine, une habitation creusée et, extérieurement, des greniers. On arrive généralement à percevoir distinctement cette organisation en deux «temps» : la partie creusée et la partie construite extérieure.

L'organisation d'une maison est généralement la suivante : après une cour, on entre dans une première pièce creusée, longue, aux murs blanchis. A une extrémité une niche surélevée sert de chambre. Une deuxième pièce prolongeant la première sert de réserve à provisions. La cour accueille l'essentiel des activités du jour.

Comme à Arguedas (Aragon - Espagne) le gouvernement a fait construire un nouveau village aux pieds de Douiret, et comme en Espagne les habitants trouvent que les maisons y sont moins confortables que les grottes.

1. A. Louis, Tunisie du sud, Ksars et villages de crètes, Paris, Ed. du CNRS, 1975.





Figure 107 : Chenini (Tunisie), site troglodyte et son insertion dans la morphologie en terrasses des reliefs montagneux, versant sud. Source : carthagemagazine.com et mosaicnorthafrica.com



Figure 108 : Guermessa (Tunisie), sommet du village troglodyte. Source : mdig.com.br

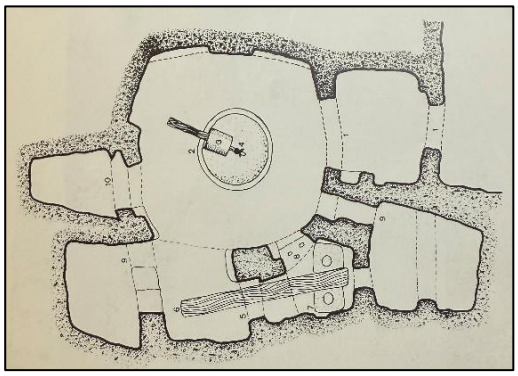


Figure 109 : Douiret, Plan d'un moulin à huile souterrain

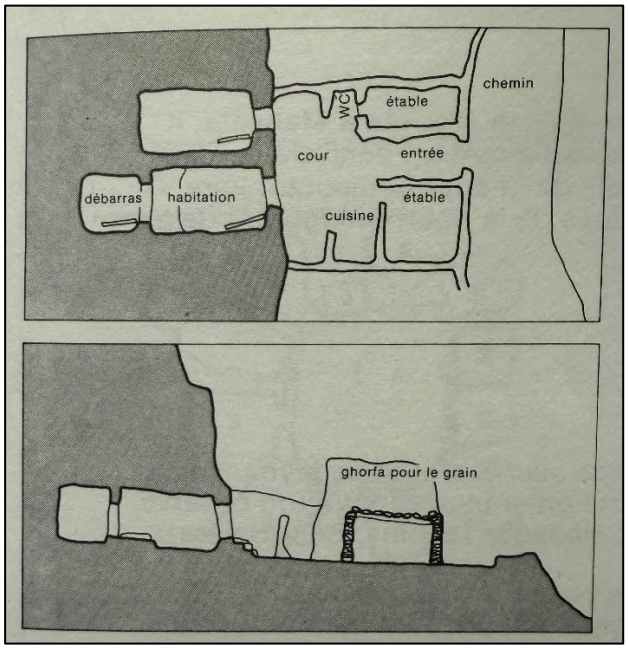


Figure 110 : Habitation troglodytique latérale.

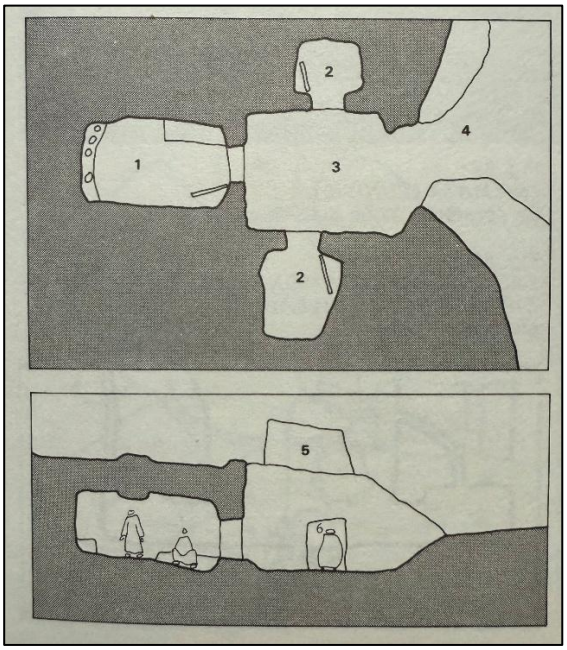


Figure 111: Habitation creusée latérale

1. Pièce principale
2. Pièce secondaire – réserves.
3.Cour
4. Accès à ciel ouvert.
5. Huile d'été.
6. Silo

1.2.2.3 Habitations creusées verticales

L'organisation des pièces creusées, rayonnant autour d'un puits central, trouve son expression la plus aboutie à Matmata (on observe également ce type d'habitat à Tamezred, Hadege, Techine, Beni-Haïssa).

La région est désertique, la végétation se réduit à quelques palmiers. L'habitat n'apparaît pas en surface et il faut s'approcher d'un des cratères qui s'ouvrent dans le sol pour le découvrir.

La matmâtă se compose d'une cour d'entrée, souvent sous la forme d'une exèdre, ouverte au niveau du sol, qui, par un tunnel, mène à un patio rectangulaire entouré de pièces creusées sur deux ou plusieurs étages ; les supérieures servent de grenier et les inférieures de pièces d'habitation.

À proximité des cours d'eau se trouvent les pressoirs à olives souterrains, où chaque élément, des cuves de stockage à la base de la meule, est taillé dans la roche. On distingue trois zones : l'entrée, avec ses cuves à huile et ses réserves d'olives creusées dans la roche ; le moulin circulaire actionné par un chameau ; et, juste à côté, la salle de pressage.

Ce modèle se retrouve également dans les villages situés sur les contreforts du Ksour, où l'on observe toutefois des habitations troglodytiques caractéristiques. Ces loggias troglodytiques de plain-pied, composées de pièces allongées avec des pièces de stockage à leurs extrémités, sont précédées d'une cour partiellement creusée et partiellement délimitée par des murs qui, à l'avant, s'ouvrent sur une entrée dissimulée par une cloison et recouverte de branchages.

De ce côté, on peut également ériger des ghorfas, greniers à deux ou trois étages, dont la structure reprend celle des habitations troglodytiques. La cour, à l'instar du patio du matmātā, abrite la cuisine extérieure, le lavoir et les écuries.

On peut établir un parallèle entre l'espace de la ville « spontanée », par exemple la ville médiévale, et celui des cités troglodytiques, surtout lorsqu'elles bordent des formations canalisées, comme en Cappadoce ou dans le sud de la Tunisie. Dans les deux cas, la forme de l'espace urbain est « résiduelle », issue d'un processus non prémédité : d'addition dans le premier cas, et de soustraction dans le second. À l'inverse, l'intention néoclassique repose sur des plans géométriques précis, ensuite entourés de bâtiments.



Figure 112 : Matmata (Tunisie), cratère d'une habitation creusée en puits.
Source : https://insideinside.org/

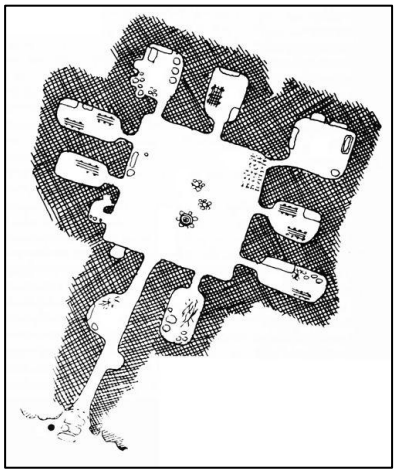


Figure 113 : Exemple d'habitation avec un puits carré, Matmata (Tunisie).

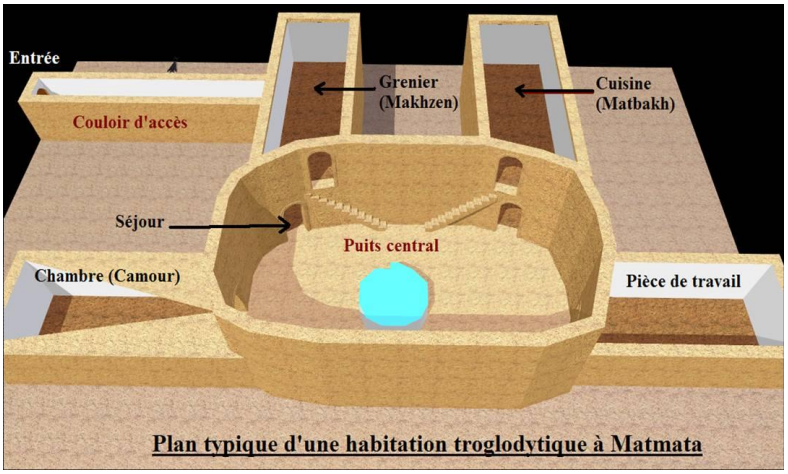


Figure 114 : Exemple d'habitation avec un puits circulaire (deux niveaux). Matmata(Tunisie).
Source : https://www.natureetvoyage.com/

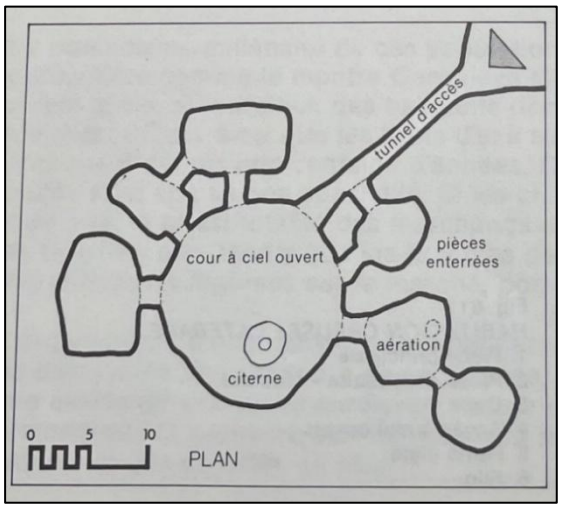


Figure 115 :
Exemple d'habitation avec un puits circulaire (un niveau). Matmata(Tunisie).

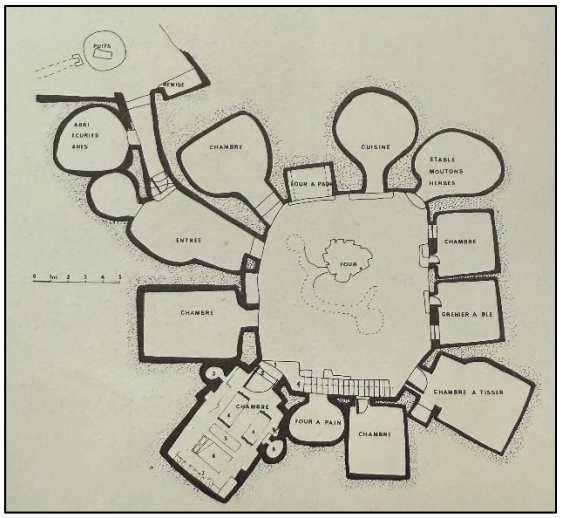


Figure 116 :

Exemple d'habitation avec un puits carré. Matmata(Tunisie).

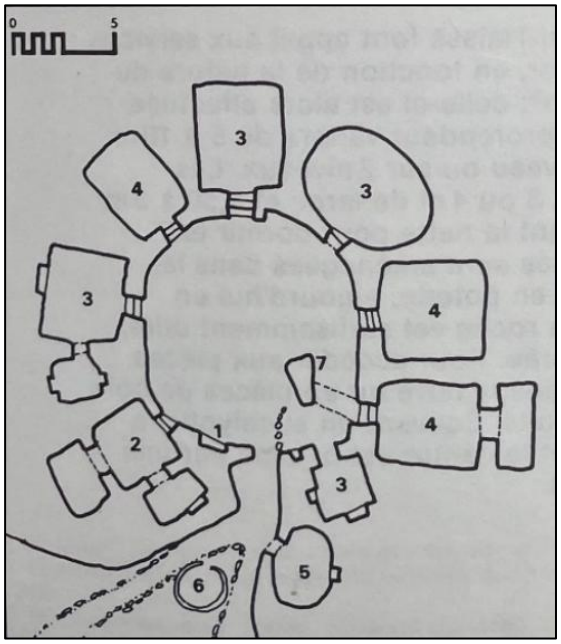


Figure 117 : Habitation troglodytique sur deux niveaux. Matmata (Tunisie).

1. *Cour centrale*
2. *Chambre principale*
3. *Salle pour réserves*
4. *Pièces d'habitation*
5. *Cuisine*
6. *Hutte d'été*
7. *Arc et pilier de soutènement*

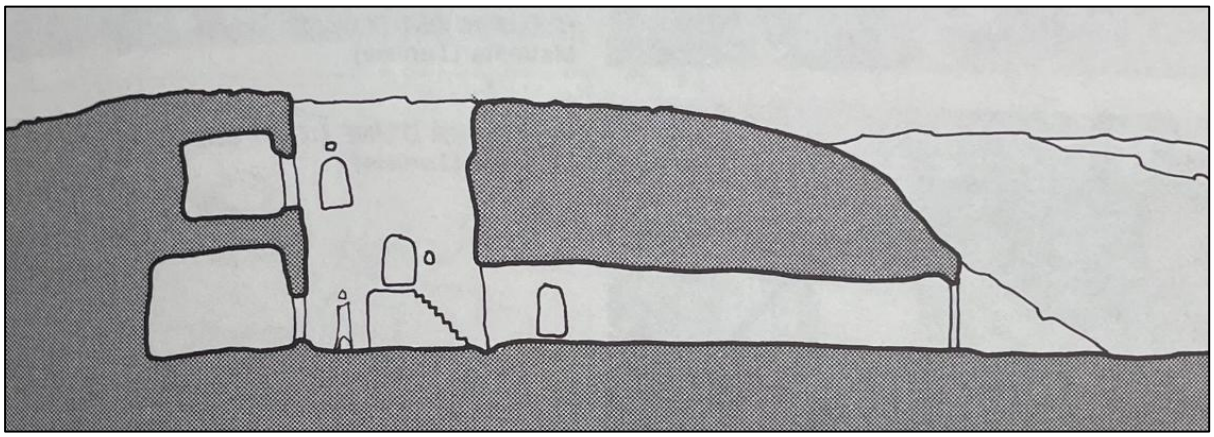


Figure 118 : Habitation creusée sur deux niveaux



Figure 119 : Intérieur d'une cour creusée (deux niveaux), Matmata (Tunisie).
Source : https://wikiway.com/

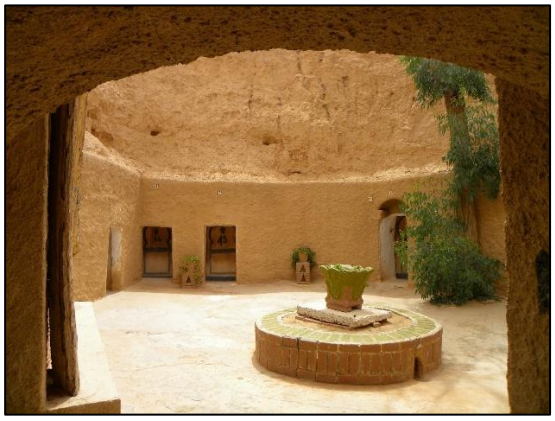


Figure 120 : MATMATA (TUNISIE). Un eucalyptus et un puits central occupent souvent le fond de la cour.
Source : https://viajerosocultos.com/

Comme les Andalous, les Beni-Haïssa font appel aux services d'une personne compétente pour déterminer, en fonction de la nature du sol, l'emplacement où aura lieu l'excavation[2]; celle-ci est alors effectuée avec un puits soit circulaire, soit carré. Sa profondeur variera de 5 à 10m selon s'il s'agit d'un habitation sur un niveau ou sur 2 niveaux. Les chambres creusées sont de 4 à 7 m de long, 3 ou 4 m de large et 2,50 à 2,30 m de hauteur. L'emplacement surélevé creusé dans la roche est utilisé pour dormir.

Des cavités sont aménagées dans la paroi pour contenir divers objets. Parfois, si la roche est suffisamment dure, certaines niches conservent une paroi ajourée. Pour accéder au pièces du niveau supérieur, il y a des escaliers taillés dans la terre ou en pièces de bois fichées dans la paroi. Souvent un eucalyptus se tient dans une partie de la cour dont le centre est occupé par une citerne destinée à recueillir l'eau des pluies.

2. N. Charneau, J.-C. Trebbi, Maisons creusées, maisons enterrées, Paris, Ed. Alternatives, 1981

1.2.3 L'habitat et l'urbanisme troglodytique en Cappadoce

La Cappadoce offre une incroyable variété le cavités habitées : églises, monastères, tombes et cités d'importance…

Dès la préhistoire, les cavités naturelles de la Cappadoce, ainsi que le relief très accidenté, ont offert des possibilités de protection et de refuge aux populations fuyant les vagues successives d'invasion. Confrontés à l'aridité des terres et à leur peu de fertilité, les populations de Cappadoce ont eux aussi développées leur propre typologies d'habitats troglodytiques.

Le tuf d'origine volcanique, et les formes particulières que l'érosion lui a conférées, en laissant en place uniquement les parties les plus dures de la roche, a constitué une « structure d'accueil» privilégiée pour le développement d'une architecture et d'un urbanisme rupestres. Tirant parti des caractéristiques morphologiques de ces plis tectoniques, des civilisations troglodytes successives au cours des 7000 dernières années ont continuer de façonner leur habitat, ce qui a permis une appropriation de cette région et de cette architecture de leur part.

Il est intéressant de constater comment des sociétés et civilisations aussi différentes comme les hittites, les grecques, les romains, les chrétiens, les seldjoukides et les ottomans, ont tiré parti de l'originalité physique et géologique de cette région pour créer une architecture qui s'intègre parfaitement au paysage.

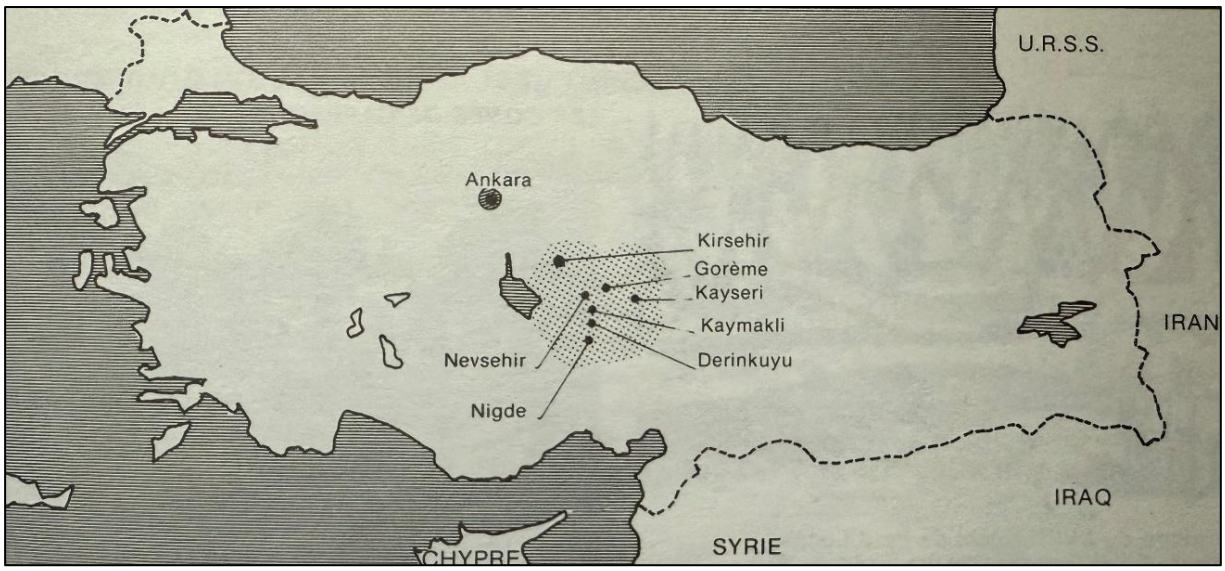


Figure 121 : Carte représentant les principaux régions troglodytiques en Cappadoce.

1.2.3.1 Conditions géologiques et climatiques

Il y a eu conjonction de trois facteurs qui ont permis de produire les formes actuellement observées :
- les conditions géologiques.
- l'érosion (vent, précipitations, gel) déterminant une morphologie particulière.
- l'action de l'homme sur ces « ébauches» ainsi épannelées par l'érosion.

Le sol est composé de lave éruptive dispersée en couches homogènes sur un plateau calcaire par le volcan Argee, dans un rayon de 100 kilomètres. C'est l'action de l'érosion sur ce tuf relativement tendre qui a modelé les formes caractéristiques des cônes et cheminées des fées, en attaquant plus ou moins les cendres de duretés diverses.

Le climat continental donne des étés relativement secs, le minimum de précipitations se situant en juillet, août, septembre. Les hivers sont froids et enneigés de décembre à février. Les amplitudes saisonnières de températures sont grandes, renforçant encore le caractère d'adaptation au climat de cet habitat.

1.2.3.2 Origines du peuplement troglodyte

C'est essentiellement grâce à l'émigration chrétienne vers l'ouest, fuyant la pression musulmane au VIIe siècle, que l'on doit l'établissement et le développement des habitats troglodytiques de Cappadoce. Le peuplement de la région commence sur des bases défensives avec la création des villes souterraines refuges sur plus de sept niveaux à l'image de Kaymakçi, Derinkuyu, Ozkonak, Cardak qui abritèrent une population importante.

Une multitude d'églises rupestres voient ensuite le jour, dans la vallée de Gorème en particulier, puis, quelques ermitages et enfin des monastères. L'ensemble de ces églises est le support d'un art de la fresque d'une richesse extraordinaire. En effet, on trouve la trace dans cette architecture religieuse, d'indices attestant la participation d'architectes et d'artistes arméniens parvenus à un haut degré de maîtrise et d'expression dans l'architecture soustractive.

Les habitations se développent autour des églises tout comme les grottes destinées à loger animaux et réserves. Un grand nombre de cônes sont ainsi investis et les agglomérations de population naissent.



Figure 122 : Les cônes de Cappadoce.
Source : https://www.actualitix.com/

Le triangle formé par les villes de Kirsehir, Kayseri et Nidge, situé en Anatolie centrale, correspond à la concentration la plus remarquable d'ensembles troglodytiques, avec en particulier le site de la vallée de l'Urgüp.

Les troglodytes de Cappadoce sont de deux principaux types. Les premiers sont creusés dans les cônes rocheux appelés familièrement « cheminées de fées », les seconds se nichent dans le creux des falaises. Tous ont des points communs quant à la distribution des habitations et l'importance de certains aménagements.

Les habitations sont divisées le plus souvent dans leur hauteur en plusieurs pièces à destinations différentes. Fournils, étables, grenier à grain, pièce de vie et pigeonniers sont les traits communs à toutes les maisons.

Mais l'existence d'un troglodytisme aussi florissant dans cette région est aussi due au passage par ces contrées des caravanes des routes de la soie. En effet, si l'on compare l'ensemble des plus importants sites troglodytiques de la région avec les points de passage obligés des caravanes des routes de la soie, on reste surpris de leur concordance.

1.2.3.3 Typologie de l'habitat troglodytique en Cappadoce

Dans la vallée de Zelve, les cônes sont cernés par les parois du plateau sus-jacent, où de nombreuses structures troglodytiques, semblables à des murs, sont creusées et superposées. Dans ces dernières, la typologie dominante consiste en un regroupement de pièces autour d'un espace commun en forme d'exèdre, encastrée dans la roche et ouverte sur la vallée.

Les grandes formations coniques d'Ortahisar et d'Üçhisar, quant à elles, constituent de véritables mégastructures. Dans le château d'Üçhisar, les vingt-cinq niveaux de perforations superposés sont enveloppés extérieurement et intérieurement par des chemins qui unissent des espaces civils et sacrés auxquels des structures ont été récemment ajoutées, construites principalement pour endiguer l'action érosive.

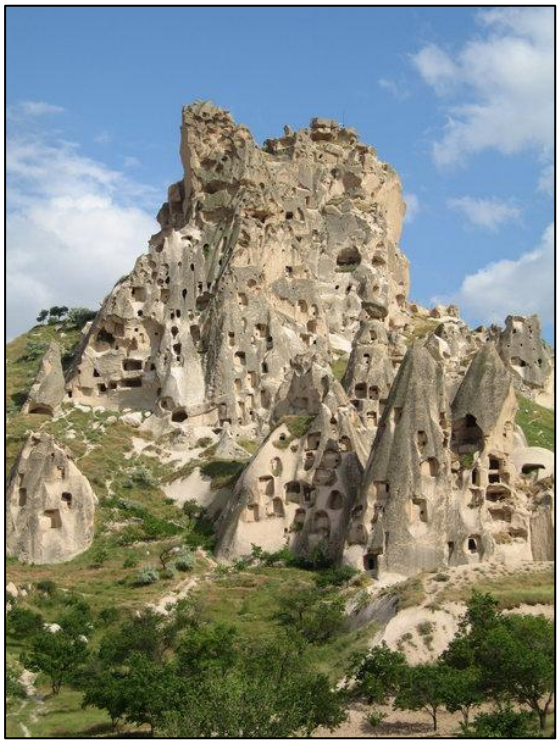


Figure 123 : CONE A UCHISAR (CAPPADOCE).
Source : https://www.rgbstock.com/

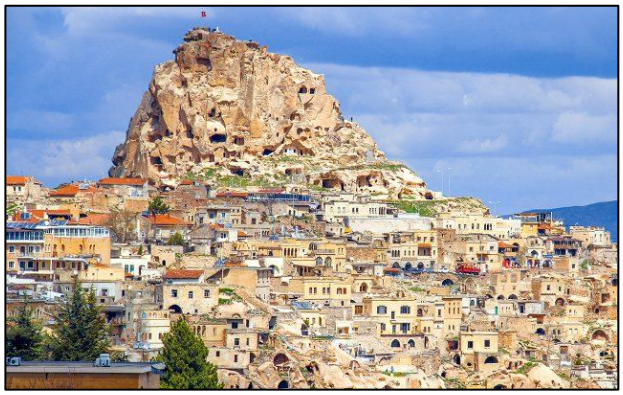


Figure 124 : CHATEAU DE UCHISAR (CAPPADOCE), Cirque de Göreme.
Source : yoldaolmak.com



Figure 125 : VALLLEE DE ZELVE (CAPPADOCE), Cheminées de fées et villages troglodytiques.
Source : fr.vecteezy.com

La nature du matériau creusé, et les reliefs modelés par l'érosion, ont permis le développement de trois formes principales d'urbanisation.

Habitations creusées dans les cônes :

Les cônes constituent un véritable «tissu» s'organisant sous forme de village, comme à Avcilar.

À Avcilar, les éléments individuels, plus éloignés les uns des autres et occupés par un seul groupe familial, sont complétés par des façades et des clôtures contre lesquelles s'appuient écuries et entrepôts.

L'intérieur des cônes-pyramides est creusé en pièces d'habitation sur plusieurs niveaux; les parties extérieures construites viennent en complément pour délimiter une cour et des abris pour les outils, les matériaux ou les animaux comme des entrepôts, des ateliers ou des écuries. Certains cônes permettent le creusement de plusieurs unités familiales, s'organisant sur 5 à 6 niveaux ou un programme plus complexe, tel le monastère de Saint-Siméon à Zelve, unissant la chapelle et, desservie par un accès séparé, l'habitation de l'ermite sur deux niveaux.



Figure 126 : AVCILAR (CAPPADOCE),
Habitations creusées dans des formations coniques.
Source : madeinturkeytours.com



Figure 127 : AVCILAR (CAPPADOCE),
Habitations dans les cônes.
Source : okvoyage.com



Figure 128 : HABITATIONS TROGLODYTIQUES.
Vallée de Zelve (Cappadoce).
Source : it.dreamstime.com



Figure 129 : HABITATION TROGLODYTIQUE INTERIEUR.
Göreme (Cappadoce).
Source : istockphoto.com

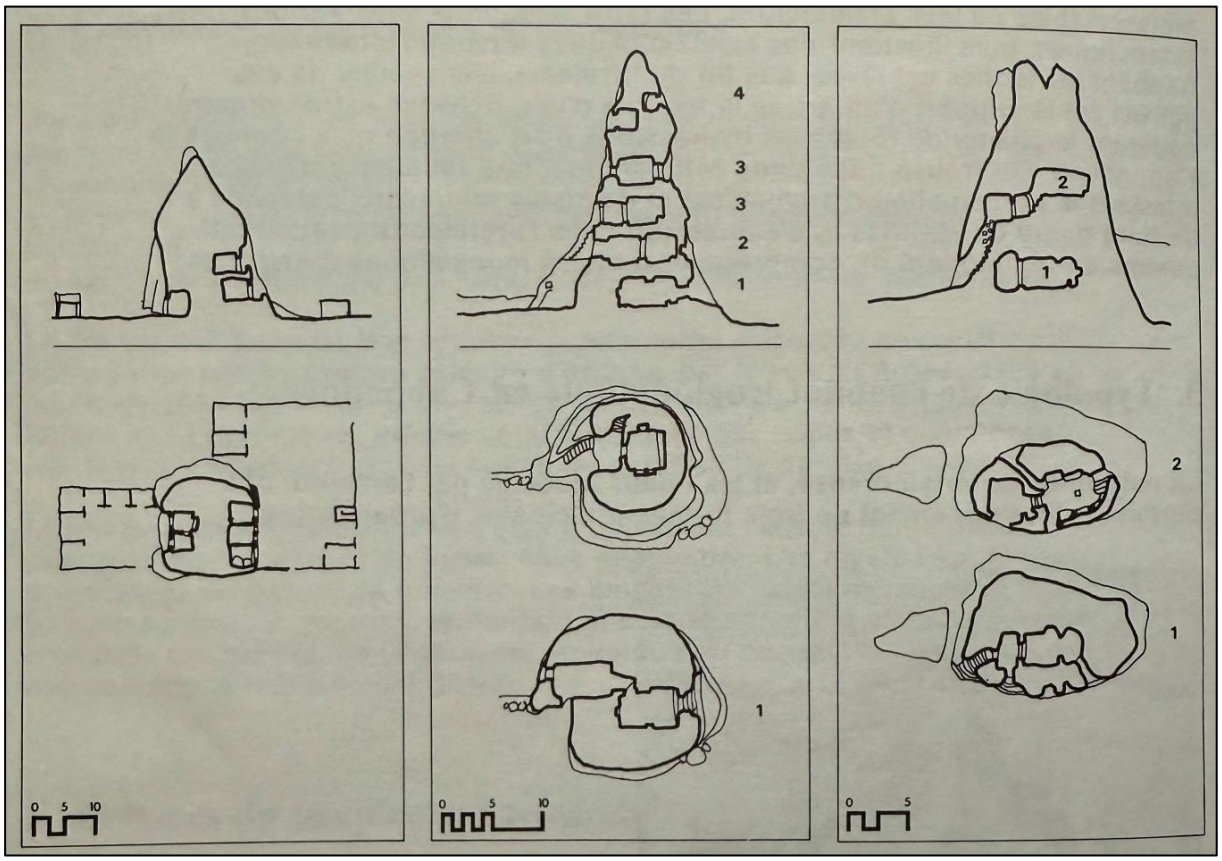


Figure 130: AVCILAR (CAPPADOCE). Habitation simple à cônes.

Figure 131 : CONE COMPRENANT DEUX UNITES FAMILIALES. L'aménagement s'étage sur six niveaux.

1. *Ecurie*
2. *Grenier*
3. *Séjour*
4. *Pigeonnier*

Figure 132 : MONASTERE DE ST-SIMEON (ZELVE).

1. *Chapelle*
2. *Habitation*

Villages à parois :

Selon la configuration naturelle exploitée, on peut distinguer soit une organisation linéaire soit une organisation en amphithéâtre.

Organisation linéaire :

Le village s'établit dans la paroi que constitue le flanc d'une vallée.
Les habitations, ermitages, monastères, s'étagent sur plusieurs niveaux, les liaisons se font en fond de vallée mais aussi par des sentiers, escaliers, cheminant sur le flanc même des contreforts. Les trois vallées convergeant sur Zelve offrent ce type de village à parois.

Organisation en amphithéâtre :

Ici, le contrefort percé d'habitations est incurvé, déterminant un cirque naturel, donc un espace centré, convergent. Le cirque rocheux de Gorème abritant à lui seul plus d'une dizaines d'églises ou l'amphithéâtre de Cavusin sont les plus emblématiques pour ce type d'organisation.

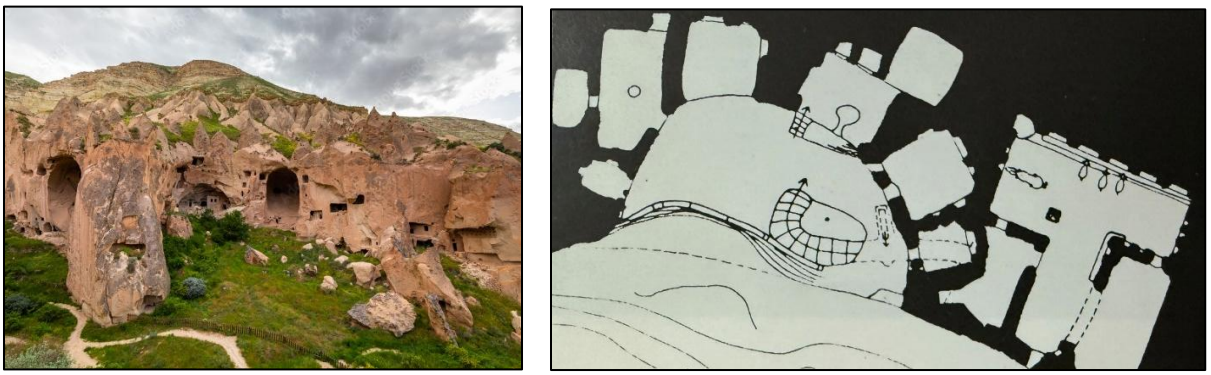


Figure 133 : HABITATION DANS UN VILLAGE A PAROI. Vallée de Zelve (Cappadoce) ; Plan du village paroi de Zelve. Source : stock.adobe.com

Les villages châteaux :

A Uchisar et Ortahisar, le cône creusé, par ses dimensions, n'est plus à l'échelle d'une habitation mais d'un village, regroupant un grand nombre de cavités. A Ortahisar, l'organisation urbaine est complète, et l'ensemble d'habitations est organisé en groupes; des espaces de voisinage à usage commun apparaissent, ainsi qu'une place principale offrant magasins et services collectifs. Les habitations creusées sont ici prolongées à l'extérieur par des parties construites.

Villes souterraines :

La ville souterraine de Derinkuyu pouvait abriter 20 000 familles et s'étage sur 7 niveaux en sous-sol, développant un urbanisme souterrain de défense. Les locaux extrêmement variés selon leurs fonctions sont reliés par un réseau de galeries que l'on peut obstruer en roulant de lourdes meules de pierre, de 1,50 m de hauteur, qui viennent isoler de l'agresseur une population qui a su organiser son espace souterrain pour les longues périodes d'autarcie.

La ville de Kaymakli, comprenant une dizaine de niveaux souterrains, s'étend sur plusieurs kilomètres. Creusée probablement au Ier siècle, elle servit à cette époque de refuge aux habitants devant l'invasion romaine. Comme à Derinkuyu, l'organisation est complexe: places, entrepôts, moulins, pressoirs, réserves d'eau ou de provisions, églises, cimetières et puits d'aération. Cette organisation permettant la production, alliée aux dispositions de défense, assurait aux populations une longue période d'autonomie devant les diverses vagues d'envahisseurs, romains d'abord, arabes ensuite.

La structure organisationnelle de ces deux villes était dictée non seulement par des raisons défensives ou économiques (la difficulté d'importer des matériaux de construction), mais aussi par l'adaptation au climat, afin d'obtenir une isolation thermique quasi impossible à atteindre par d'autres moyens.

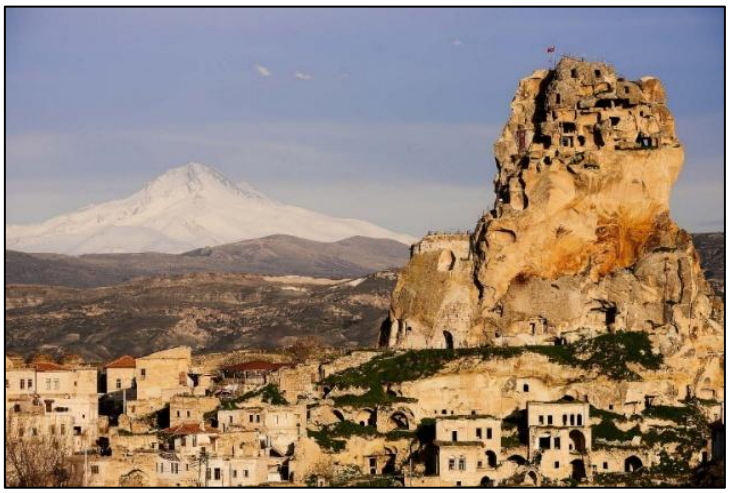


Figure 134 : ORTAHISAR (CAPPADOCE). Source : https://www.archetravel.com/

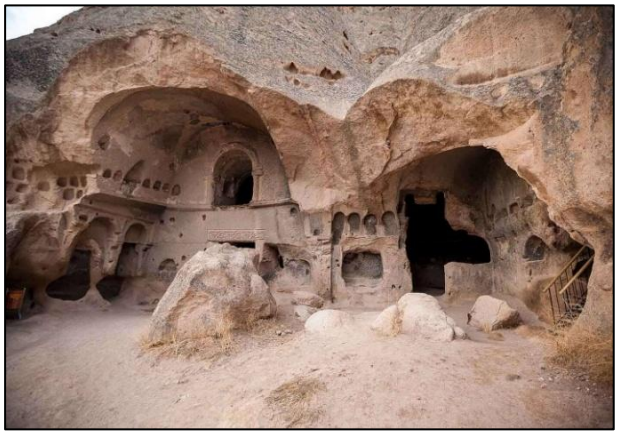




Figure 135 & 136 : DERINKUYU (CAPPADOCE). Source : https://www.historicmysteries.com/

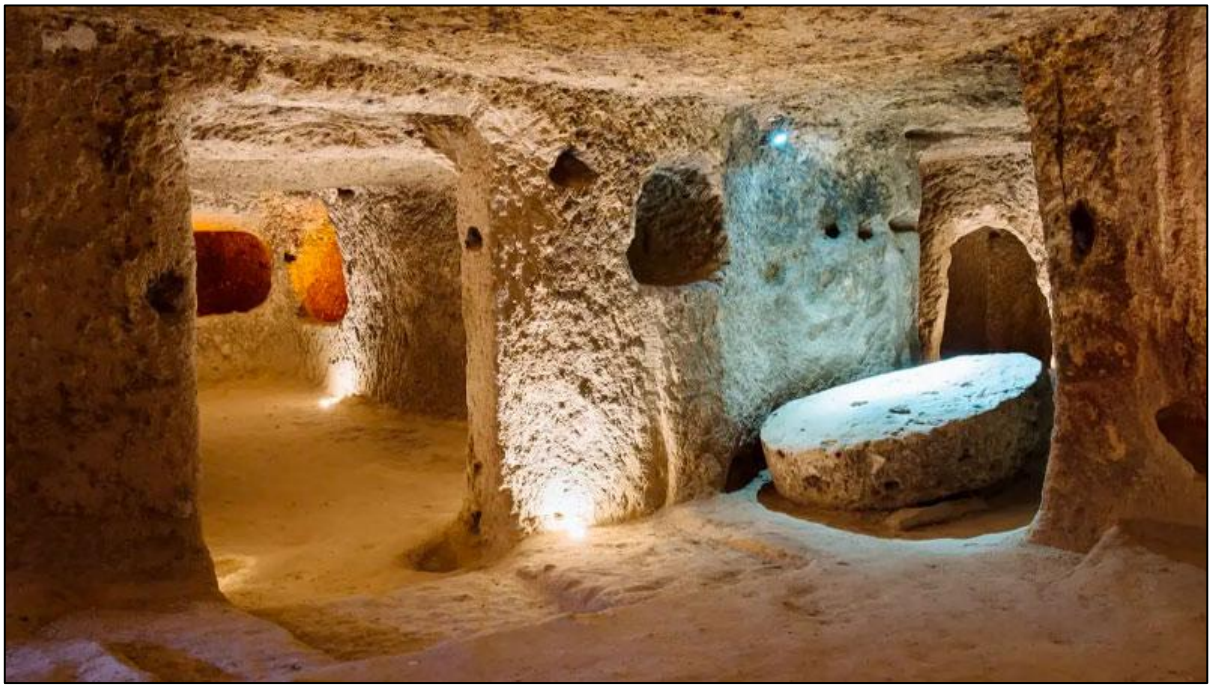


Figure 137 : DERINKUYU (CAPPADOCE). Système de fermeture d'une galerie de la ville souterraine par un disque de pierre.

1.2.4 L'habitat troglodytique en Chine

En Chine, seules les contraintes naturelles et l'économie d'énergies firent adopter l'habitat troglodytique sur le territoire.

C'est en Chine que les troglodytes sont les plus nombreux dont les origines renvoient aux premières habitations creusées en poche dès le néolithique. Ils s'y regroupent en de vastes concentrations de plusieurs centaines de milliers d'habitats.

En effet, l'architecture troglodytique, connotée péjorativement en Occident parce que reliée à des mythes et à des systèmes de représentation qui ne font pas la part belle du milieu souterrain, a pu se développer en Chine à l'abri de ces tabous liés aux cultures occidentales. 40 millions de Chinois vivraient dans une habitation troglodyte dans des grottes aménagées dans les falaises de lœss, ou même creusées en puits dans le sol.

Ces habitations troglodytes ne sont pas des abris de fortune, survivances anachroniques d'un « âge des cavernes » révolu, mais des constructions complexes, mettant en œuvre des savoir-faire et des techniques longuement élaborées au cours des millénaires.

C'est dans les régions situées au centre de la Chine, dans les provinces situées autour du bassin du Moyen Fleuve Jaune composées géologiquement de lœss que sont le Henan, le Shensi, le Shanxi et le Gansu, qu'on les rencontre principalement. Un faisceau de conditions géographiques, climatiques et culturelles réunies au cœur de ces régions, a assuré les conditions nécessaires au développement de cette architecture troglodytique.
Leur aire d'extension correspond ainsi au berceau de la civilisation chinoise où s'étaient épanouies les capitales de Chang'an (Xi'an) et de Luoyang. En effet, ces régions recèlent une des architectures, dont l'importance, la concentration et la complexité d'organisation en font une des expressions les plus abouties du troglodytisme.

L'habitat est très varié, on rencontre des creusements à flanc de coteau aussi bien que de l'habitat en terrain plat analogue aux caves que l'on rencontre en Tunisie. Les habitats troglodytiques ici sont un mode de vie ancestral qui possédait bien des avantages. Les régions précitées furent longtemps le théâtre de combats et le troglodytisme apportait une protection non négligeable, D'autre part les variations de températures rencontrées sur place étaient suffisantes pour justifier à elles seules le choix du confinement souterrain.

C'est dans la province du Shensi où l'occupation du sol est avant tout agricole que l'urbanisme troglodytique est le plus développé en Chine. L'habitat occupe les flancs de colline, non cultivables, là où le lœss plus calcaire présente une meilleure résistance. Dans un pays où la population est essentiellement rurale, la conjonction de facteurs climatique, géologique et économique a permis à ce type d'habitat de continuer à être, de nos jours, une réponse adaptée aux problèmes de logement.

Depuis les habitations élémentaires, creusées latéralement (simple voûte ménagée dans le lœss, fermée d'un mur rudimentaire en pisé, percé d'une seule porte), jusqu'aux constructions contemporaines bénéficiant de recherches actuelles en matière d'énergie solaire par exemple, l'éventail des configurations architecturales troglodytiques chinoise est très large. Cette variété s'observe tant dans les formes rencontrées que dans le degré de complexité de leur élaboration.

1.2.4.1 Les données climatiques des provinces du Fleuve Jaune

Les pluies :

Dans les régions bordant le Fleuve Jaune, l'humidité moyenne annuelle va chuter au-dessous de 50%. Ce faible régime des précipitations constitue un facteur favorable à l'établissement d'un habitat souterrain. En effet, l'épaisseur de terrain au-dessus de la pièce d'habitation se déterminera de telle façon que la précipitation maximale ne puisse pas traverser la paroi protectrice.

Les températures :

L'un des objectifs de la constitution d'un habitat est de procurer à l'habitant un climat intérieur plus clément que les conditions climatiques extérieures.

Quelques données permettent de caractériser rapidement le climat d'une zone considérée : les amplitudes thermiques annuelles et le nombre d'heures d'ensoleillement.

A Pékin, par exemple, la température moyenne du mois le plus froid est de
- 4,7° C (ianvier); la température du mois le plus chaud est de 26,1° C (juillet).
Soit une amplitude thermique de 30,8° C (différence entre moyennes mensuelles extrêmes).

Le climat est continental, avec des amplitudes journalières de plus de 20°, ce qui renforce l'intérêt de dispositifs à forte inertie thermique. Il gèle durant 3 mois d'hiver rigoureux (moyenne de température des mois d'hiver : décembre - 4,8°; janvier - 7,2°; février - 2,4°). La température peut parfois descendre jusqu'à -20°[1]. Le bassin du Fleuve Jaune est une région qui dispose d'un nombre de jours avec gelée suffisant pour que soit posé le problème du chauffage (160 jours annuel avec gelée dans la région de Xian, à 200 jours à la latitude de Pékin).

La lente élaboration de solutions locales capables de fournir un habitat corrigeant cette amplitude thermique va sélectionner la solution troglodytique comme l'une des réponses les plus adaptées pour la région du Fleuve Jaune.

En effet, ce type d'architecture va répondre à deux dimensions du problème posé : fournir le confort d'hiver (chauffage) et le confort d'été (climatisation).

En ce qui concerne l'inertie thermique de la terre, il faut savoir qu'un habitat creusé dans le sol aura un régime de température intérieure très stable, aussi bien en regard des écarts de température jour-nuit que des amplitudes annuelles (été-hiver).

Toutefois, la moyenne annuelle de 9,3° caractérise le climat souterrain; il est donc nécessaire de chauffer les habitations qui comportent toutes un foyer.

1. Jan Myrdal, Un village de la Chine populaire, Paris, Gallimard, 1972 (étude du village de Lieou Lin).

Ensoleillement :

Les régions concernées par l'habitat troglodytique reçoivent de 2 500 à 3 000 heures d'ensoleillement par an. Cet apport d'énergie est considérable.

Climat sec, fortes amplitudes de températures et nombre d'heures d'ensoleillement important sont les conditions climatiques idéales pour le développement d'un habitat solaire passif.

A Matmata, la moyenne annuelle des températures se situe aux alentours de 21°; c'est la température des habitations creusées dans le sol.

Morphologiquement, les habitations creusées autour d'un puits central sont très proches à Matmata et dans le Shensi. Ce type de solution constitue aussi bien une réponse contre le froid que contre l'excès de chaleur.

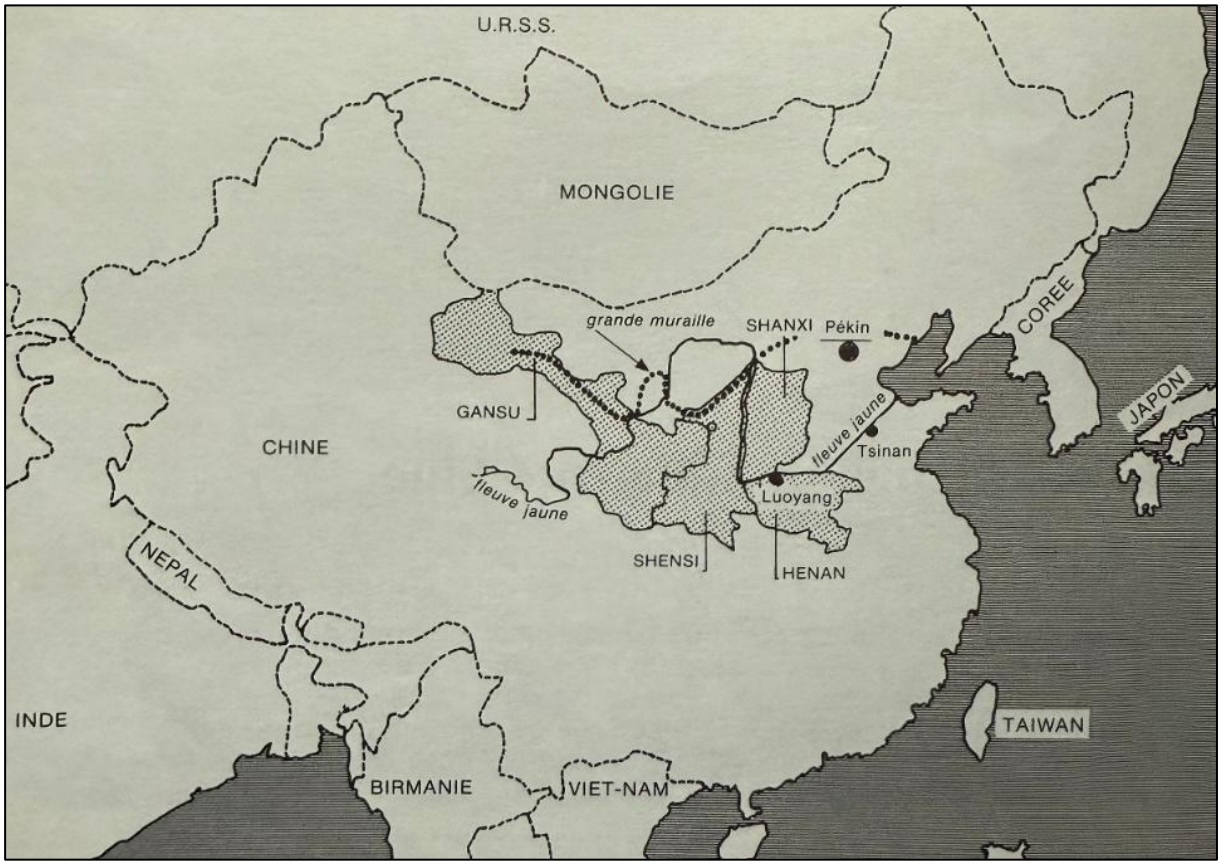


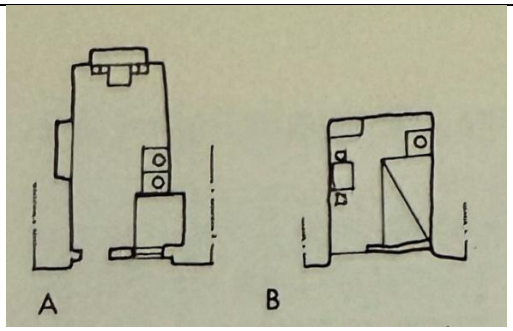
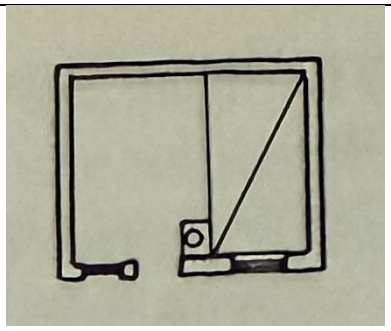
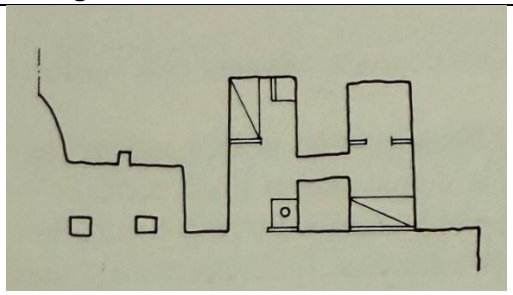
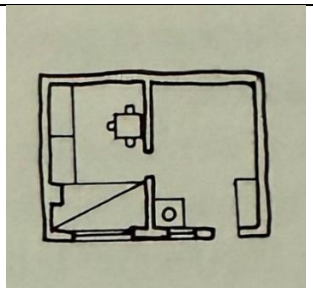
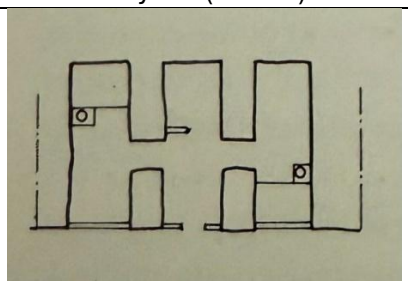
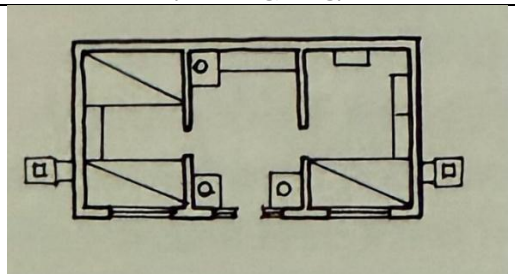
Figure 138 : L'habitat troglodytique en Chine. Provinces concernées par le troglodytisme : Henan, Shanxi, Qinghai et régions autonomes de Ningxia et Xinjiang.

En liaison directe avec ces données climatiques, une approche de l'architecture solaire passive peut aider à la compréhension des performances des maisons creusées chinoises.

1.2.4.2 L'influence de l'espace traditionnel d'habitation Han sur les troglodytes Chinois

Dans une relation chronologique des diverses phases d'élaboration de la maison chinoise, depuis les prémices observées au néolithique jusqu'aux développements élaborés qui suivront, l'architecture troglodytique s'est développé en relation directe avec les autres interprétations du type de la maison chinoise. En effet, l'architecture troglodytique a bénéficié des mêmes apports quant aux perfectionnements et évolutions de ces types d'architecture.

A titre d'exemple, ce tableau comparatif rapproche à degré d'évolution comparable, les plans et les dispositions des habitations chinoises traditionnelles construites et creusées durant le II siècle après J.C.

Habitations creusées	**Habitations construites**
 Habitation troglodyte latérale simple : a. Gansu b. Mongolie	 Habitation à une travée de façade
 Troglodyte latéral double Taiyuan (Shanxi)	 Habitation à deux travées de façade (Heilongjiang)
 Troglodyte latéral triple (Shanxi).	 Habitation à trois travées de façade (Heilongjiang)

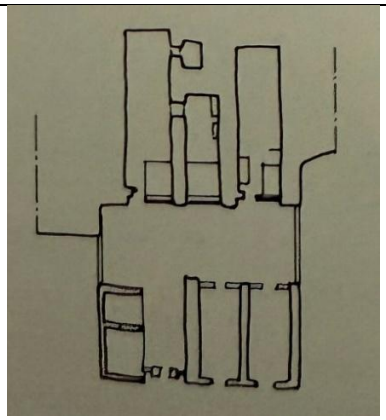
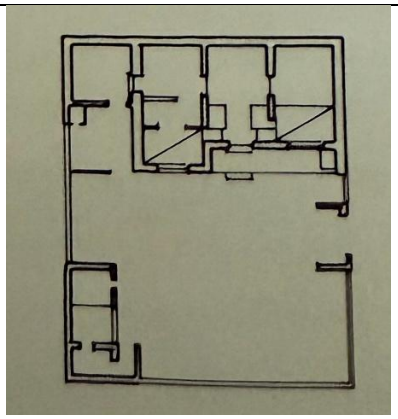
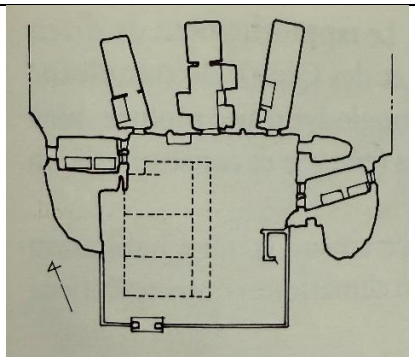
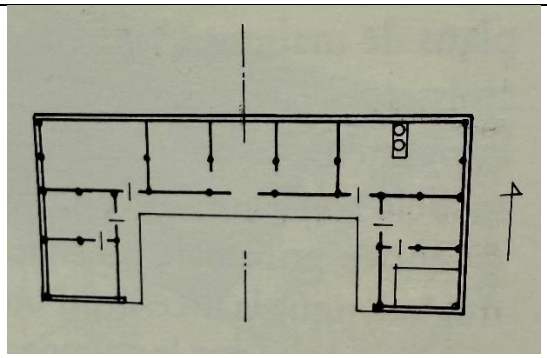
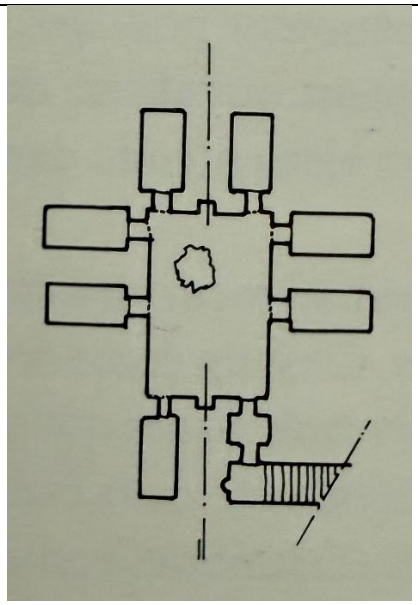
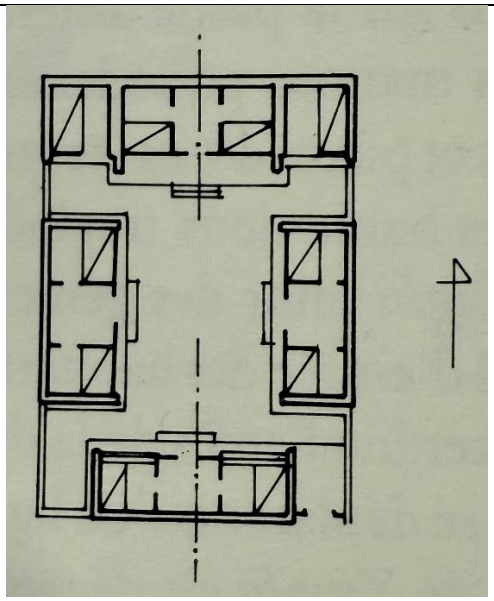
 Troglodyte latéral triple avec cour et dépendances.	 Maison à trois travées de façade, avec cour et dépendances (Pékin).

Figure 4 : Mise en parallèle de plans schématiques des habitations troglodytiques et des habitations chinoises construites traditionnelles.

Habitations creusées	**Habitations construites**
 Troglodyte latéral creusé selon trois ailes se refermant autour d'une cour	 Habitation à trois ailes entourant une cour (Sichuan).
 Habitation en puits. Les quatre ailes referment la cour centrale (Henan).	 Habitation à quatres ailes entourant une cour (Pékin).

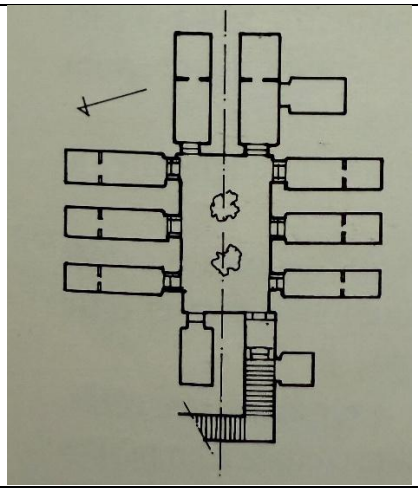
	Habitation creusée en puits (Gong,Henan). Trois grottes sont creusées sur deux des grands côtés de la cour. L'entrée n'est pas au sud, de façon à permettre un ensoleillement maximal d'un des plus grands côtés (comprenant le plus de pièces).

Figure 139 : Mise en parallèle de plans schématiques des habitations troglodytiques et des habitations chinoises construites traditionnelles.

Le rapprochement de divers plans de maisons de complexité croissante, avec des configurations troglodytiques montre bien l'appartenance pour les deux solutions (creusée et construite) à un modèle commun :
— entrée principale généralement face au sud (pour l'habitation troglodytique la nécessité d'orientation climatique conforte l'orientation induite par la cosmogonie) ;
— bâtiment principal toujours au fond de la cour (dans le cas des grottes, le « fond » est constitué par le front de taille où sont creusées les pièces d'habitation) ;

Peu à peu, au fur et à mesure que la complexité augmente, le dessin de la cour s'amorce. D'abord constituées par les murs d'enclos en pisé sur trois côtés (figure 4, 4 et figure 5 A), des ailes construites vont fermer cette cour sur un, deux ou trois côtés (figure 4, 5).

Le rapprochement des plans de troglodytes indiqués en 4; 5 et 6 sur la figure 4 montre en outre qu'il y a continuité entre les troglodytes latéraux et les troglodytes en puits. Ces derniers seraient l'accomplissement, l'aboutissement de l'habitat creusé lorsque le troglodyte latéral de départ se serait refermé sur quatre côtés, enveloppant le puits-cour. Un plan intermédiaire comme celui-ci permet de suivre cette continuité :

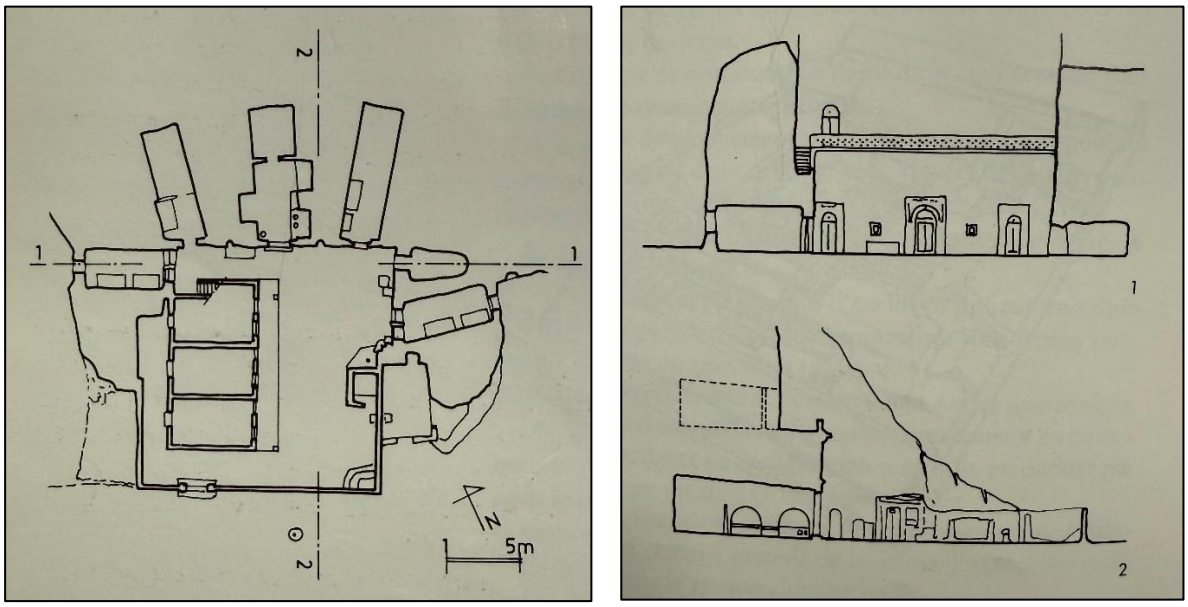


Figure 140 : Habitation troglodytique latérale (Henan). Configuration intermédiaire entre le troglodyte latéral et l'habitation en puits.

Toutefois, il faut bien rappelé que le troglodyte latéral correspond cependant à une situation en falaise (rupture de terrain, versant d'une vallée), le troglodyte en puits est davantage lié à une occupation de terrain plat (plaine, plateau, table de loess surélevée mais horizontale).

Ainsi, cette lecture parallèle et comparée des plans nous a permis de démontrer que l'habitation troglodyte chinoise procède de la même organisation et du même modèle que la maison chinoise traditionnelle.

Dans l'architecture troglodytique chinoise, un échange permanent est instauré entre le ciel et la terre. Le ciel est décrit comme une coupe ou un cercle. La terre, espace le plus vaste, est figurée par un carré.

La cour carrée : « le puits du ciel » :

Dans la maison traditionnelle chinoise, la cour carrée autour de laquelle s'organisent les diverses parties de l'habitation s'appelle précisément « Puits du ciel ». Ce modèle d'organisation de l'espace marque bien le monde clos, fermé vers l'extérieur, ouvert sur un espace central. Organisée à partir de cette structure, la maison chinoise se trouve ainsi en continuité avec l'organisation de la ville.

En ce qui concerne l'orientation de la cour, il n'est pas inutile de rappeler que tout bâtiment important doit s'ouvrir au sud. Le nord correspondant aux rigueurs de l'hiver et aux invasions des barbares. C'est sur ce principe de distribution à partir de la cour centrale vont s'organiser les habitations troglodytes. Il a pu être repris ensuite facilement par l'architecture troglodytique, la fosse primitive constituant l'amorce naturelle de ce « puits du ciel » que constitue la cour carrée.

Pour résumé, la maison creusée chinoise est organisée selon le plan de la maison chinoise traditionnelle, mais elle en reprend également les techniques, en particulier celle de la terre crue.

Le « creusé » n'exclut pas le construit. En effet, la phase creusée de la construction peut être prolongée, complétée par des éléments construits extérieurement qui eux font appel aux techniques traditionnelles de mise en œuvre de la terre crue : le pisé, la brique crue (adobe), le torchis (terre crue + armature végétale + ossature bois).

Le pisé :

Les murs de pisé sont épais, ils donnent des constructions massives, très résistantes et aux qualités de confort thermique remarquables. Les troglodytes latéraux voient souvent leur cour délimitée par un mur de pisé. Ce mur d'enclos est percé d'une entrée qui est le seul élément recevant une toiture.

L'adobe :

C'est bien entendu le matériau idéal des climats chauds et secs.

En effet, l'eau est le principal ennemi de la construction en terre (pisé ou adobe) mais le problème ne se pose pas dans les régions à faible pluviométrie comme les provinces du Fleuve Jaune (Chine du nord et du nord-est).

L'adobe est plus souple d'utilisation que le pisé, le module manipulable permet toutes les formes architecturales, toutes les épaisseurs de murs, selon les principes de pose. La voûte est bien entendu, avec la coupole, la forme architecturale la plus noble obtenue avec ce matériau le plus rustique qui soit.

1.2.4.3 Les grottes creusées

1.2.4.3.1 Les troglodytes latéraux

Le creusement se développe dans une direction horizontale, attaquant un front de falaise de lœss bien exposée au sud ou au sud-est. Le site lui-même, s'il est bien choisi, est déjà porteur, avant tout creusement, d'un microclimat : ensoleillement, protection aux vents, protection par rapport aux pluies. Une plate-forme (future cour) située devant l'entrée de l'habitation peut être aménagée et pourra ultérieurement recevoir des développements construits.

La nature des sols creusés va conditionner la forme des pièces obtenues. Si la roche est homogène mais dure le plafond peut être obtenu plat, sur une grande portée, sans nécessaire convexité.

En Aragon (Espagne), dans une roche où alternent des couches tendres et des bancs de calcaire dur, l'habitation est creusée dans la strate tendre. Les deux bancs de calcaire dur, supérieur et inférieur, fournissent respectivement les plafonds et les planchers.

En Chine, la plupart du temps, le lœss consolidé est homogène.
Les volumes creusés sont donc obtenus par des voûtes. Une grande variété de profils est utilisée selon les régions : le plein cintre, l'arc surbaissé, l'ogive. La forme de la voûte est visible extérieurement et même soulignée, affirmée, par le traitement de la façade.

Dans le Shanxi, la plupart des 1 500 000 habitations troglodytiques sont du type latéral.
Ce sont environ 5 000 000 de personnes qui sont concernées par l'habitat troglodytique, soit un quart de la population rurale. Dans l'ouest et le sud de la province (régions de Pian-guan, Baode, Xingxi, Linxian, Fangshan, Lishi, Shilou, Daning, Ruicheng, Puxian, Jixian, Pinglu), les habitants des grottes constituent 85% de la population rurale. Cette forte densité de troglodytes correspond d'ailleurs à une zone où la couche de lœss est très épaisse.
Le troglodyte latéral se prête particulièrement bien à l'occupation de ces régions au relief accidenté car il en exploite la topographie de façon judicieuse en s'intégrant remarquablement au paysage d'origine en escaladent les collines. Ainsi, ces troglodytes latéraux illustrent la capacité d'action du troglodytisme sur l'environnement physique.

Les troglodytes élémentaires :

L'habitation la plus simple est constituée d'une seule cave.
La cavité, de 5 à 9 m de long, est la plupart du temps orientée vers le sud, ou sud-est, et loge une famille. Son degré d'élaboration peut être variable, en particulier pour le traitement des façades. Un simple mur en pisé, percé d'une porte, sans fenêtre, peut venir fermer une pièce.

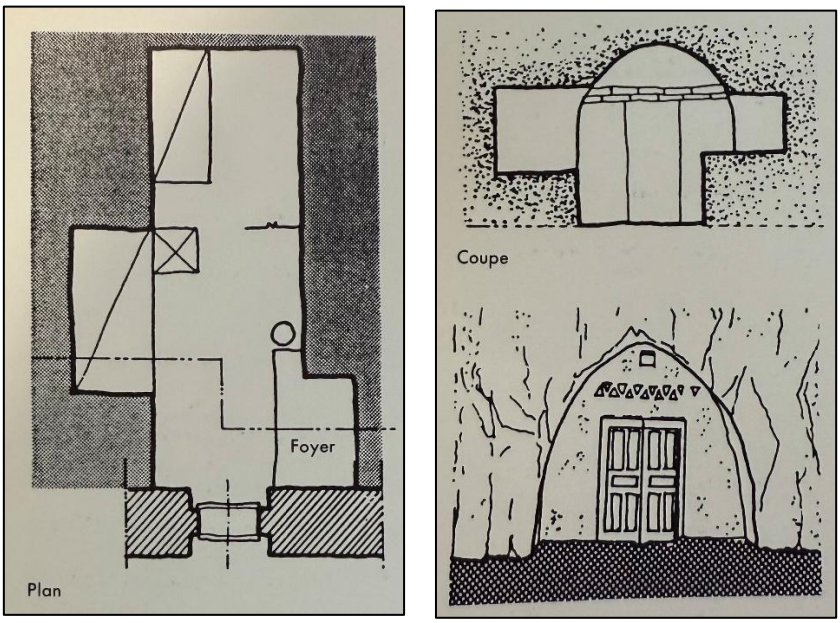


Figure141 : Habitation simple. Province du Henan

Une fenêtre, un « jour » en imposte au-dessus de la porte peuvent apporter une amélioration de l'éclairement, et le mur-façade, en pisé, en adobe ou en torchis, peut être posé sur une semelle l'isolant de l'humidité (en brique ou en pierre).

Selon la nature du loess et ses qualités mécaniques, les dimensions permises sont très différentes. Dans 22 m^2, (figure 2) on peut loger un couple et un jeune enfant, jusqu'au grand volume offrant plus de 100 m^2 (figure 5) qui peut abriter une grande famille (deux générations par exemple).

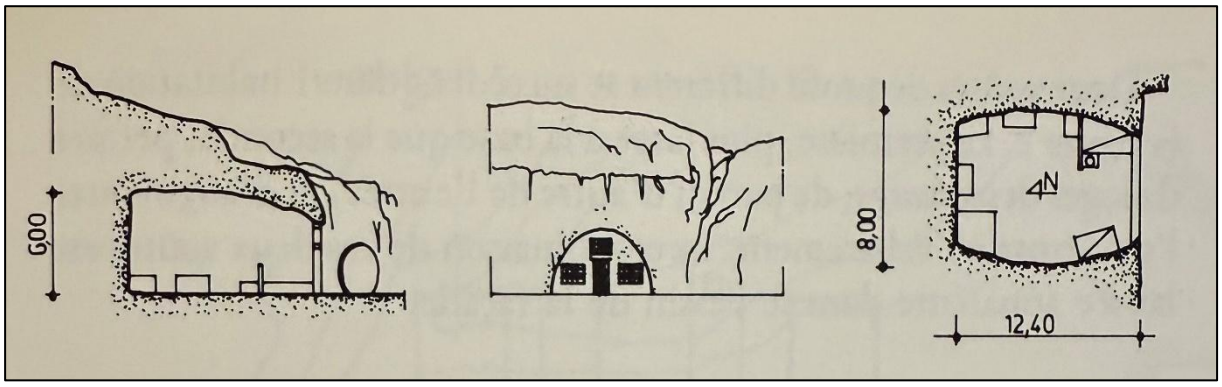


Figure 142 : Maison de Li-Gui-Rong à Donxigou

Lorsque les conditions d'humidité du sol, la bonne orientation, un climat particulièrement sec, le permettent, la grotte peut s'enfoncer de plus de 10 m dans la profondeur de la falaise et permettre deux pièces en enfilade, divisant ainsi une grande surface de plus de 40 m2 (figure 3).

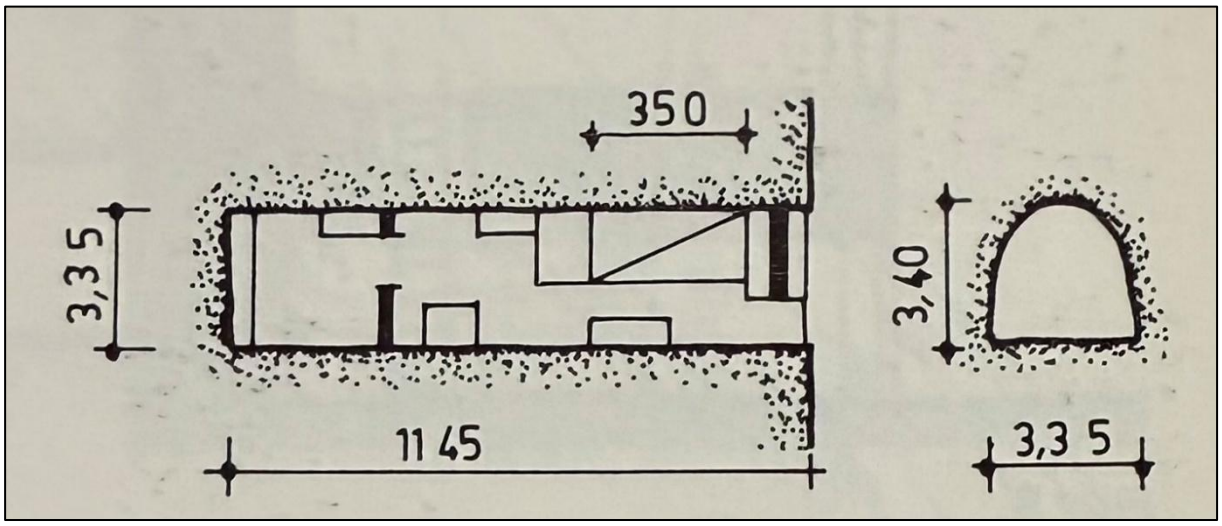


Figure 143 : Habitation à Taiyangcun (Linfen)

Un loess très dur et homogène permettra une voûte surhaussée suffisamment pour libérer au sol près de 75 m2 avec une hauteur de 6 m au point le plus haut.

Diverses possibilités de creusements de niches venant en annexe de la nef principale sont exploitées pour loger le kang[1] près d'une fenêtre (figure 6) ou pour des annexes de réserves et rangements (figures 1).

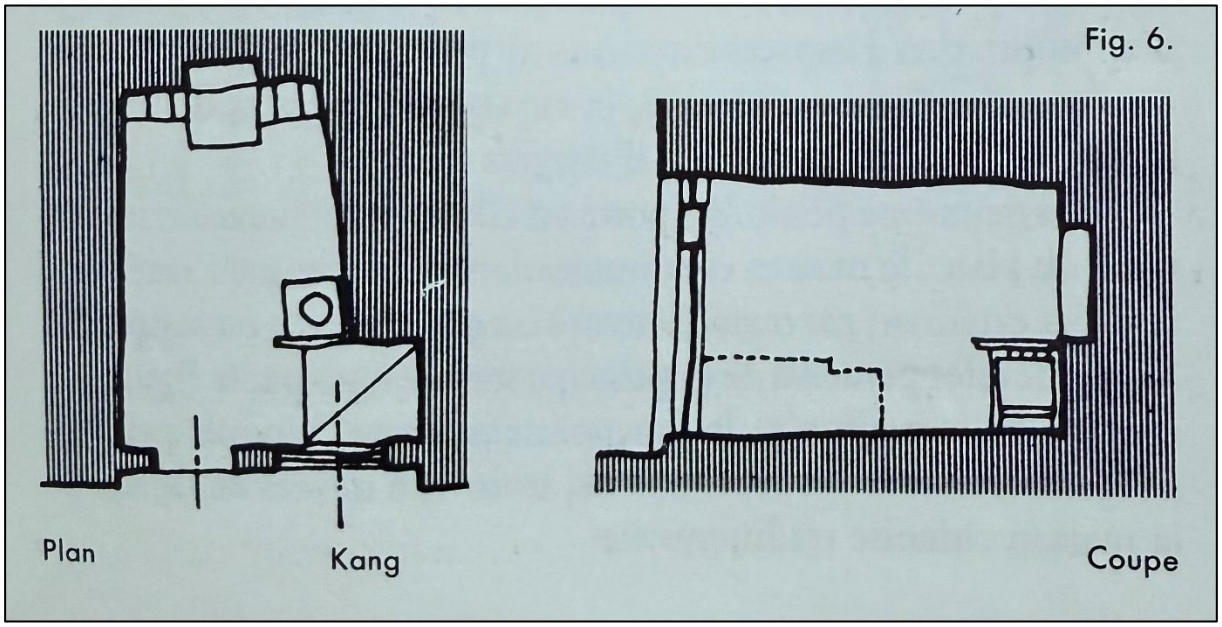


Figure 144 : Troglodyte latéral (Xifeng).

1. Le Kang est le lit traditionnel dans les maisons de la Chine du nord. Constitué d'un massif de briques de terre, il est chauffé par en dessous, le massif emmagasinant ainsi la chaleur. Souvent, le four à cuisson lui est accolé. Utilisé comme un bas-flanc, une natte et un tapis le recouvrent simplement. C'est la couche principale du foyer (parents et jeunes enfants). Il est adossé à la façade près d'une ouverture (fenêtre), bénéficiant ainsi de l'éclairement du jour.

Parfois, la profondeur et la surface sont suffisamment importantes pour permettre de dégager un abri extérieur repoussant vers l'intérieur le mur de façade. Cet espace de transition entre intérieur et extérieur constitue de fait une pièce supplémentaire pour la préparation des repas en particulier. Il crée aussi un espace tampon entre vie privée et activités collectives de la rue.

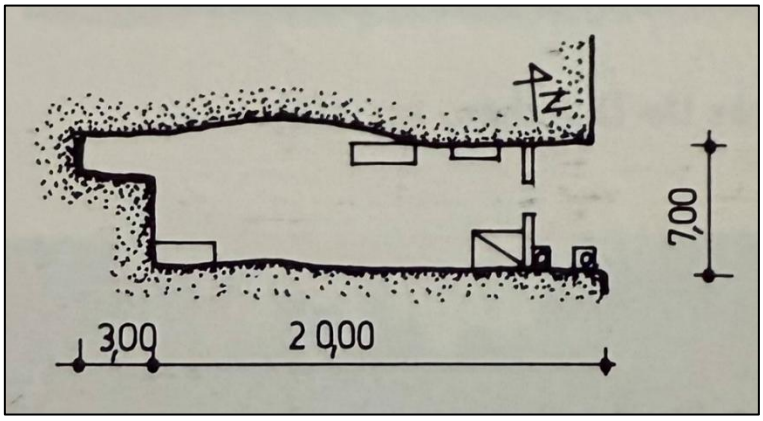


Figure 145 : Maison de Du-Yu-Ming à Ducun

Parfois, deux voûtes de profil différent se succèdent. La première, plus large à la base que la seconde, permet de loger deux kangs, de part et d'autre de l'entrée, et d'augmenter l'ouverture à l'éclairement.

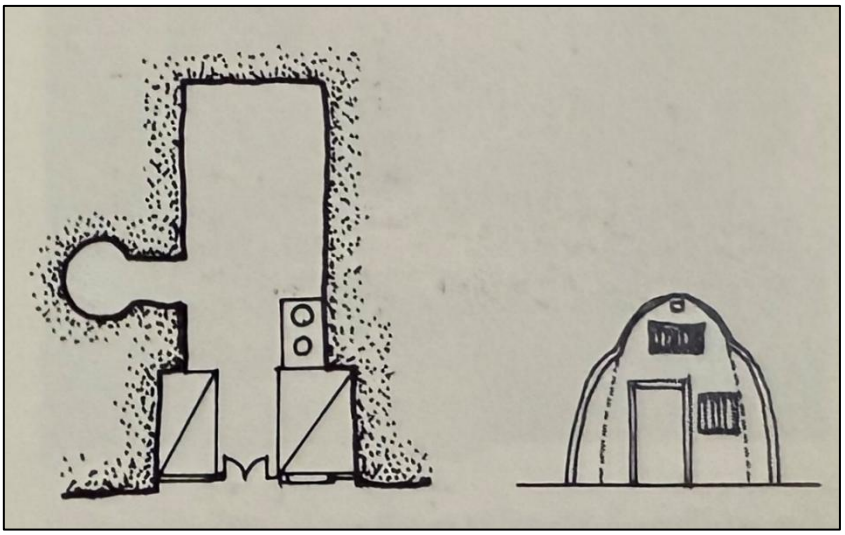


Figure 146 : Troglodyte latéral (Xifeng).

Troglodytes doubles ou multiples :

Lorsque l'obtention d'un grand volume est rendue impossible, à cause des qualités du sol par exemple, c'est en reliant deux ou plusieurs unités de base que l'accroissement d'habitabilité peut se faire. Plusieurs caves constituant l'habitation d'une seule famille peuvent être développées sur le même plan horizontal, accolées, ou bien à des niveaux différents.
Dans ce dernier cas, la liaison entre les pièces se fera soit par des escaliers intérieurs (figure 8) soit par l'extérieur (figure 9).

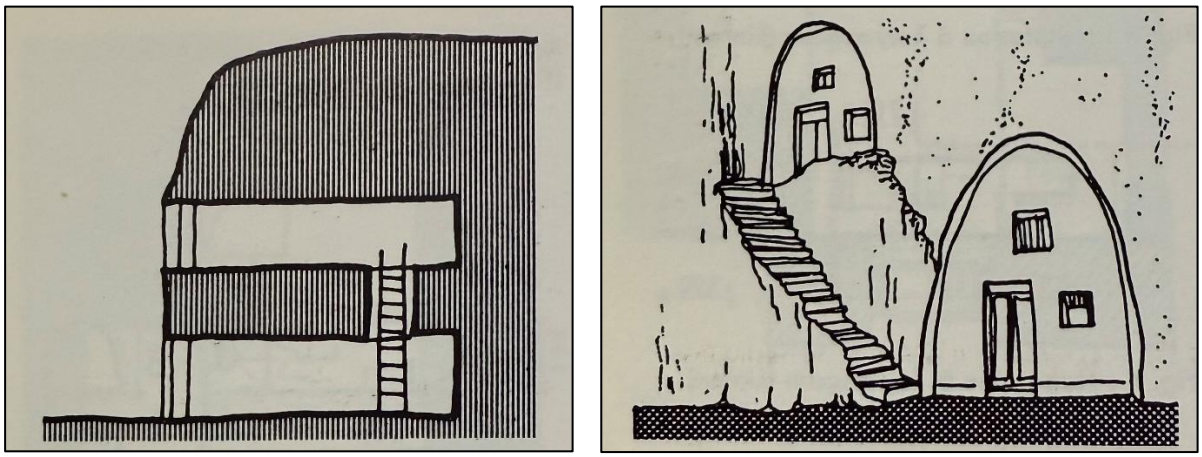


Figure 147 & 148 : Troglodyte latéral élémentaire (Région de Xian).

Le système « latéral » peut donc proliférer, soit sur un même plan, soit à des niveaux différents, introduisant par là une souplesse et une adaptabilité aux besoins des habitants.

Pour les grottes au même niveau, trois possibilités différentes de liaison permettent à une même famille de relier les pièces de l'habitation :

— Première possibilité, la plus simple : c'est par l'espace extérieur que la relation se fait. Une zone privatisée virtuelle sera marquée par divers objets, ustensiles de cuisine, mobilier, outils de travail, qui garantiront « de fait » un statut privé à une portion de l'espace public.

— La deuxième possibilité est une amélioration du plan par la mise en communication des pièces par l'intérieur. Le trajet extérieur, par mauvais temps ou grands froids est ainsi supprimé.

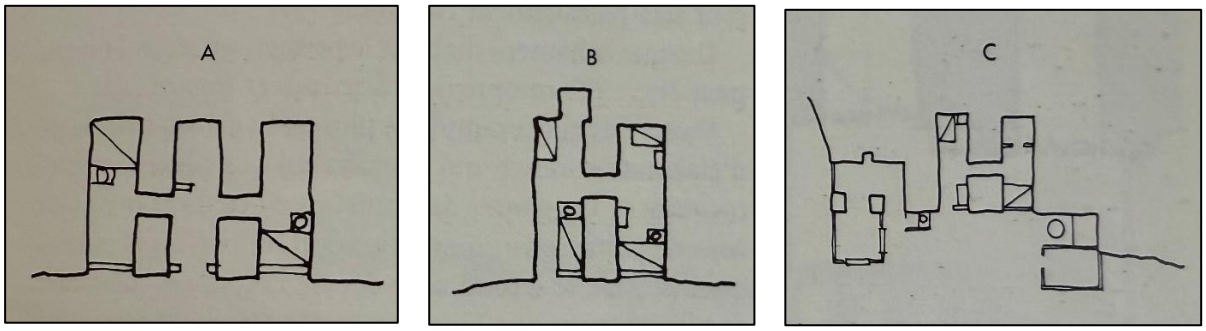


Figure 149 : Troglodytes latéraux dans le Shanxi.
Des communications transversales relient les pièces entre elles. La liaison ne se fait plus exclusivement par la cour.

— La troisième possibilité de mise en relation des pièces est la formation d'une cour extérieure. C'est la privatisation réelle et non plus virtuelle d'un espace devant les grottes.

Le plan de la figure 11 C amorce cette évolution de deux manières.
Le site, d'une part permet un retournement partiel de la paroi, la naissance d'une aile.
D'autre part, des éléments construits investissent l'espace extérieur.

Cet exemple correspond à la naissance du stade suivant de développement du troglodytisme latéral : l'adjonction d'une cour.

Les troglodytes latéraux avec cour :

L'organisation et la constitution de la plate-forme (cour) se fait devant le troglodyte latéral. Lorsque la hauteur du banc de loess le permet, un second niveau peut être créé, comprenant une ou deux pièces (figure 14).

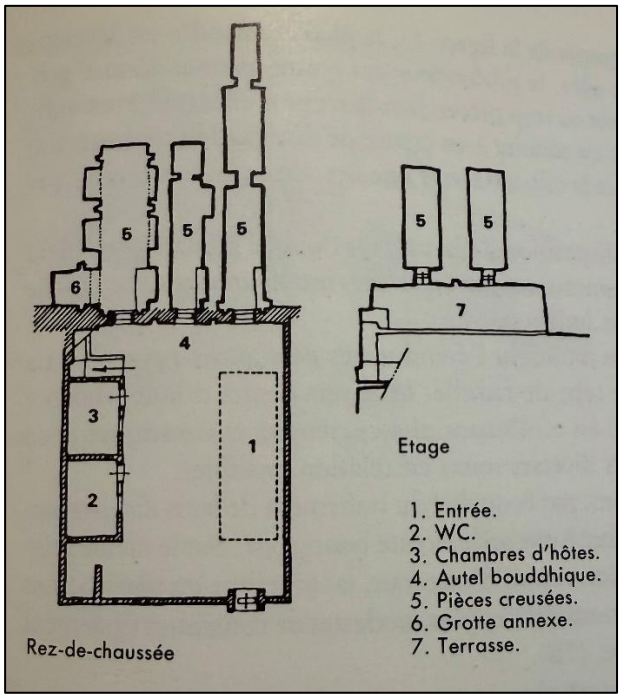


Figure 150 : Habitation creusées et enclos extérieur

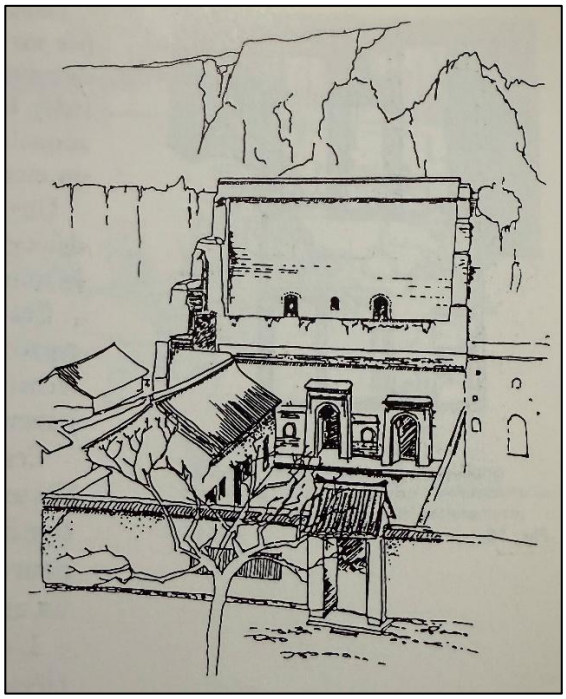


Figure 151 : Vue d'ensemble du troglodyte latéral.

Dans ce dernier exemple, un pas de plus est franchi dans le degré d'élaboration de ce qui est maintenant un complexe « creusé-construit ». Les grottes du rez-de-chaussée sont creusées mais sont aussi en partie construites, sur la partie avant supportant la terrasse qui distribue le second niveau. Une aile de la cour est constituée de pièces construites. L'ensemble illustre parfaitement la continuité « creusé-construit ».

Dans l'exemple de la figure 15, la phase construite est développée sur deux ailes.
La cour est réduite à un espace de distribution rectangulaire auquel s'ajoute le toit-terrasse d'une des ailes, rendu accessible par un escalier.

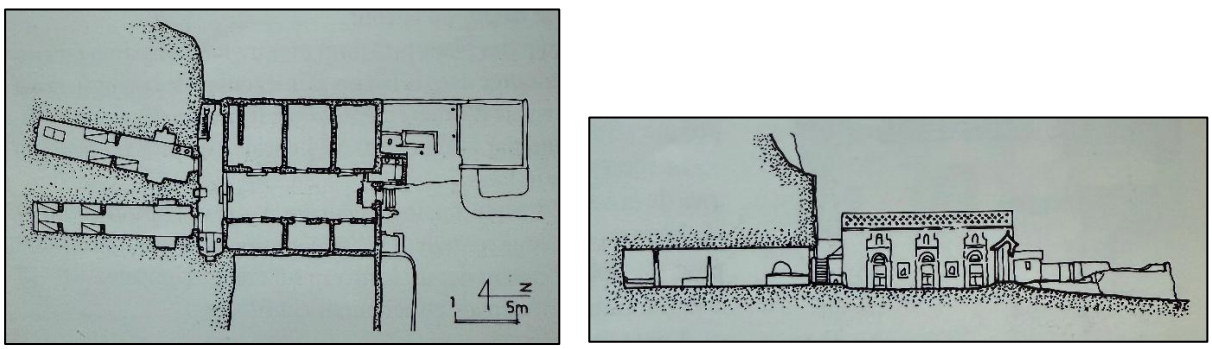


Figure 152 : Troglodyte latéral (Henan).

Une autre disposition de la cour est donnée par la figure 16 où deux grottes communiquent entre elles intérieurement, tandis que la troisième est indépendante.

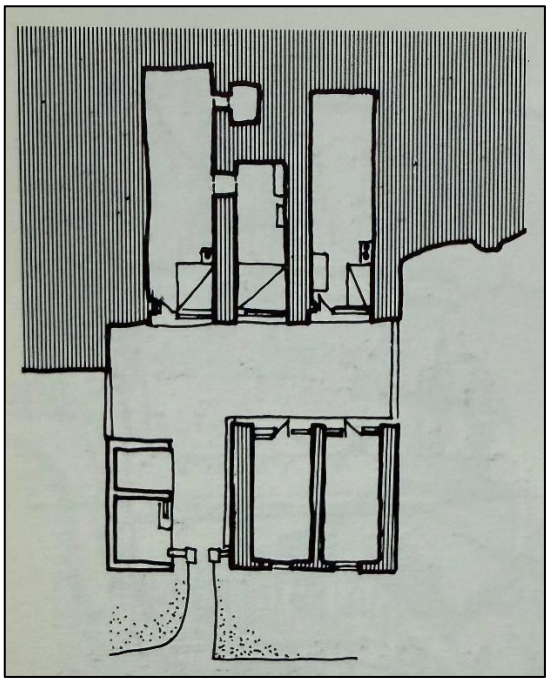


Figure 153 : Troglodyte latéral avec cour.

Ces variantes montrent l'étendue des possibilités pour gérer un espace selon le type de famille, les divers degrés d'indépendance recherchés, ceci en combinant phases creusées et construites et en jouant sur leurs diverses mises en relation possibles.

Ces habitations, par la qualité du traitement de leurs diverses parties sont à rattacher à une architecture bourgeoise. Sur le même principe d'organisation autour d'une cour, les techniques du pisé et de l'adobe ont permis pour des habitations rurales plus modestes de constituer également un enclos (figure 17 A et B).

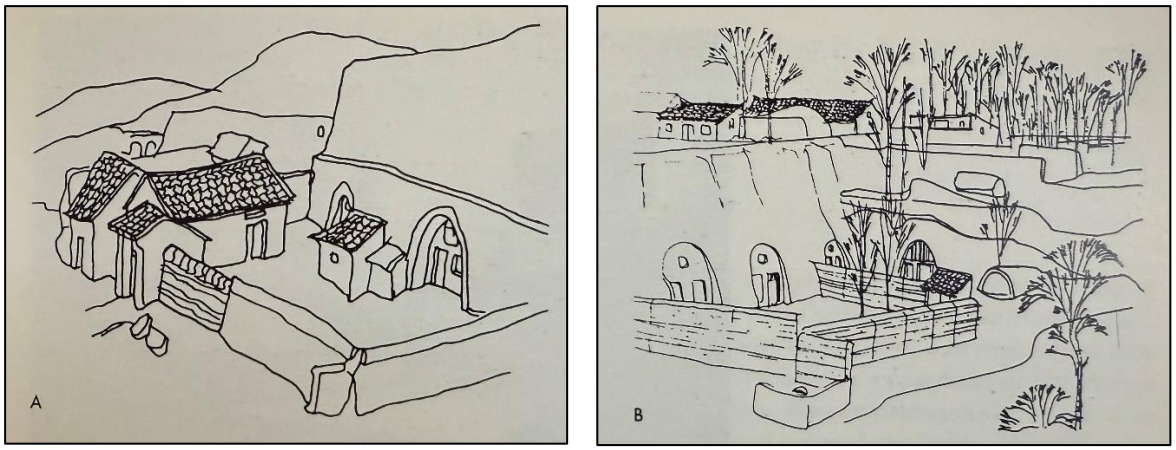


Figure 154 : Troglodytes latéraux avec cour intérieure

Parfois, un léger retrait s'amorçant dans la façade par rapport au nu de la falaise se créée où la cour est pour moitié encastrée dans la falaise, pour moitié dessinée par un mur d'enclos (figure 18). Ce renfoncement annonce une pénétration de l'habitation dans le massif de lœss.

Cette progression, maintenant le plan carré de la cour, est confirmée dans l'exemple de la figure 19 où trois ailes entièrement constituées par la paroi de lœss, sont creusées de grottes.
Un simple mur rectiligne, percé en son milieu par l'entrée et son porche, achève sur le quatrième côté le dessin de la cour.

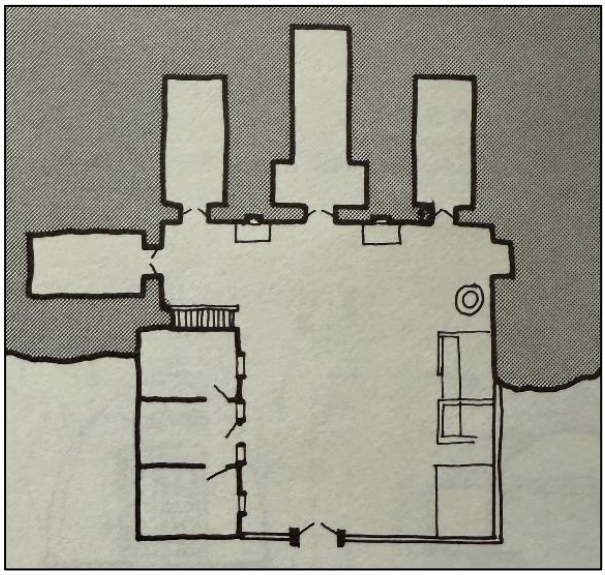


Figure 155 : Cour en partie creusée.

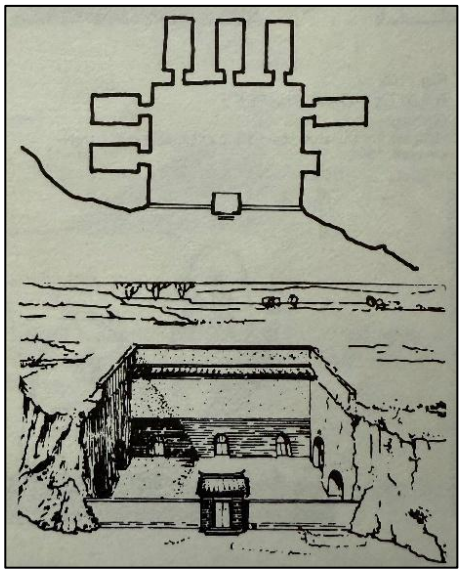


Figure 156 : Cour creusée (Gansu).

La succession des plans présentés montre la pénétration progressive de la cour carrée dans la falaise. Le stade ultime de cette pénétration est donné dans l'exemple de la figure 20 ou l'enclos extérieur est rentré en totalité dans le lœss. A ce stade d'évolution intermédiaire, l'accès s'effectue encore au niveau de la cour centrale.

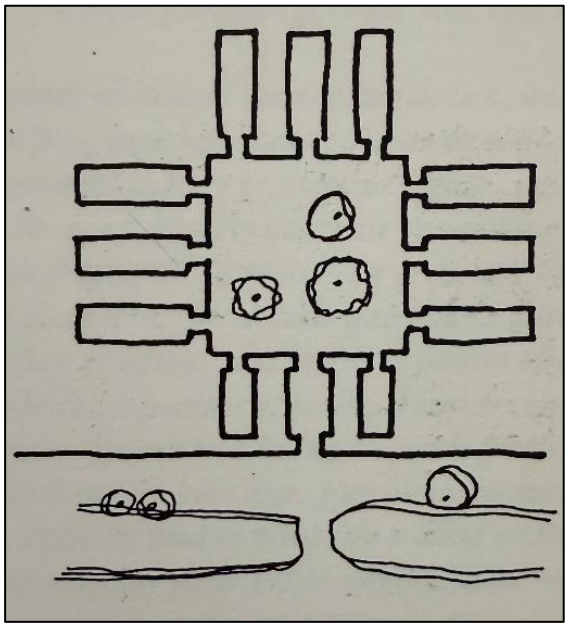


Figure 157 : Cour creusée à l'intérieur (Gansu).

La construction des grottes :

Mao-K'o-Ye, constructeur de grottes, explique son travail dans un propos recueilli en 1962 par Jan Myrdal :

« Les grottes de terre sont creusées dans la colline. D'abord, on cherche un endroit où la terre s'y prête. Il faut que ce soit du lœss, jaune et dur. Dans les régions sablonneuses, il est impossible de construire des grottes. Ici, plus on s'élève sur la colline, plus la terre est bonne, d'ordinaire. Mais ça fait un chemin plus long pour aller jusqu'au puits.

On n'a pas besoin d'être nombreux pour construire une grotte en terre. Une grotte de taille normale de 6 m de long, de 3 à 3,50 m de hauteur et de 3 m de largeur prend environ quarante jours. Une maison de la même taille prend le même nombre de jours à être construite mais elle n'est pas aussi pratique et coûte plus cher à chauffer.

Lorsqu'on a choisi un endroit où la terre semble être bonne, on aplanit le versant pour avoir une façade perpendiculaire. Puis on fait une ouverture de 0,70 m x 2,30 m et on creuse environ 3 tch'e[1] avant de commencer à agrandir la grotte. En le faisant on s'aperçoit, à la consistance de la terre, de la taille que pourra faire la grotte. Plus la terre est dure et dense, plus la grotte peut être grande. Si, au contraire, la terre est poreuse et molle, il faut se contenter de faire une petite grotte. Quand on a fini de creuser la grotte, on polit le mur de terre pour le rendre bien lisse, puis on crépit avec du lœss délayé dans l'eau. Pendant tout ce temps on a laissé intact le mur extérieur. On se sert toujours de la petite ouverture qu'on a creusée au début. Mais, quand la grotte est terminée, on ouvre ce mur pour avoir une porte et un mur pour la fenêtre. Le mur de la fenêtre est confectionné à l'aide de lattes sur lesquelles on tend du papier. De nos jours, nous en couvrons aussi une partie avec du verre. Mais le verre est cher et il est rare qu'on ait une surface de verre de plus de 0,70 à 1 m. [...]

On ne peut pas construire une telle grotte tout seul; il faut être plusieurs. Nous résolvons souvent ce problème en faisant un échange de travail; on s'entraide. Ici, dans le Nord Shensi, les gens préfèrent habiter dans des grottes qui sont plus chaudes en hiver et plus fraîches en été que les maisons[2]. »

1. Un tch'e = 33,3cm
2. Un village de la Chine Populaire, Jan Myrdal, Editions Gallimard, 1972

1.2.4.3.2 Les habitations creusées en forme de puits

Le dernier stade d'évolution du troglodyte latéral par encerclement progressif d'une cour carrée qui pénètre dans le massif de terre, conduit à la configuration en puits. Il n'y a plus d'accès par l'un des côtés de la cour. Les pièces d'habitation se développent sur les quatre côtés de la cour dans une disposition symétrique et orientée.

D'autre part, l'absence d'expression construite extérieure c'est-à-dire en surface de toit, signalant l'habitation, est la caractéristique de l'habitat en puits. Un mur protecteur, souvent construit en briques selon un appareillage ajouré, couronne l'ouverture du puits ainsi, les enfants courent sur l'espace public constitué par les toits des habitats troglodytiques de leur village sans que des problèmes de sécurité se posent par rapport à ce type d'urbanisme.

L'accès dans les habitations creusées en puits :

Un accès à la cour centrale, non protégé par une couverture, simple plan incliné en terre battue, est souvent la solution retenue dans les demeures paysannes.
Parfois, l'accès à l'habitation est plus élaboré puisqu'il comprend un escalier occupant la partie centrale et deux zones de roulement, plan lisse continu, de part et d'autre de cet escalier.

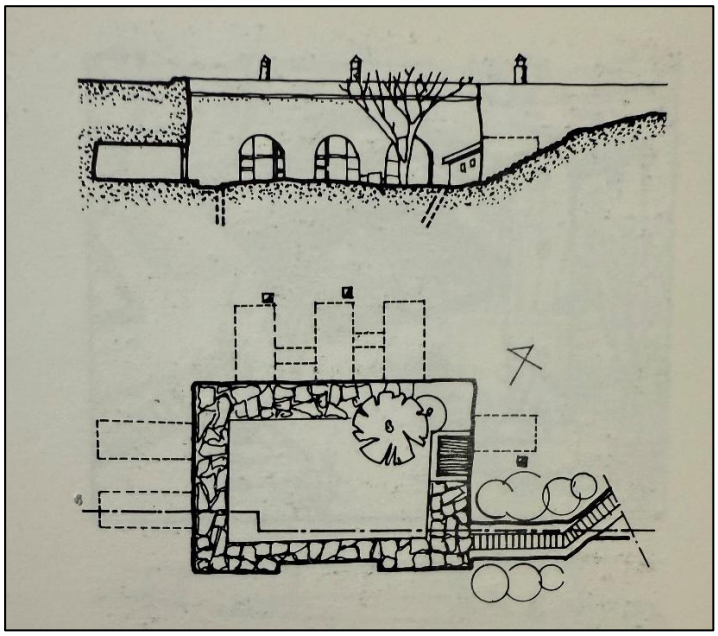


Figure 158 : Accès d'habitations en puits

Lorsque le dénivelé est important, la rampe d'accès devient partiellement un tunnel dans lequel on trouve souvent les premières annexes : pour outillage, magasins à grains, remises...(voir plus loin figures 5, 7 et 11).

Dans certains cas, l'habitation est signalée en surface par une entrée construite en pisé, simple débouché d'un tunnel s'enfonçant progressivement (figure 2) ou parfois cet ouvrage est précédé d'une entrée classique, telle que l'on peut l'observer dans la maison chinoise traditionnelle (figures 3).

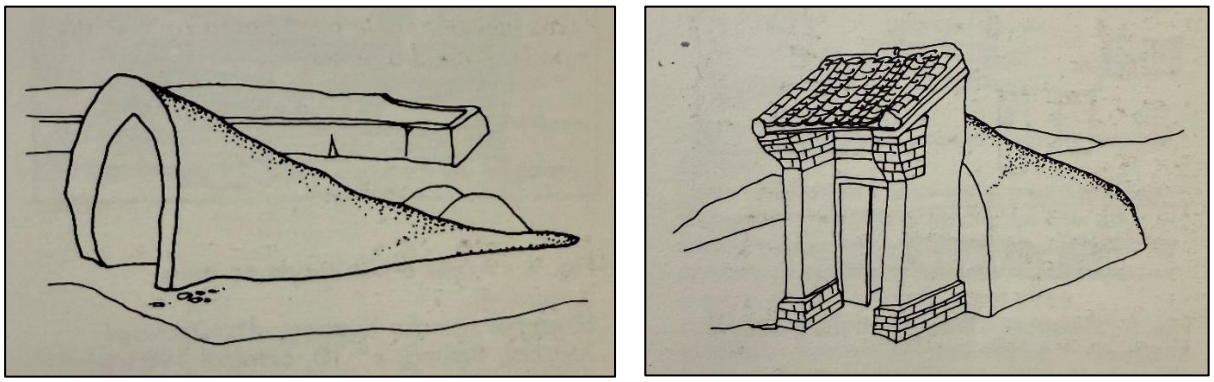


Figure 159 : Accès d'habitation en puits

La région de Luoyang, elle, présente quelques dispositions d'accès différentes. Ici la densité des habitations est forte et la rampe d'accès décomposée en deux volées à angle droit.
Ceci permet de ne pas aller chercher trop loin le point de départ du plan incliné.
Rampe lisse pour les roues des bicyclettes, et escalier, se partagent la largeur de circulation.

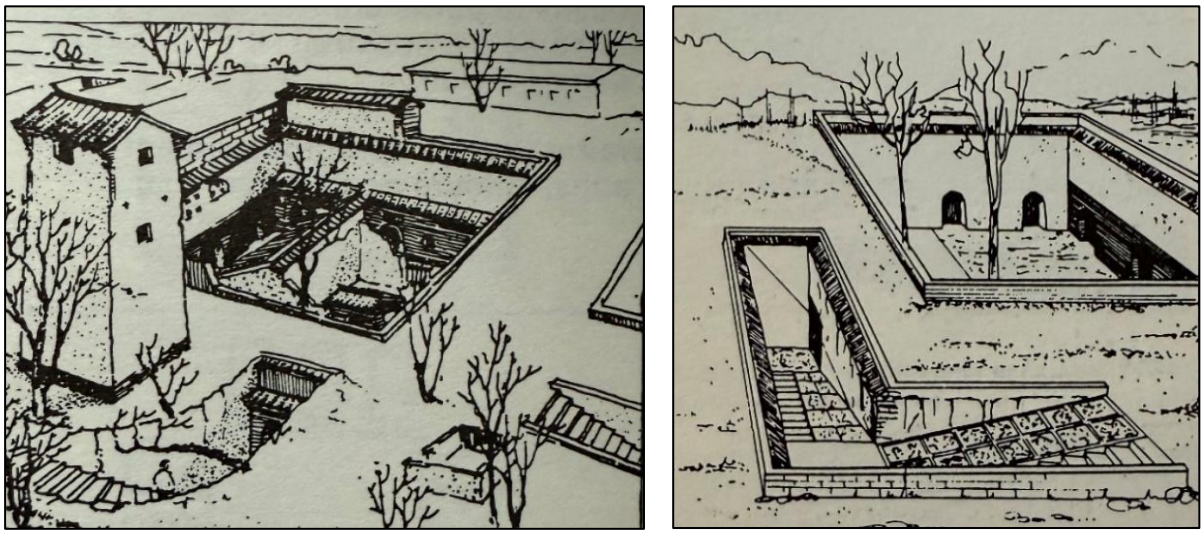


Figure 160 : Accès d'habitation creusée en puits dans le lœss (Luoyang)

Directement lié aux nécessités d'orientation, et afin de laisser libres les façades qui reçoivent le soleil, l'accès s'effectue généralement par le sud.

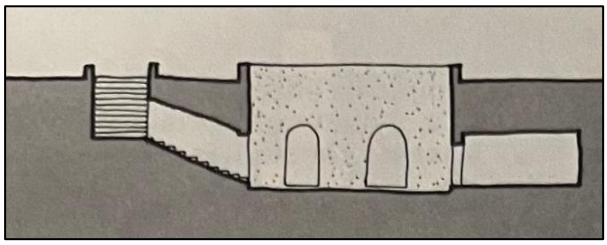


Figure 161 : Coupe sur accès à une maison creusée

Orientation du plan :

L'habitat troglodytique chinois est un habitat solaire passif extrême.
Cette remarque, fondée sur des considérations liées à la thermophysique de la terre est ici confortée par l'organisation « solaire » du plan. La disposition des pièces, autour de la cour carrée, selon leurs fonctions respectives, est logique et judicieuse par rapport aux quatre orientations.

La façade exposée au sud reçoit en priorité les pièces principales : chambres, chambres-séjour. Ce sont les pièces « à vivre », le plus fréquemment occupées, les plus vastes et les plus ensoleillées.

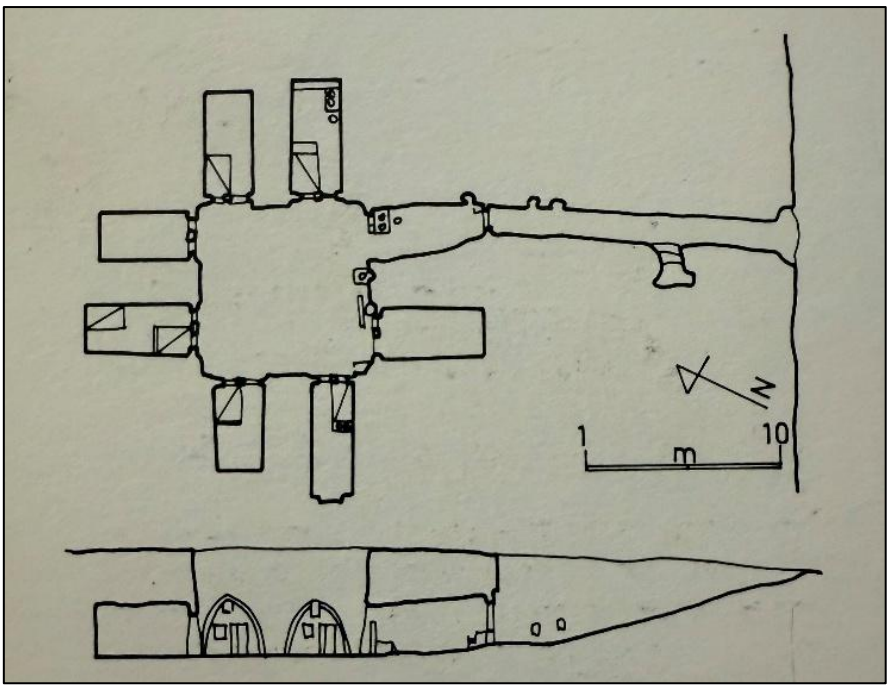


Figure 162 : Habitation creusée en puits dans le Shaanxi.

Cependant, parfois les habitats troglodytiques creusés en puits doivent faire face à un souci de densifier au maximum les pièces sur les façades bien ensoleillées.

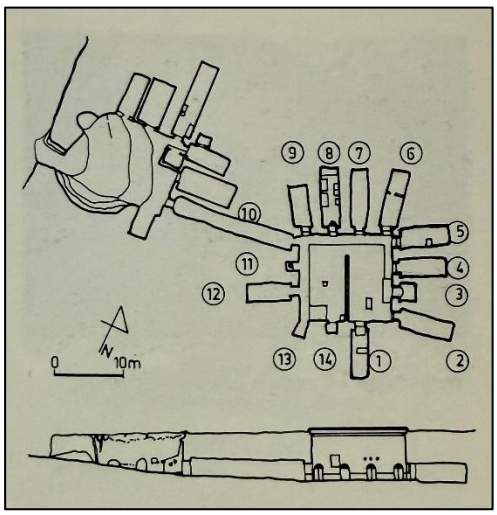


Figure 163 : Maison creusée en puits à Luoyang,Henan.
Les ménages des deux frères et leurs enfants se partagent l'habitation (3 enfants par foyer).

1-2 : Animaux.
3-13-14 : Remises.
5-12 : Cuisines respectives de chacune des deux familles.
4-6-7-8-9 : Chambres.
10 : Accès et communication avec une seconde habitation en puits occupée par une autre famille.
11 : Toilettes.

Un mur divise l'espace commun de la cour en deux.

Dans ce dernier exemple, c'est la diagonale de la cour carrée qui est orientée nord-sud. Les façades principales seront d'exposition sud-est et sud-ouest. La façade d'exposition nord-ouest recevra les grottes pour les animaux, les remises à outillage. Sur le côté nord-est nous trouvons les toilettes et une cuisine aménagée par la nécessité d'accueillir une deuxième famille dans l'habitation. La cour a été divisée en deux par un mur par la nécessité d'accueillir une deuxième famille dans l'habitation.

L'espace de la cour carrée :

Dans le nord-ouest du Shanxi, certaines régions constituées de plateaux de lœss sont truffées d'habitations ressemblant étrangement à celles de la région de Matmata. Elles en possèdent la même morphologie : une fosse rectangulaire, d'environ 10 mètres sur 24, et de 9 à 10 mètres de profondeur, est reliée au sol primaire par un escalier ou un plan incliné. Les pièces d'habitations sont excavées dans les faces verticales du patio.

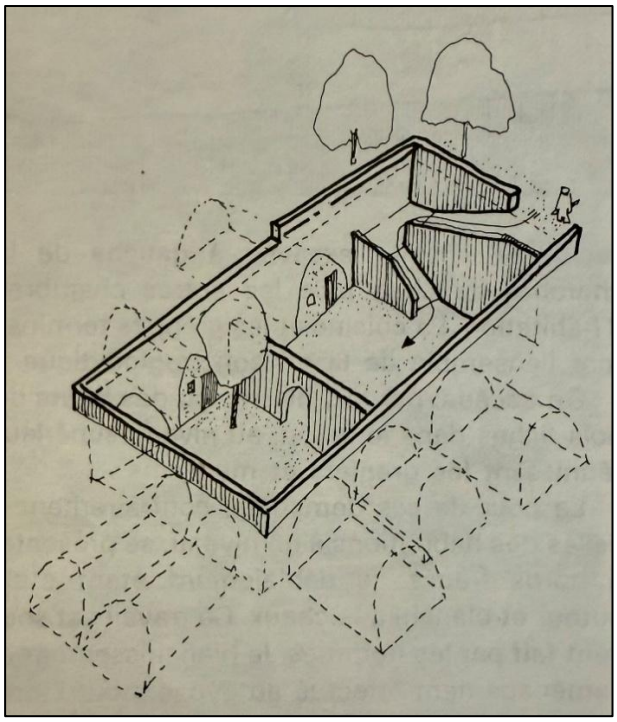


Figure 164 : Schéma d'habitations autour d'un patio central, Région de Loyang (Henan).

Espace intermédiaire entre le paysage ouvert sur l'extérieur et l'intimité des caves, la cour outre les rôles fonctionnels dans le plan de l'habitation, le micro-climat qu'elle apporte, est aussi le lieu de séquences architecturales particulières. La cour constitue en fait la pièce principale de l'habitation.

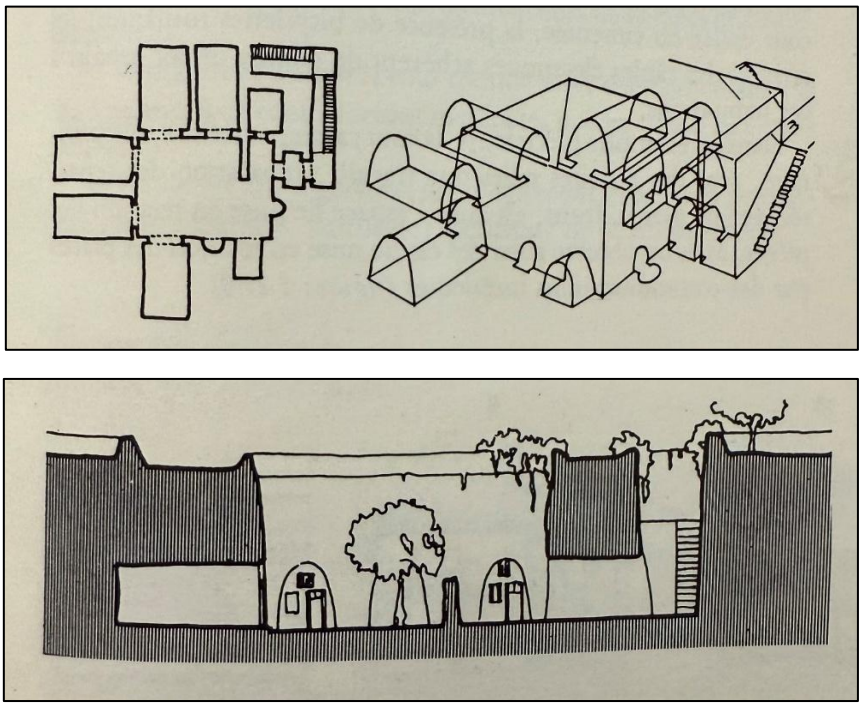


Figure 165 : Habitation creusée en puits dans le Gansu.

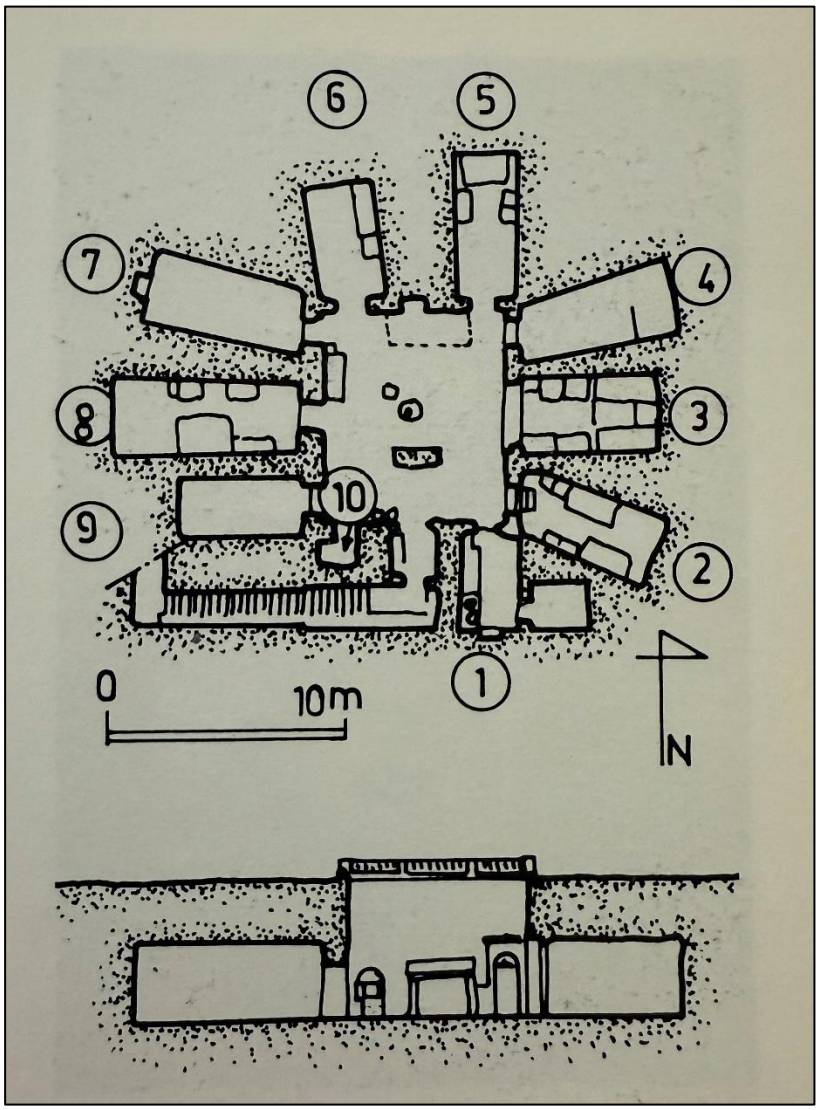


Figure 166 : Habitation en puits à Gong-Xian, Henan.

Une grande famille, comprenant trois générations, utilise l'habitation de façon suivante :

1 : cuisine utilisée par le fils aîné, sa femme et leurs quatre enfants ;
7 : cuisine utilisée par le reste de la famille ;
2-3-4 : chambres du fils aîné, sa femme et leurs quatre enfants ;
5 : chambre du fils cadet, sa femme et leur enfant ;
6 : chambre d'une fille célibataire ;
8 : chambre des parents ;
9 : magasin ;
10 : toilettes.

Dans les exemples précédents, la cour carrée, outre son rôle utilitaire, avec des activités telles que préparation des repas, séchage de grains, fruits, est aussi l'espace de mise en relation des pièces. Mais on observe aussi des cas de mise en relation des pièces par des communications intérieures.

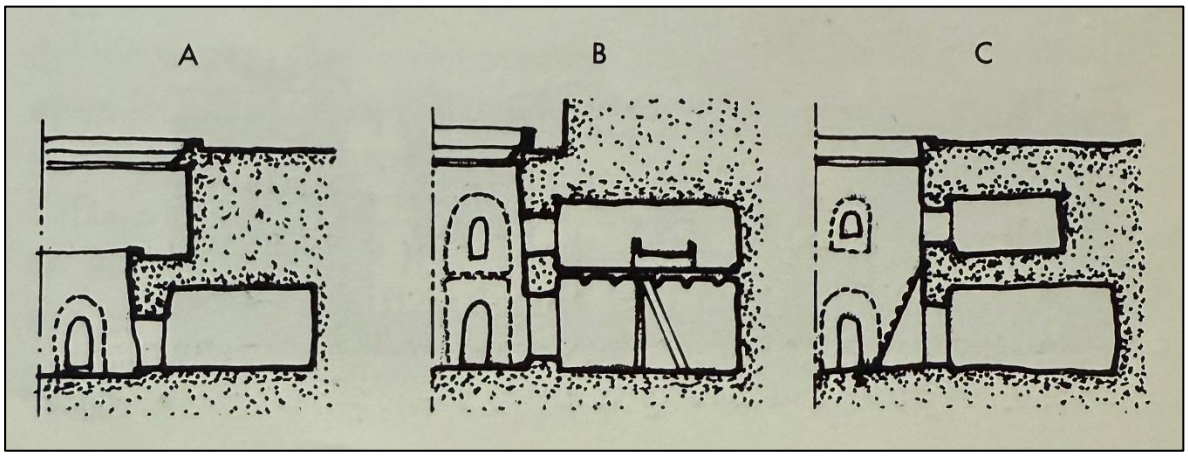


Figure 167 : Aménagement des grottes sur deux niveaux.
En (A) une terrasse couronne le premier niveau de grottes permettant, par le retrait de paroi ainsi rendu possible, un élargissement du puits, donc un meilleur éclairement.
En (B) c'est un plancher sur solives en bois qui détermine les deux volumes habitables.
En (C) les grottes sont indépendantes.

« Le puits du ciel » :

L'espace architectural constitué autour du puits est caractérisé par les contrastes qui peuvent être violents entre l'ombre et la lumière.

Lumière du carré découpé dans le ciel. L'ombre profonde des grottes va se découper sur les parois de lœss ocre écrasées de lumière. Les ombres portées d'un arbre ou d'objets occupant la cour seront violentes et contrastées.

Une inclinaison de 5 à 10° par rapport à la verticale, outre la meilleure tenue du lœss qu'elle permet, modifie pour l'observateur situé en fond de cour, la perception de l'espace.
La perspective verticale tend en effet à refermer au-dessus de cet observateur le carré ouvert dans le ciel, qui souvent est aussi profond que large. L'inclinaison des parois permet de contrarier cette perspective verticale.

Un micro-climat :

Un certain nombre de mesures mettent en évidence la stabilité thermique et le bon niveau de température des cavités creusées dans le lœss.

Entre la grotte d'habitation elle-même et le climat extérieur en surface, la cour constitue une zone intermédiaire, un climat intermédiaire :
— par sa large ouverture, elle est en contact direct avec le climat atmosphérique du lieu.
— mais par son enfoncement dans le massif de terre, elle est fortement conditionné par les températures du milieu environnant : le sol..
— les parois ensoleillées (sud et est ou ouest dans une moindre mesure) vont être échauffées par l'ensoleillement diurne et rayonner la nuit cette énergie reçue le jour.
— la protection des vents sera également très efficace dans les configurations en puits.

Toutes ces considérations expliquent l'existence d'un micro-climat, dérivé des paramètres atmosphériques du lieu et caractérisé par une grande stabilité.

Ce micro-climat aura deux types de conséquences :
— Permettre d'utiliser la cour comme pièce supplémentaire car ses conditions de confort seront meilleures que les conditions extérieures.
— Permettre une végétation soit d'agrément (fleurs) soit productive (arbres fruitiers, jardinage) spécifique de ce micro-climat.

Protection des bruits :

Entre deux espaces habités, on sait que l'amortissement maximum dans la propagation des bruits est obtenu par des parois lourdes. Les conditions réuni au sein des troglodytes creusés en puits sont exceptionnellement favorables de ce point de vue. En effet, la protection phonique est totale d'une cour à l'autre, d'une unité d'habitation à l'autre. Cela permettra un tissu très serré, très dense d'habitations troglodytes. Les bruits extérieurs provenant de l'animation du village (battage des céréales par exemple) sont aussi considérablement amortis dans la cour, a fortiori au fond des pièces habitées.

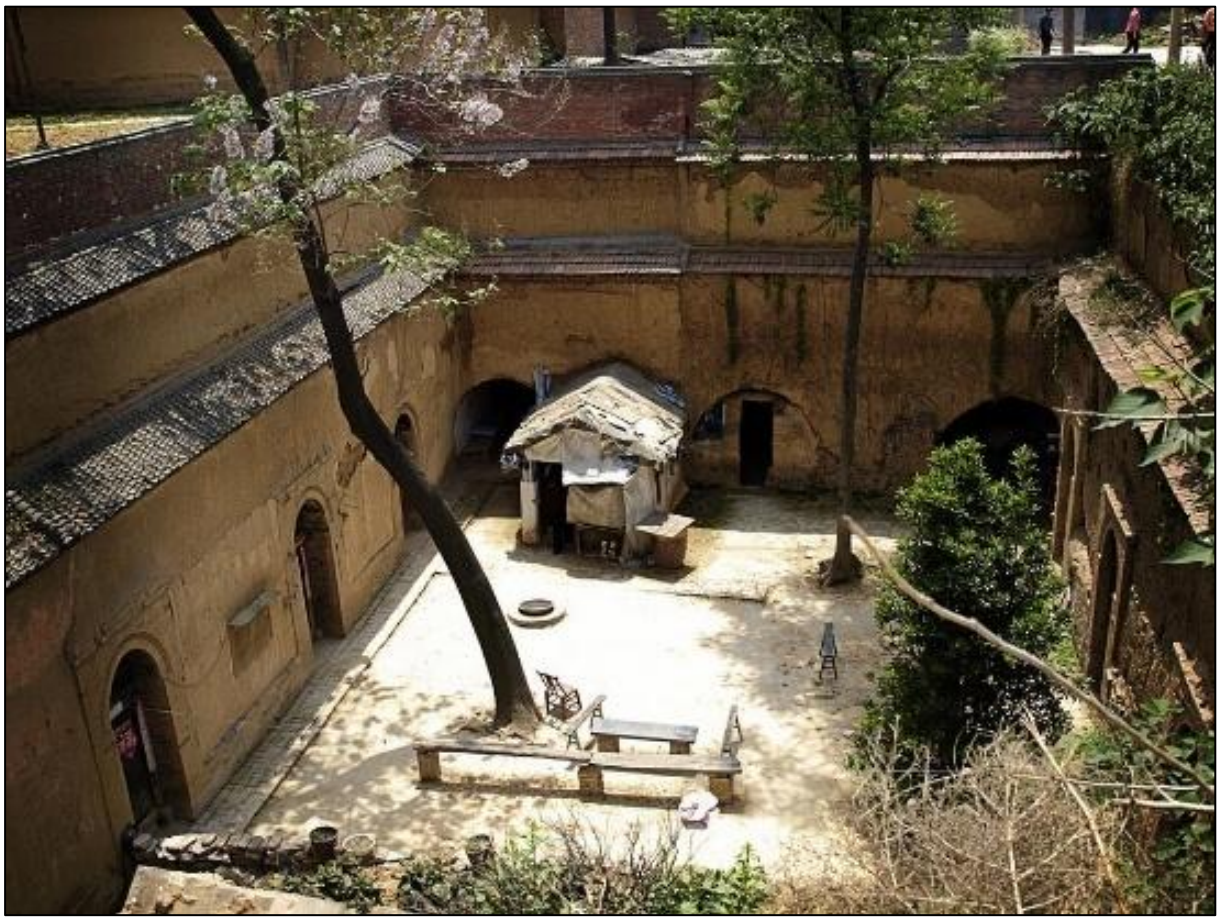


Figure 168 : Le « puits du ciel », Cour d'une habitaton troglodyte. (Région de Xian).
Source : mondesetmerveilles.centerblog.net

Calme, silence, entraînent une impression de sérénité caractéristique des « puits du ciel ».

Le mur écran :

Sa fonction principale dans la maison chinoise est d'empêcher que les esprits mauvais, qui se déplacent en ligne droite, ne puissent s'introduire dans l'habitation. Il s'agit d'un mur d'une hauteur de 2 m qui peut être en pisé, en adobe ou en brique cuite.

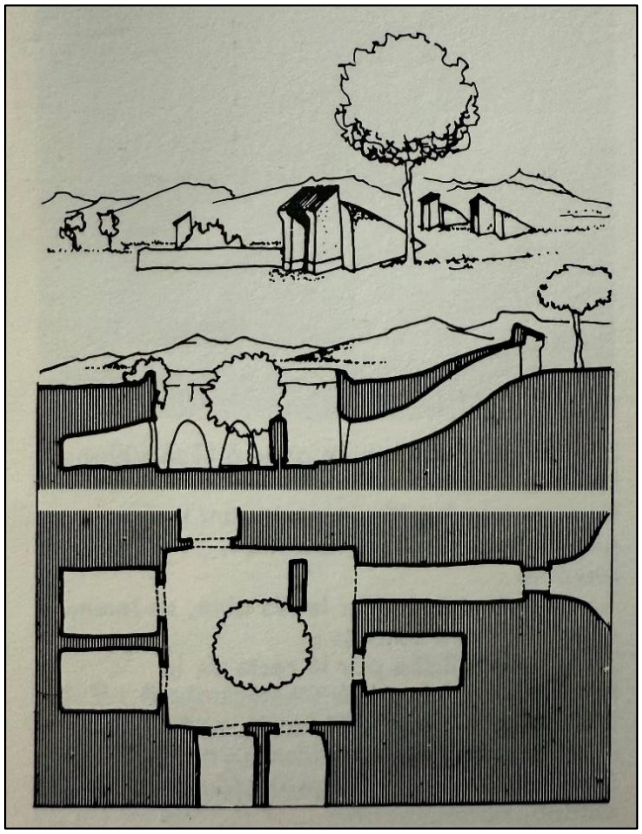


Figure 169 : Tunnel d'accès et mur-écran (Yingbi)

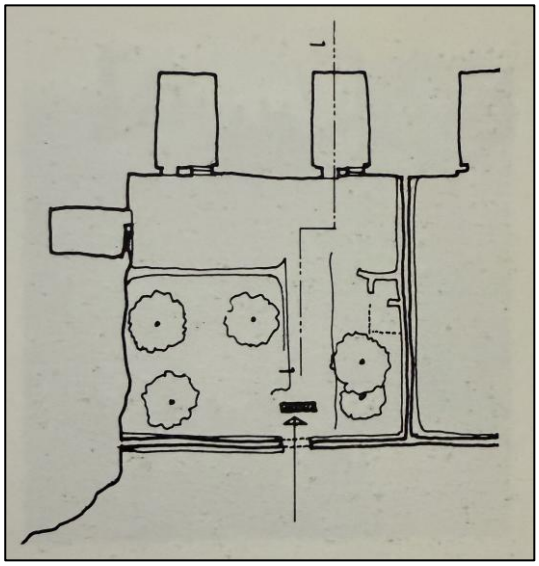


Figure 170 : Position du mur-écran (Région de Xian)

Si le « mur écran » de la maison troglodyte est un élément supplémentaire qui la relie à la maison chinoise traditionnelle, il participe aussi à une séquence dynamique qui découpe l'espace de la cour, introduit une hiérarchie de lieux, une diversité dans ce carré particulièrement unifié, qu'est la cour.

En effet, le mur écran ménage un espace d'entrée, une zone intermédiaire entre espace privatif de la cour, et la rue. La séquence de découverte de l'habitation depuis la zone publique jusqu'aux zones privées est ainsi progressive, décomposée.

Les formations complexes :

Plusieurs puits peuvent être reliés entre eux par des liaisons souterraines. Sur la figure 14, une grande cour divisée en deux cours carrées par un mur est reliée à un second puits par une pièce d'habitation.

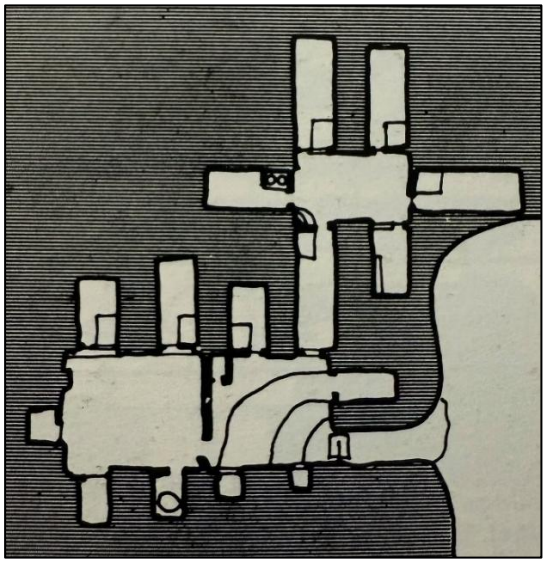


Figure 171

De même que des constructions en adobe, pisé, brique, prolongeaient extérieurement les troglodytes latéraux, le puits peut être partiellement occupé par des pièces construites. C'est souvent là une façon d'accueillir un nouveau couple (enfants) dans une habitation sans disposer d'un terrain supplémentaire.

1.2.4.4 Les grottes construites

Au sein des « grottes construites », il y a une continuité entre la forme troglodytique et la forme construite entre ces deux modes constructifs. En effet, la grotte construite se matérialise par une extraction progressive de l'habitat du massif de terre, dégageant ainsi des parties construites. En effet, née dans le « creusé », la forme voûtée va acquérir une autonomie par rapport aux conditions troglodytiques initiales, et être interprétée dans le domaine du « construit ».

Les conditions mécaniques de tenue de terre induisent la voûte. Lorsque ces conditions changeront (les techniques de construction en élévation se substituant aux techniques de creusement), la forme restera et sera donc obtenue par une technique de substitution. Ainsi, la grotte va progressivement sortir de la terre, jusqu'à son dégagement complet.

Dans le Shanxi, par suite d'une pénurie de bois, la voûte se serait peu à peu substituée aux charpentes de bois et ce procédé se serait étendu aux habitations troglodytiques.

Nous pouvons d'ailleurs suivre quelques étapes successives vers cette « libération » des conditions originelles.

Première étape (Figure 1) : la grotte est brute, sans apports de consolidation, seule la courbe de résistance de la voûte est lisible.

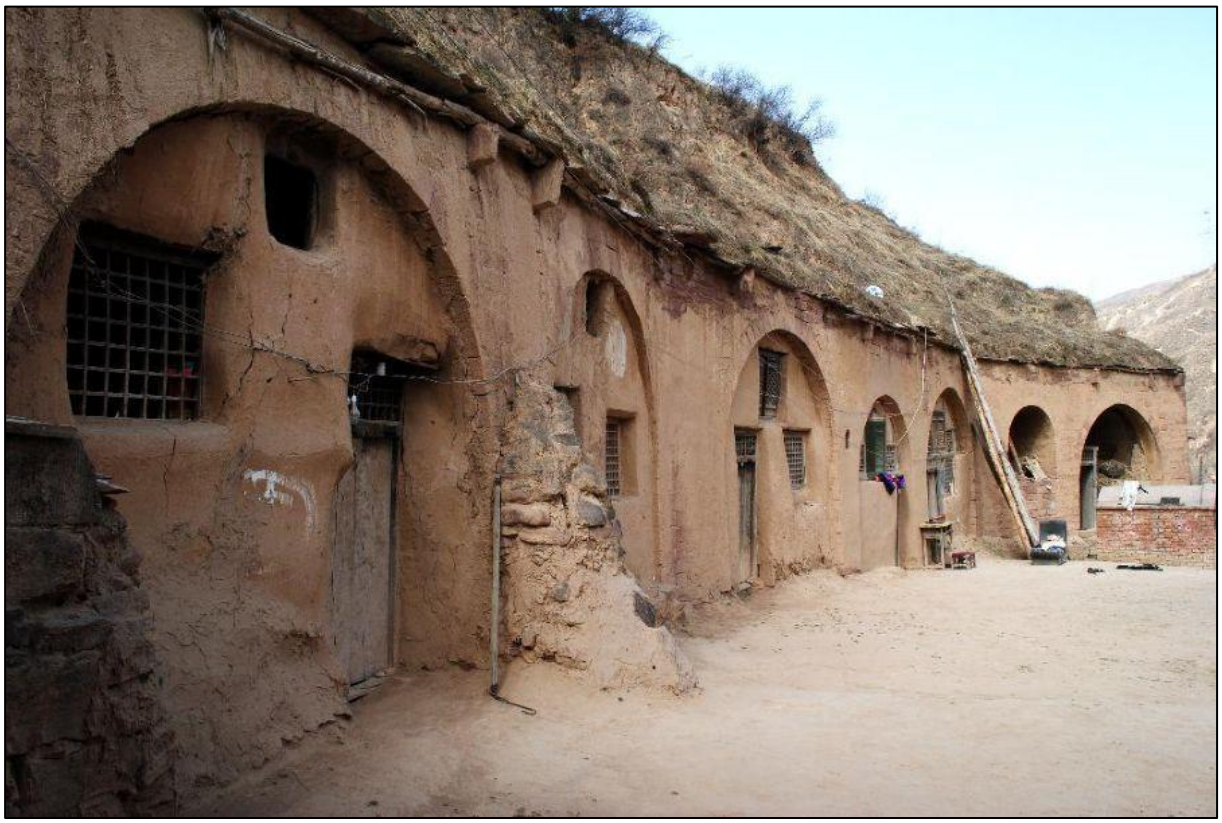


Figure 172 : Grottes creusées à voûtes paraboliques (Shaanxi). Source : 95408.com

Deuxième étape (Figure 2) : la façade est traitée, des éléments de consolidations apparaissent : enduit à la terre et à la chaux sur le parement apparent, soubassement en maçonnerie ou en briquette.

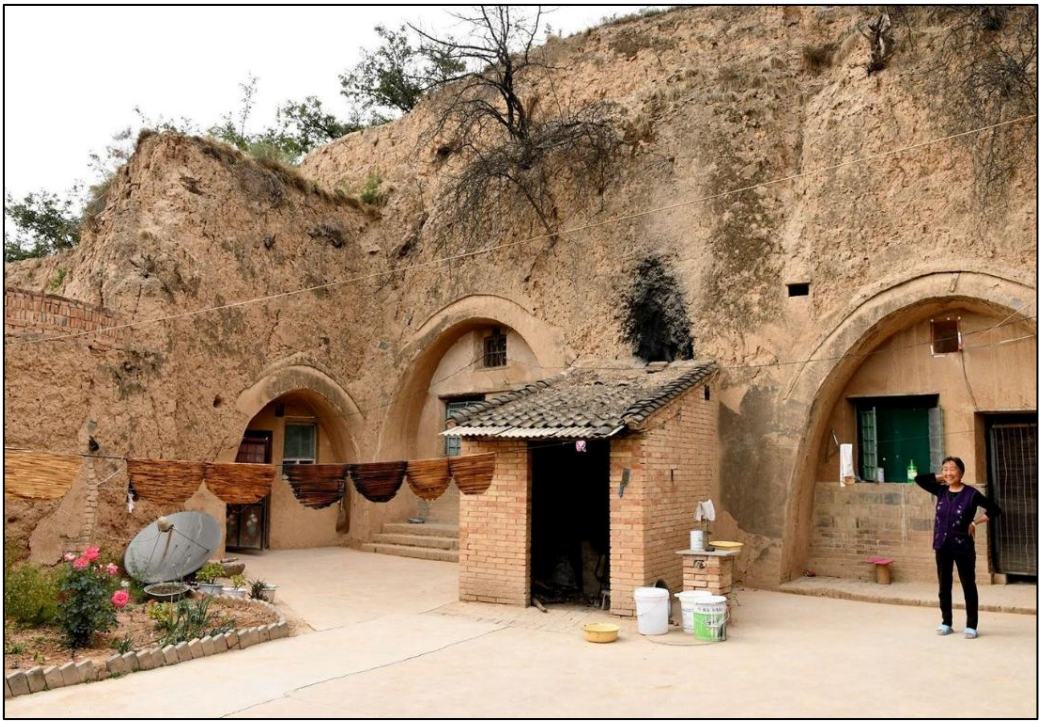


Figure 173 : Façade de grottes dans le Shaanxi : briques de terre, torchis, enduit à la terre et à la chaux sur les murs.
Source : herrtranslator.blog

Troisième étape (Figure 3) : la façade est intégralement construite à l'avant du front de taille. A l'intérieur la paroi est consolidée par une voûte en brique.

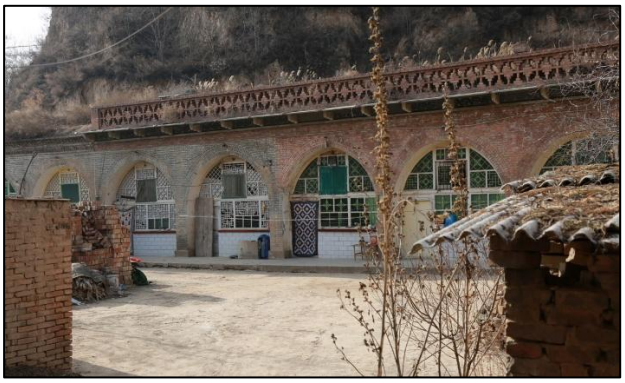


Figure 174 : Grottes construites (Shaanxi) avec parement de brique.
Source : huaban.com

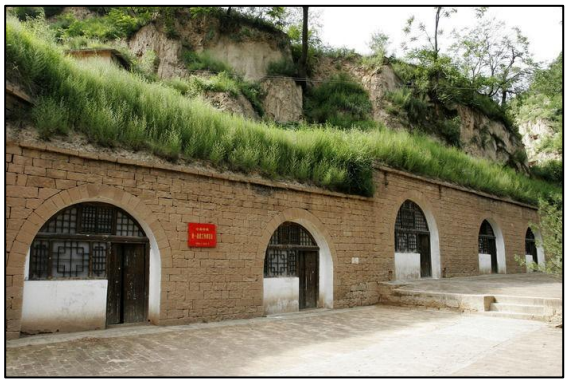


Figure 175 : Grottes semi-construites disposées en bande.
Source : french.peopledaily.com.cn



Figure 176 : Grottes construites dans le Shaanxi.
Source : 4travel.jp

A ce stade-là de l'évolution, il est clair que le degré d'élaboration de la construction augmente considérablement : le mur de façade joue un rôle de consolidation du massif de terre.
Une masse de terre, modeste encore, apparaît en remblai.

La disposition en bande des habitations de la figure 3 se trouve tout à fait modifiée lorsque les grottes sont sur deux niveaux. Un retrait de l'étage supérieur permet un décrochement des murs de façade. Il y a apparition de corniches obtenues par diverses techniques : briques en encorbellements successifs, tuiles disposées en génoise comme dans la figure 4.

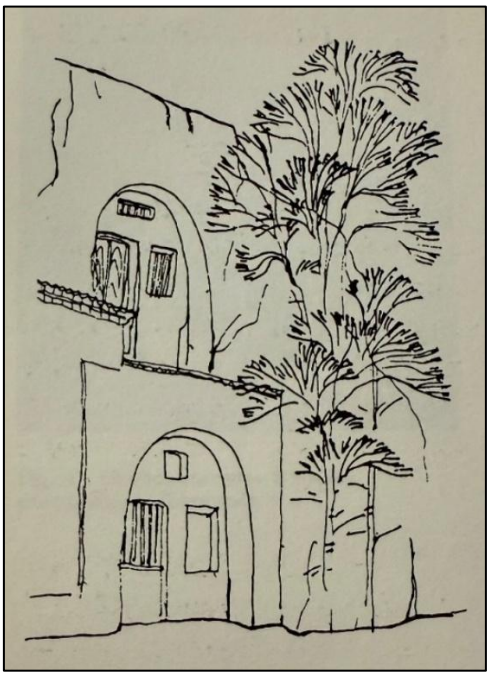


Figure 177 : Troglodytes latéral sur deux niveaux (Pinglu,Shanxi).

Sur la figure 8, la progression de la cellule d'habitation vers l'extérieur s'accentue.
Il s'agit à ce stade de la juxtaposition d'une grotte construite et d'une grotte creusée.
Les deux voûtes demeurent dans le prolongement l'une de l'autre. L'éventail des grottes creusées, construites, ou semi-troglodytiques, a été mis à profit en particulier dans la construction du village de Dazhai.

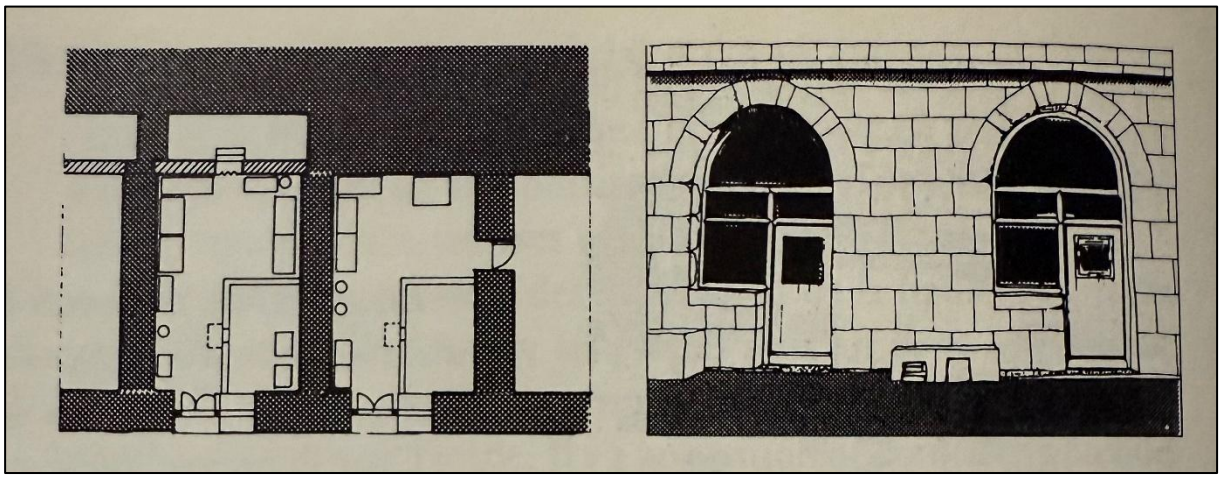


Figure 178 : Logements semi-troglodytiques, Dazhai.

Les avantages climatiques d'une telle configuration construite sont bien sûr très semblables à ceux de la configuration creusée qui lui a servi de base. L'inertie globale de la construction, par l'épaisseur du toit et des parois, est conséquente. Le gel ne peut jamais atteindre les voûtes construites et les paramètres climatiques de ces régions de climat continental, froid et sec en hiver, font qu'aucune humidité ne pénètre les grottes. Ainsi, il y a une parfaite adéquation du mode de construction aux données climatiques locales (ensoleillement, orientation, températures, précipitations).

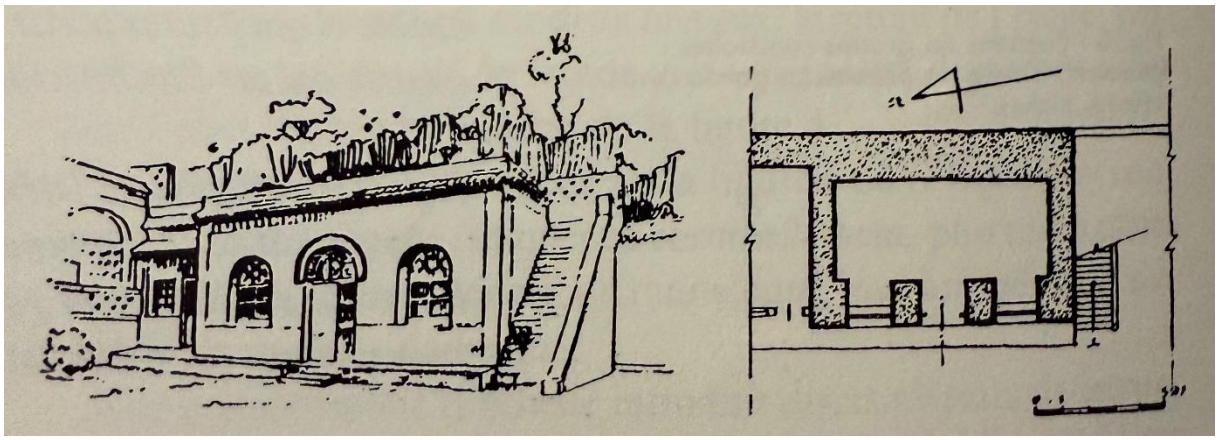


Figure 179 : Construction traditionnelle semi-troglodytique : une « grotte construite ».

La figure 10 représente une construction en pisé possédant un toit à deux pentes avec une couverture en tuiles qui tend à détacher cette architecture de plus en plus des connotations liées à la grotte. Ici, la seule référence à la grotte est le mur de façade, disposé ici en pignon, qui reprend le dessin des entrées de grottes dans la forme et le marquage de l'ogive et dans les percements.

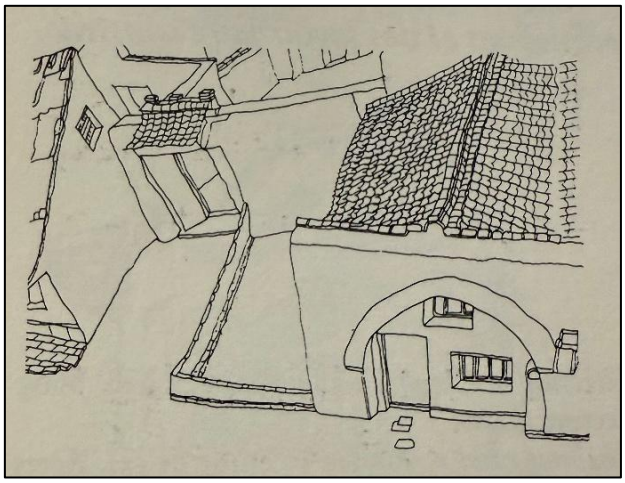


Figure 180 : Maison en pisé reprenant une façade de grotte (Gansu).

Le jeu du creuse et du construit :

Les exemples présentés illustrent une progression dans le degré d'élaboration d'une façade de troglodyte latéral. C'est la preuve que l'architecture des grottes peut trouver une expression extérieure qui intègrera tout ce que le savoir-faire traditionnel sait exprimer en matière de vocabulaire de formes et de techniques.



Figure 181 : Troglodyte latéral avec façade construite.

Ici le degré d'élaboration est ample, les éléments du vocabulaire architectural construit sont nombreux : corniches et génoises, niches encastrées, dessus de panneaux en relief ou en creux, murs de couronnement ajourés, utilisation de la brique et de la tuile pour souligner les lignes d'une architecture.

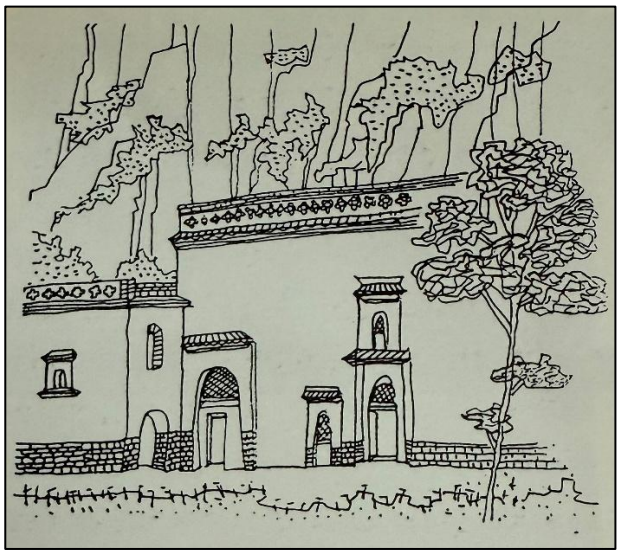


Figure 182 : Façades de grottes construites.

Dans ce dernier cas, le troglodyte latéral ne comprend pas seulement une façade de maçonnerie, mais une partie construite importante, prolongeant les grottes creusées dans le loess par des grottes construites. « Creusé » et « construit » sont ici intimement associés en une synthèse des techniques et des savoir-faire constructifs de grande qualité.

Ainsi, nous avons montré comment on pouvait trouver une continuité d'évolution de la grotte creusée à la grotte construite. Ces deux explications ne sont pas exclusives l'une de l'autre, elles montrent en tout cas la permanence d'un type de plan (donc d'une organisation de vie), qui peut être interprété par des solutions constructives différentes.

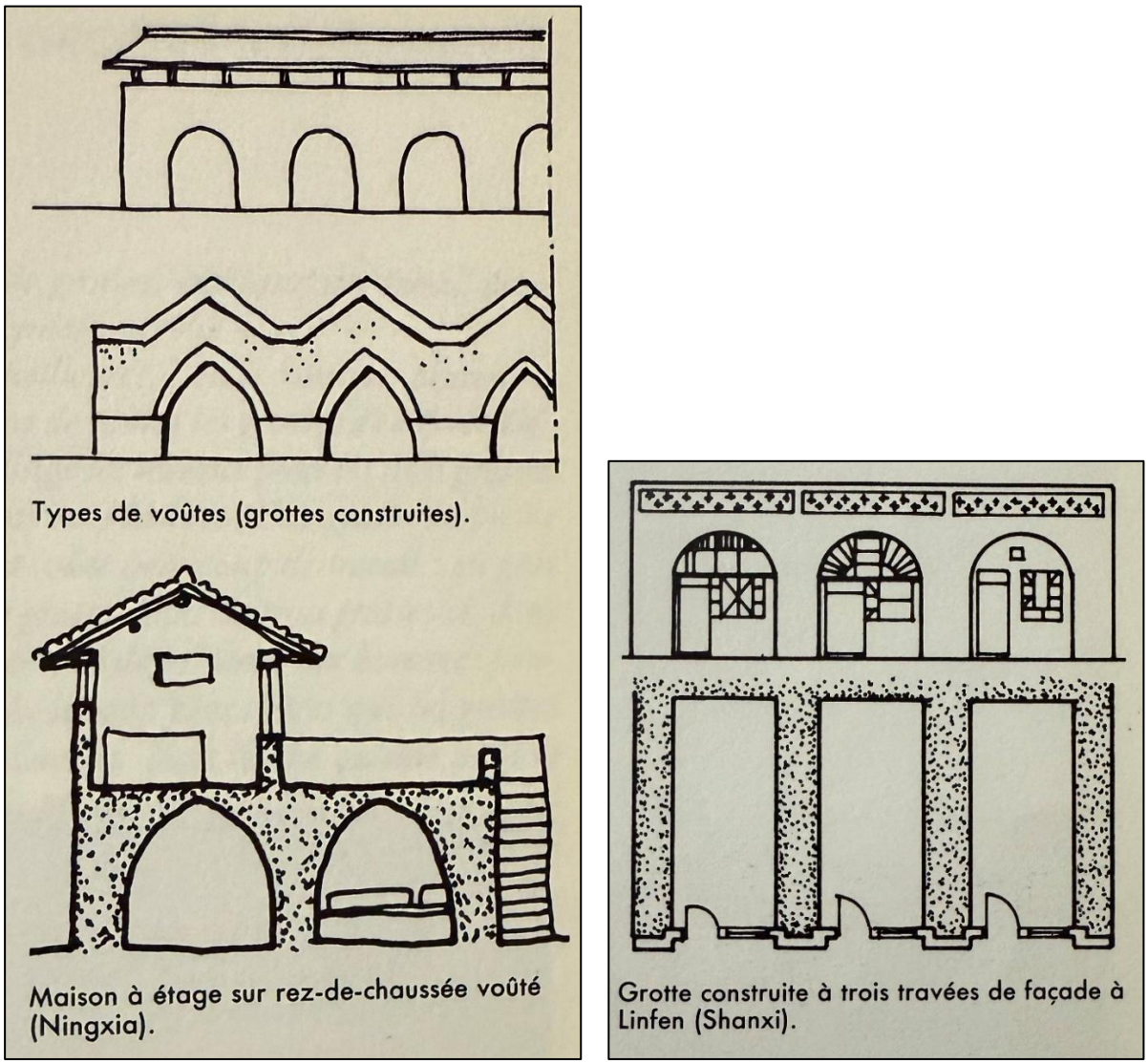


Figure 183 : L'art de la charpenterie a trouvé le moyen de s'associer à la construction des grottes, rencontre paradoxale de deux techniques qu'il est à priori difficile d'imaginer associées.

L'édification des grottes construites :

Mao K'o-Ye, après avoir décrit quelques inconvénients des grottes creusées, décrit la réalisation des grottes construites :

« Les grottes en pierre sont meilleures. Une grotte en pierre demande un plan minutieux et coûte beaucoup de travail : en gros quatre cents jours de travail par grotte. Elles sont donc beaucoup plus chères que les grottes en terre et que les maisons ordinaires. Mais tandis qu'une maison ordinaire ne résiste pas plus de trente ans sans réparations importantes, une grotte en pierre tient quatre ou cinq cents ans sans difficulté. En principe on peut même dire qu'une grotte de pierre est indestructible. Seuls, les fenêtres et le bois du mur supportant les fenêtres doivent être entretenus, car le bois pourrit. Mais dans une maison ordinaire, il y a bien plus de choses qui peuvent pourrir et qu'il faut remplacer.

En principe, il vaut mieux qu'une grotte s'ouvre vers le sud. Cela veut dire que le soleil la réchauffe en hiver, quand il est bas, et n'y pénètre pas en été, quand il est haut. Mais qu'il s'agisse de grottes en terre ou de grottes en pierre, il ne faut pas attacher trop d'importance à ce détail: il faut surtout bien les placer par rapport à la qualité du sol

On construit les grottes avec un four et une cheminée, mais nous faisons toujours une cuisine extérieure pour l'été, quel que soit le type de la grotte. Cela contribue à donner de la fraîcheur en été et les femmes trouvent plus avantageux de travailler dehors. Dans ce cas, nous plaçons la cuisine extérieure en un endroit où il y a de l'ombre.[...]

Nous commençons le travail en creusant les fondations, jusqu'à 10 tch'e de profondeur. Ces fondations correspondent à la surface de la future grotte. Puis, nous faisons une base de lœss fortement tassé. Si on le fait bien soigneusement, cette base devient presque aussi dure que du béton. Sur cette base nous élevons deux murs. Ce sont les murs extérieurs de la grotte dans le sens de la longueur. Le sol est fait de pierres, Lorsque ces murs sont arrivés à une hauteur de 2m, nous terminons le mur intérieur de la grotte dans le sens de la largeur. Puis, nous calculons la voûte. Elle doit former un demi-cercle et reposer sur les deux murs intérieurs dans le sens de la longueur. Le mur du fond de la grotte sera le gabarit de la voûte. Nous construisons des échafaudages dans la grotte et nous construisons la voûte en pierre. Ça demande un travail minutieux, car il faut tailler chaque pierre de sorte qu'elle entre exactement à sa place. La voûte doit aussi être couverte de lœss tassé. (...]

Ainsi nous obtenons un toit qui ne demande pas d'entretien bien que l'herbe y pousse et que nous laissons les chèvres brouter sur le toit; aucune humidité ne peut pénétrer dans la grotte. Pour l'écoulement des eaux, nous laissons le toit pencher vers l'intérieur où nous avons disposé un chenal en terre cuite qui détourne l'eau. Ni la pluie, ni le gel, ni l'herbe ne peuvent faire éclater un toit comme celui-là. Dans le Nord, où on construit des grottes similaires, mais seulement avec de l'argile séchée au soleil, et où les matériaux ne sont pas assez solides pour supporter cette charge, il faut tasser le toit d'argile tous les ans[3] ».

1.2.4.5 Les architectures troglodytiques complexes

Le troglodytisme chinois, qu'il soit creusé ou construit, permet une adaptation à des sites particulièrement accidentés du pays du lœss dans la topographie de ravins, de collines, de terrasses naturelles taillés et crevassés par l'érosion en remodelant ces sites en même temps que la construction d'habitations : terrasses sur voûtes des grottes construites, soutènement de terrain ménageant plusieurs terrasses, imbrication dans la colline de divers niveaux de grottes creusées... C'est précisément dans ce genre de situations qu'il trouve son expression la plus aboutie : la mise en valeur des sites par une mise en scène de l'architecture.

La complexité du troglodytisme chinois va être élaborée dans des résidences tenant à la fois du palais chinois et de la demeure fortifiée qui vont réaliser une synthèse entre le programme de la maison chinoise et les principes qui président à son organisation à savoir une axialité dans la composition et sa conséquence, symétrie des ailes de bâtiment autour des cours carrées et d'autre part, la topographie accidentée qui crée des conditions défavorables pour l'application des principes précédents.

3. Jan Myrdal, op. cit.

Le manoir de la famille Jiang :

La vaste demeure de la famille Jiang présentant un aspect fortifié a été achevée en 1886 et occupe la partie haute d'une colline de la région de Mi-Zhi.

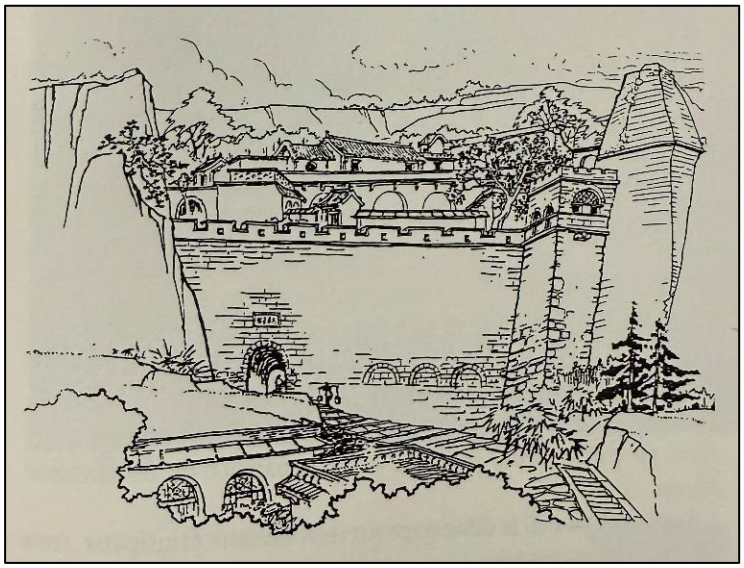


Figure 184 : Manoir troglodytique de la famille Jiang, région de Mi-Zhi (Shaanxi).

Une architecture paysage :

L'inclusion dans une combe de l'ensemble des constructions étagées permet une protection totale des bâtiments par le sommet de la colline. Cette protection et l'orientation au sud garantissent aux terrasses qui composent la demeure et aux diverses cours, des micro-climats protégés. La vaste muraille aux sommets crénelés bloque la demeure entre les deux versants de la combe.

Le plan se développe sur trois niveaux principaux, trois plateaux articulés.

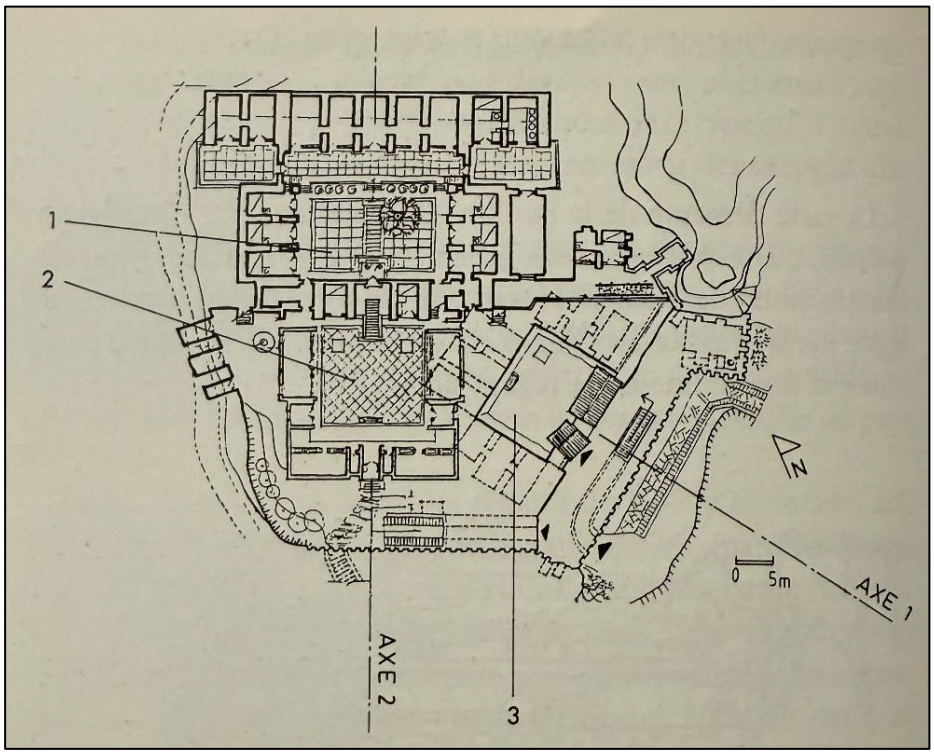


Figure 185 : Plan.

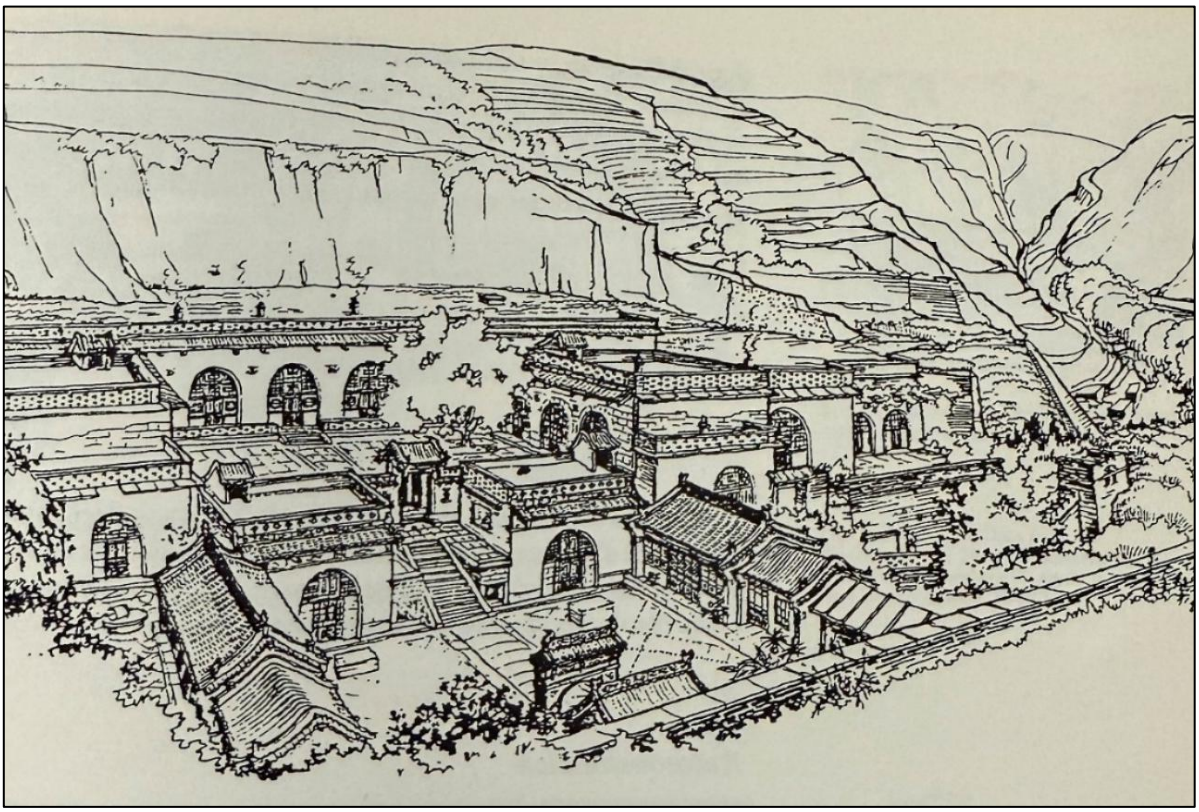
1.Cour sur terrasse supérieure

2.Cour sur la terrasse intermédiaire

3.Cour creusée. Niveau inférieur.

L'entrée principale conduit par un escalier à une première terrasse sur laquelle s'ouvre une cour carrée bordée sur trois côtés de grottes creusées (cour n° 3). La symétrie de ce premier ensemble est rigoureuse : la cour carrée est celle d'une habitation creusée en puits.
Le quatrième côté est constitué par un mur comprenant la porte d'entrée à ce premier ensemble troglodytique.

De la terrasse précédant cette entrée part une rampe (escalier + plan incliné de roulement) conduisant au niveau intermédiaire où, autour d'une cour carrée (n° 2), s'organisent trois ailes de bâtiments construits. Sur le côté opposé à l'entrée de la cour, s'ouvre une porte entre deux grottes construites symétriques qui donne accès à la dernière terrasse (n° 1). Sur cette plate-forme supérieure s'organisent sur le même axe de symétrie, les appartements du maître de maison (figure 4). Le bâtiment du fond aligne neuf travées voûtées.



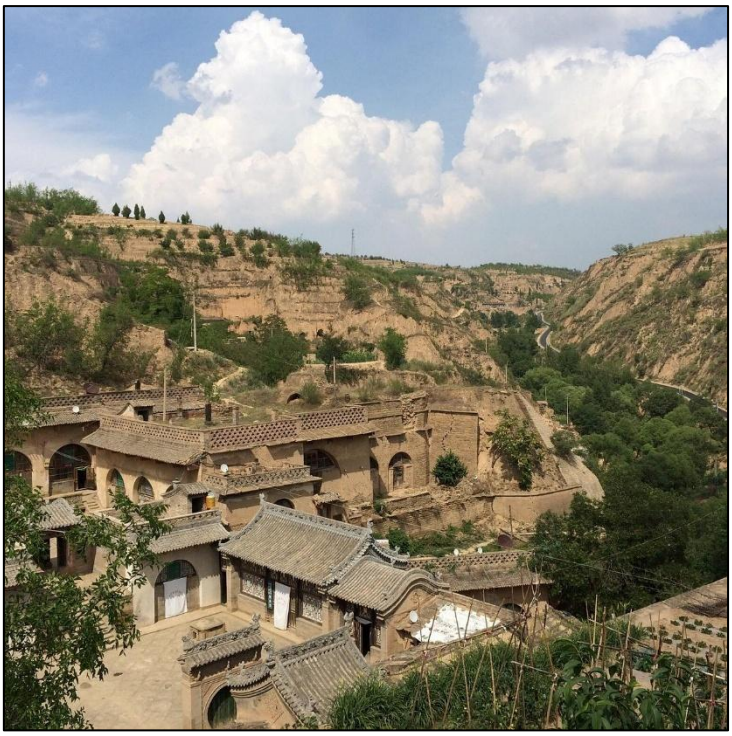


Figure 186 & 187 : Demeure de la famille Jiang. Région de Mi-Zhi (Shaanxi).
Source : tripadvisor.fr

Ainsi à partir du plan de la demeure, on peut distinguer trois ensembles homogènes d'habitations sur cour carrée organisé selon les principes traditionnels de la maison chinoise :
- l'ensemble creusé (1) :
- l'ensemble construit traditionnel (2) ;
- l'ensemble de grottes construites.

Tous les registres de l'architecture chinoise traditionnelle ont pu s'exprimer au sein de cete ensemble d'habitations : décorum commun et unificateur, parements, boiseries, jeux des toitures, art des jardins.

Ainsi, cet exemple rassemble tous les éléments d'une démarche de prise de possession d'un site par une architecture caractéristique des conceptions chinoises traditionnelles de l'aménagement de l'espace.

Le manoir de Dian Lui :

La maison de Dian Lui, dans le district de Xingyang (Henan) est un exemple d'autoconstruction, d'interprétation par un couple de paysans chinois, de l'habitation troglodytique traditionnelle à laquelle ils ont apporté des améliorations (figures 7 à 8).

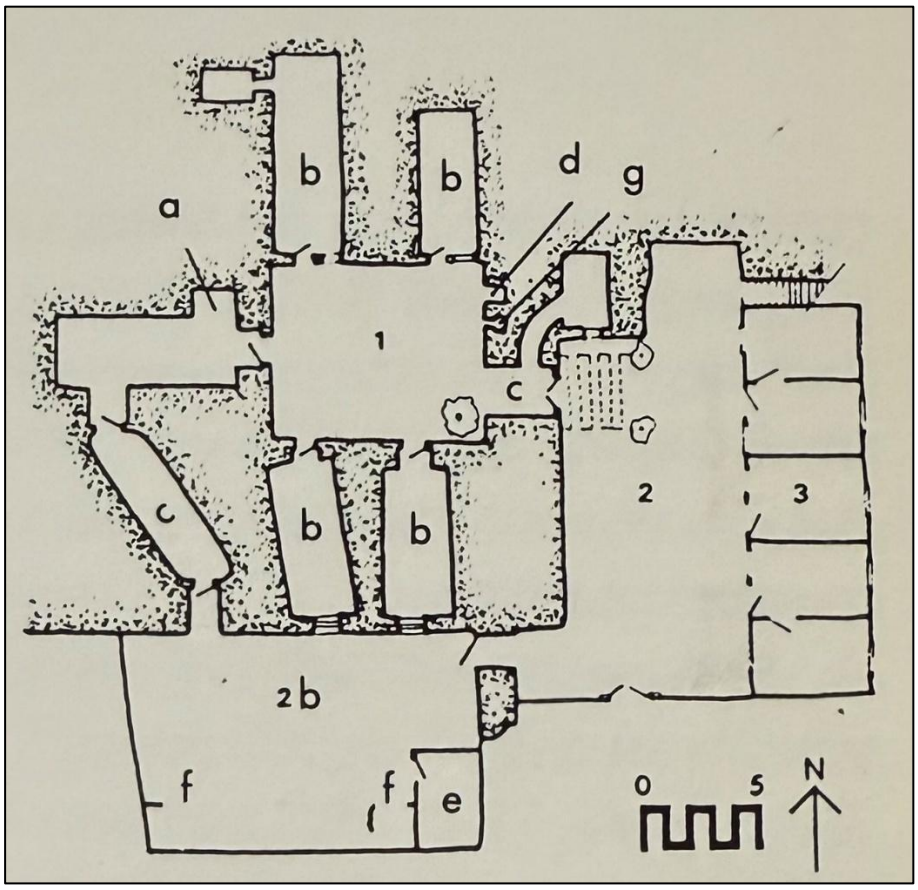


Figure 188 :

a. Cuisine.
b. Pièces d'habitation.
c. Circulation.
e. Porcherie.
f. Sanitaires.
g. Poulailler.
d. Réserve.

1. Cour creusée.
2. Cours construites d'orientation différente.
3. Aile construite.

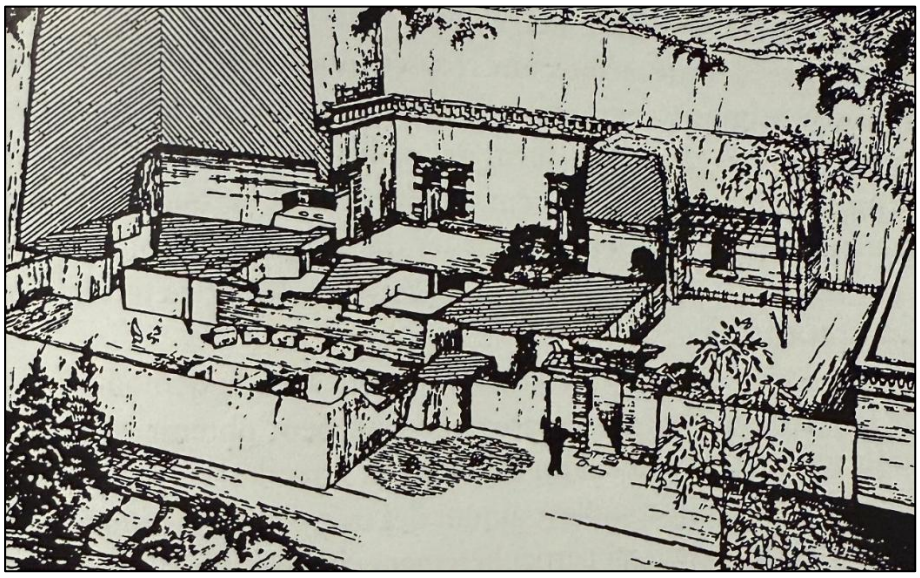


Figure 189 : Maison de Dian Lui

Autoconstruction :

Le couple constitué par Dian et sa femme a travaillé deux ans à l'extension d'une habitation initiale. Le point de départ : trois grottes existaient à l'origine. Un puits carré a été creusé au nord de ces pièces (cour creusée 1). Deux principales conséquences : création de trois grottes supplémentaires sur les côtés nord et ouest de cette cour, et en second lieu, création d'un « second jour » pour les pièces au sud de cette cour. Ces pièces sont ainsi ventilées et mieux éclairées.

Une aile est construite à l'est (3). Elle comprend cinq pièces en alignement, et délimite ainsi la cour d'entrée (cour 2).

Le travail de Dian et de sa femme a abouti à développer des séquences très diversifiées d'architectures, correspondant d'ailleurs à des usages différents.

La cour d'entrée, bien isolée de l'extérieur distribue l'aile de pièces construites, le puits intérieur, ou la cour de service (2b). Le puits intérieur est le lieu de l'intimité sur lequel donnent toutes les pièces d'habitation.

Les hauteurs des parois de ce puits central sont inégales. En effet, une dizaine de mètres au nord et à l'ouest protègent efficacement du vent et de la neige en hiver. A l'est, la falaise est réduite à une hauteur de 5 m permettant ainsi la pénétration du soleil. Au sud, la hauteur du lœss est de l'ordre de 8 m afin de laisser une épaisseur de sol suffisante aux grottes ventilées. A mi-hauteur, un retrait de la paroi est aménagé. Un parapet de briques permet d'empêcher d'éventuelles chutes de terre vers la cour.

La cour de service, bien séparée des autres secteurs de l'habitation, est occupée par les animaux (volailles, mouton, cochon).

La terre a été utilisée selon la tradition pour fabriquer divers « mobiliers » : fours de cuisine en terre, lits chauffés par dessous (kang), niches, armoires, rangements divers.

La maison de Dian Lui constitue la démonstration de la grande qualité des espaces que l'on peut obtenir en jouant sur le registre du creusé et du construit. L'articulation, l'enchaînement de l'ensemble complexe autour des trois cours constituant trois séquences différentes est particulièrement clair. Les logiques des séquences architecturales et du fonctionnement de l'habitation se superposent.

Retraite de Mao a Yen'an : les grottes dans le jardin des jujubiers :

Mao et quelques milliers d'hommes, rescapés de la Longue Marche, pénètrent au Shaanxi et y découvrent des terres ravinées et creusées de grottes où ils s'installèrent et y passeront quatorze ans avant de reprendre en 1944 à la tête de l'Armée Rouge, l'offensive décisive contre le Guomindang qui les conduiront à Pékin le 23 janvier 1949.

« A l'automne 1938, Mao quitta le mont Phénix pour une grotte de trois pièces à Yangialing. Taillé à flanc de côteau, l'appartement, étayé par des pierres, avait cinq mètres de profondeur, et ses murs étaient passés à la chaux ».

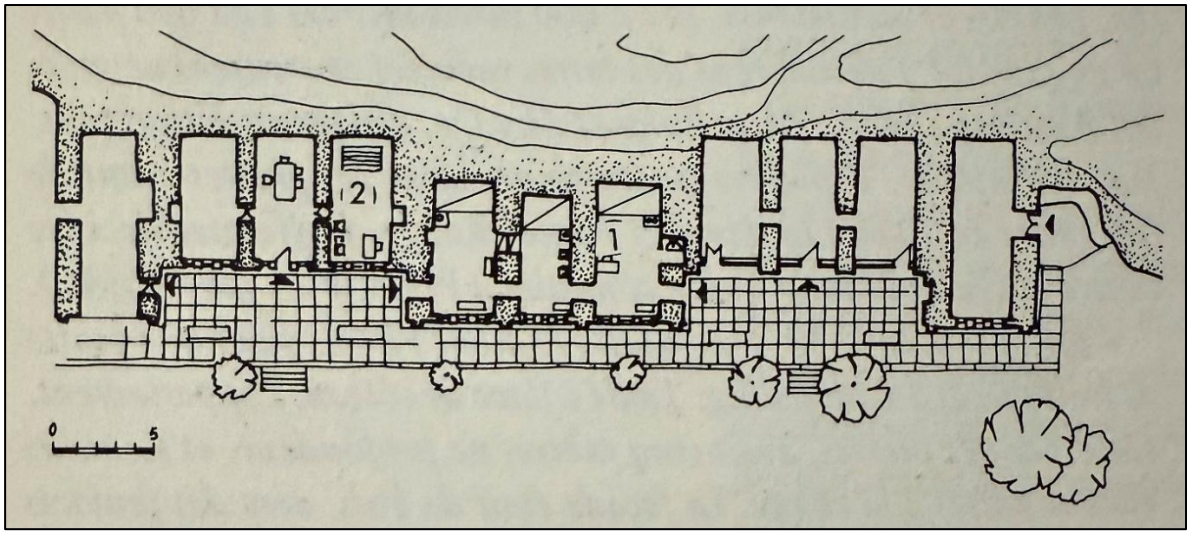


Figure 190 : Plan de l'une des grottes de Yan'an habitées par Mao Zedong (1) et Zhou Enlai (2). Cet ensemble troglodytique latéral témoigne d'une composition symétrique.

1.2.4.6 Les groupements urbanistiques

1.2.4.6.1 Les groupements de troglodytes latéraux

Les troglodytes latéraux sont la forme d'occupation des pentes de coteaux ou des versants de vallée. Ils sont susceptibles de s'adapter à des versants rectilignes ou suivant les courbes de niveaux. Selon la hauteur des reliefs ils se développeront sur un, deux ou trois niveaux.
Une zone basse de culture occupe le fond de la vallée, facilement irrigable.

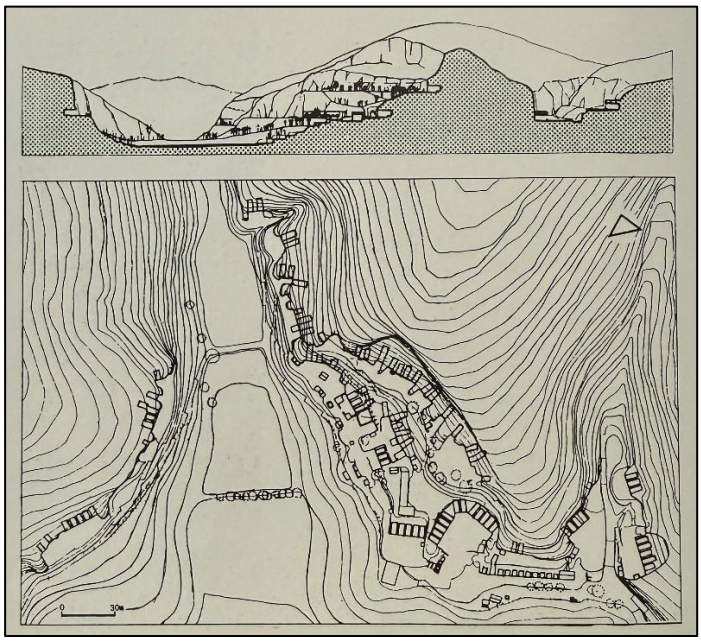


Figure 191 : Village troglodytique en vallée, Coupe et plan, Qinguabian (Shaanxi).

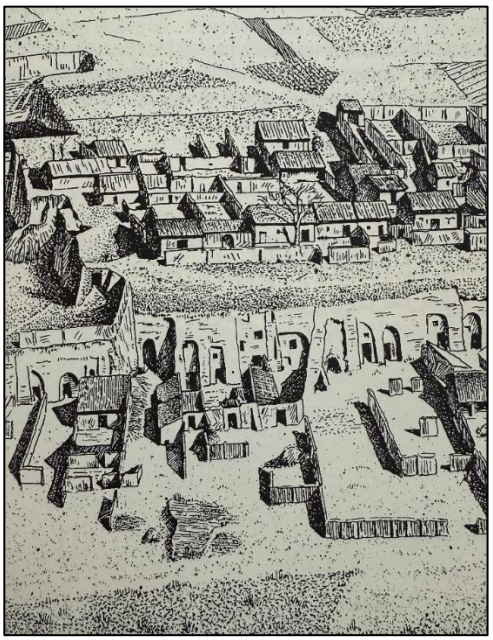


Figure 192 : Village du Shaanxi associant des habitations creusées latéralement et des

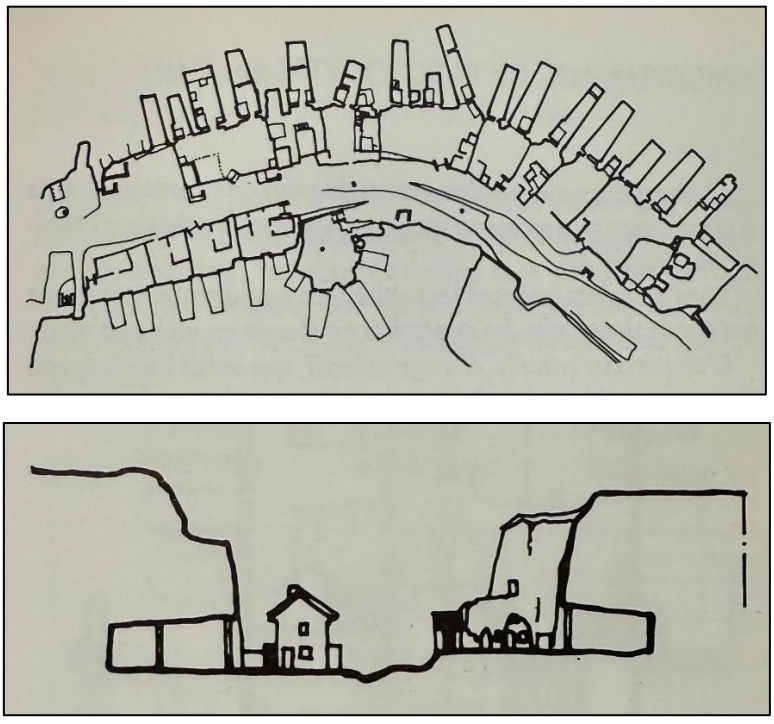


Figure 193 : Village troglodytique en site de vallée étroite (Gansu).

1.2.4.6.2 Les groupements de troglodytes en puits

C'est par extension des dimensions du puits que s'amorce ce type d'organisation plus complexe qui peut regrouper une dizaine d'habitations.

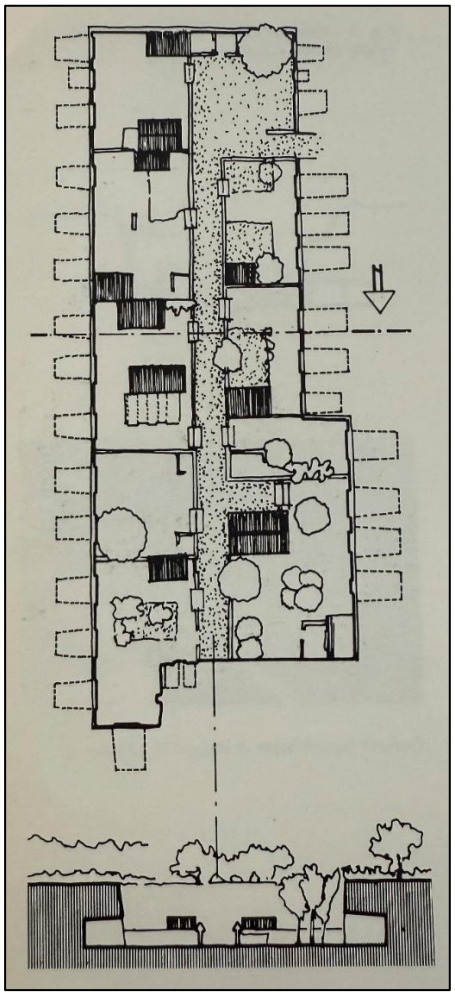


Figure 194 : Unité d'habitation pour dix familles à Dujihao-Quingyang, province de Gansu.

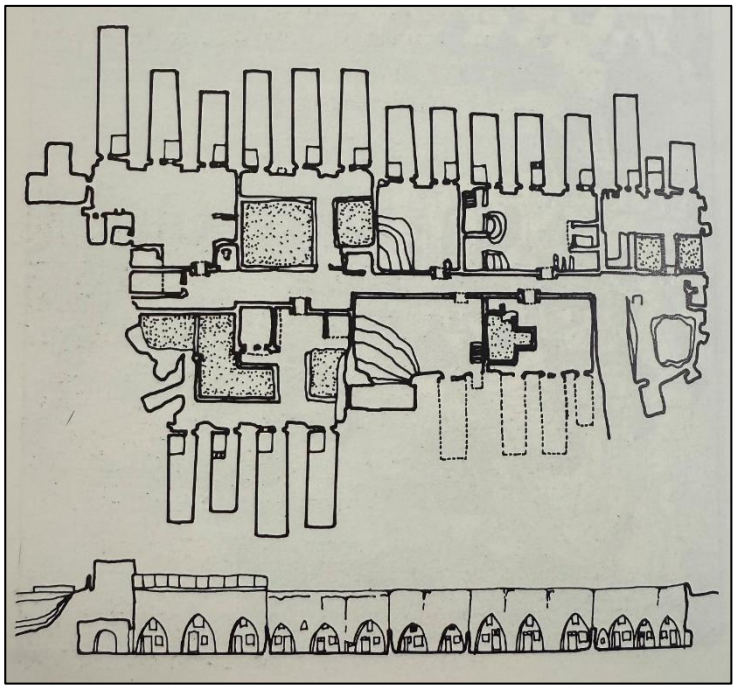
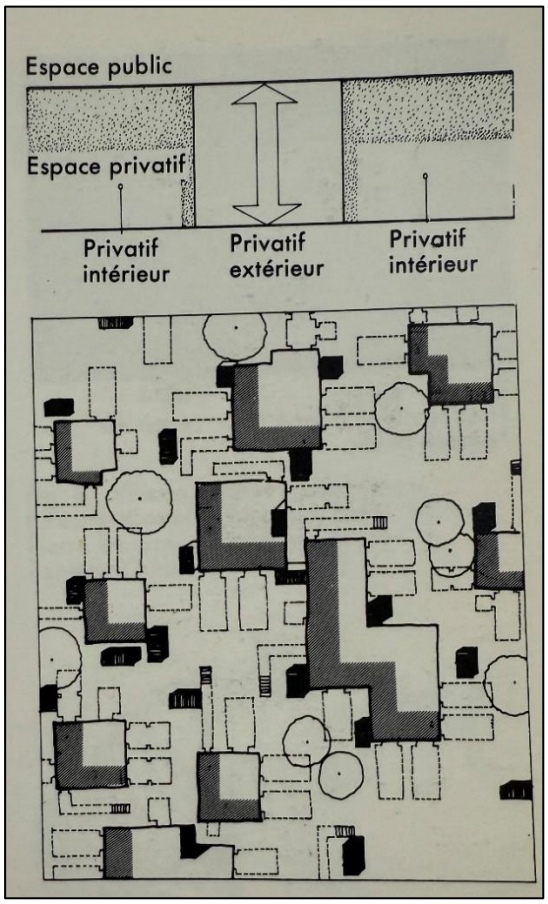


Figure 195 : *Unité d'habitation comprenant huit maisons sur cour (Ningxian,*

Dans ces habitats collectifs les habitations sont distribuées par une rue étroite dont l'une des extrémités est élargie en forme de place. C'est par cette parcelle, d'usage collectif, que se fait l'accès depuis le niveau supérieur du sol. Des murs de pisé percés des portes d'accès aux cours dessinent la rue ; les séparations entre cours sont également réalisées en pisé. Les dimensions des cours sont variables, correspondant à l'importance des habitations qu'elles desservent (de quatre à une grotte).

Lorsque l'occupation d'un site systématise l'usage de l'habitation en puits et l'organise selon une trame orthogonale, une sorte de damier va se constituer. Les cases creusées seront les cours. Les cases non creusées définiront l'espace public.



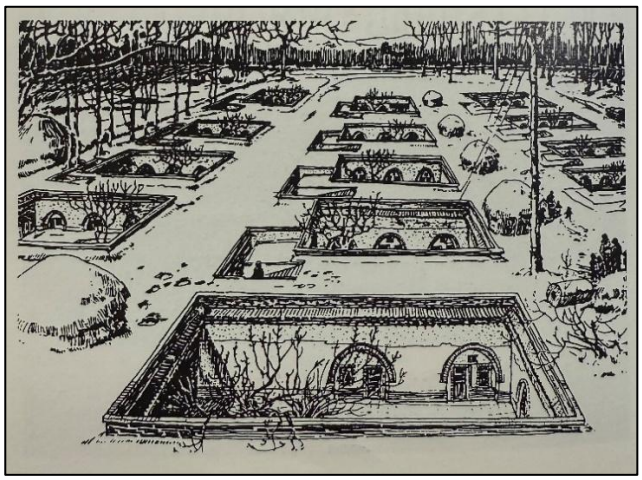


Figure 196 : Village troglodyte dans le Shaanxi.

Un concept original d'occupation de l'espace :

L'articulation entre espace public et espace privatif ne se fait pas par distribution sur un même plan horizontal mais selon deux plans à des niveaux différents.

Le plan supérieur constitue ce que nous convenons d'appeler l'espace public :
- circulation extérieure : hommes, animaux, véhicules.
- aire de travail : travaux agricoles communautaires tels que battage des céréales, séchage...
- espace de rencontres et de relations du village.

Le plan inférieur sera privatif :
— espace privé extérieur : la cour. Elle est utilisée comme une pièce : travail, repas, enfants ;
— l'espace privé intérieur : les pièces d'habitations.

Le « volume » de la cour met en communication ces deux plans, les relie, les articule.

L'organisation de l'urbanisme selon ces deux plans offre les avantages suivants :
- isolement visuel : quasi absolu d'une habitation à l'autre, malgré une grande proximité ;
- isolement phonique très grand : la masse considérable de lœss qui constitue les parois entre habitations est un obstacle à la propagation des bruits aériens.

Ainsi sont réunies des conditions apparemment inconciliables dans les concepts d'organisation de l'urbanisme sur un seul plan :
— densité extrême du tissu d'habitat ;
— excellente intimité rendue possible par l'isolement phonique et visuel ;
— proximité immédiate du « plan » du niveau dévolu aux relations et occupations de la collectivité : l'espace public.

Paradoxalement, la forte densité permise par ce type d'urbanisme parvient à une telle intégration des paysages que nous percevons presque une « non occupation » des sites qui permet aux Chinois d'affirmer « on est dans le village mais on ne voit pas le village ».



Figure 197 : Troglodyte en puits à Xian (Henan). Le toit est l'espace public. Source : https://k.sina.com.cn/



Figure 198 : Village d'habitations troglodytiques creusées en puits (Henan) Source : mondesetmerveilles.centerblog.net

Ainsi, ce type de groupements troglodytiques insiste sur la symbiose entre une architecture et un environnement. L'ouverture des puits carrés dans les tables de lœss souvent très planes, s'insère parfaitement dans un tracé de parcelles cultivées en lanières.

La figure 10 donne le plan partiel d'un groupement de maisons en puits, dans un village situé près de Lyoyang (Henan). La proximité d'une grande cité, la forte activité agricole et des cultures irriguées expliquent la vitalité de ces villages.

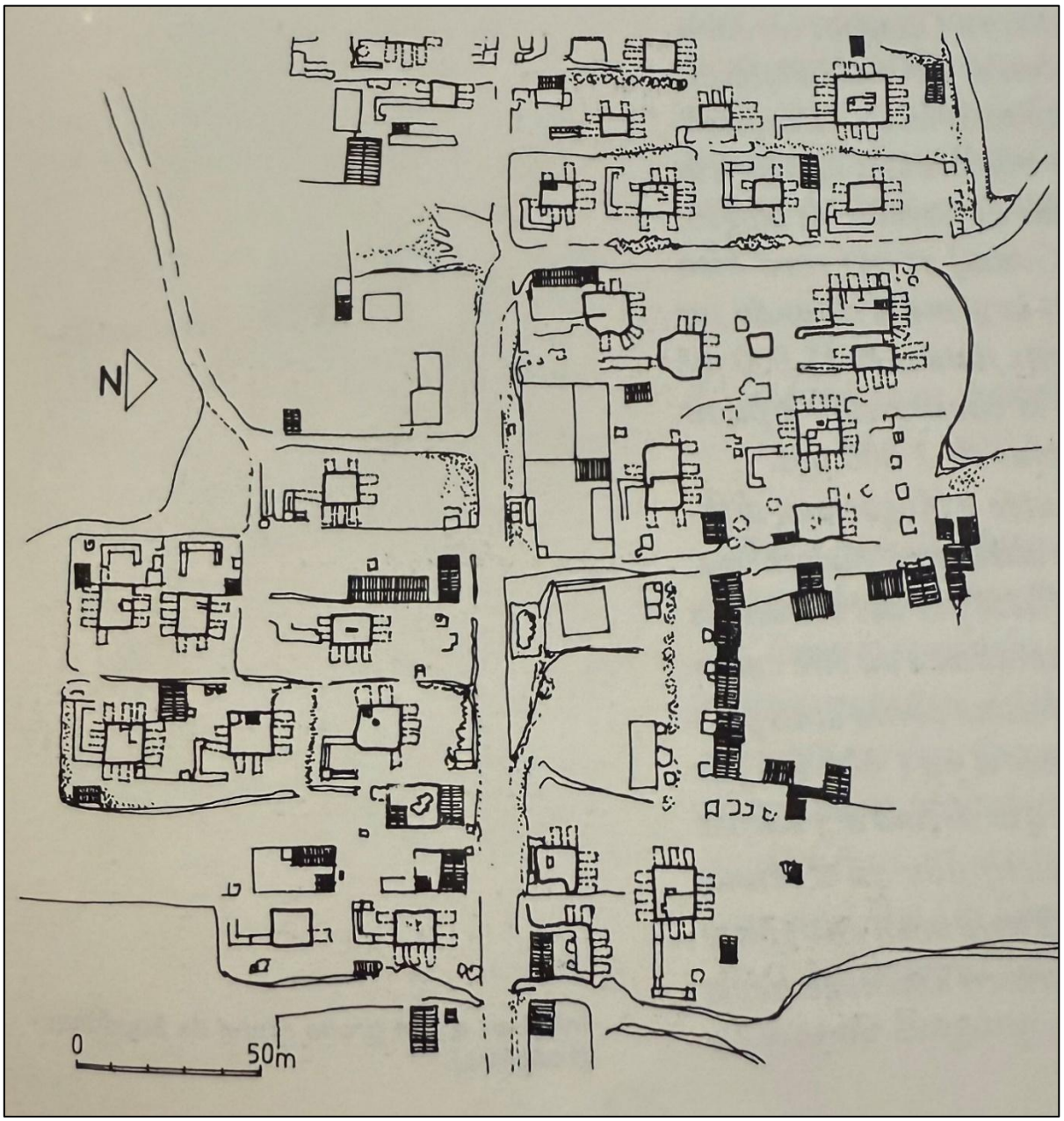


Figure 199 : Village d'habitations en puits, près de Luoyang (Henan).

Morphologies différentes sur un même concept : la Chine et la Tunisie :

La Tunisie (Matmata) offre un exemple d'urbanisme troglodytique très proche, identique dans le principe et les densités obtenues.

Il est important de remarquer la similitude des deux réponses architecturales dans des contextes très différents de civilisation et de tenter de comprendre pourquoi ces réponses sont si proches.

Dans la production de cette architecture, beaucoup de paramètres divergent :
— les contextes culturels sont bien entendu très différents. Peu de points communs entre les populations berbères des vallées des monts de Matmata et la civilisation de l'empire du Milieu.
— l'équipement technologique des deux groupes est également très différent avec un « art de la charpenterie », de la taille de la pierre, de la maçonnerie très élaboré en Chine ;
— les climats : continental désertique et chaud en Tunisie et pour la Chine continental souvent semi-désertique mais dans les latitudes nord plus froides. Néanmoins, les climats établissent une sorte de symétrie dans le problème à résoudre. Il s'agit de se protéger du froid dans la Chine du Fleuve Jaune et de la chaleur en été et essentiellement de la chaleur dans le désert du sud tunisien.

Le sol en l'occurrence est le seul point commun. Les qualités mécaniques du lœss en Chine sont très similaires aux limons lœssiques de Matmata, d'où une même facilité de creusement et la compréhension empirique dans les deux cas du confort thermique spécifique des habitations enterrées.

La comparaison des tissus d'urbanisation, mérite d'être prolongée pour les habitations elles-mêmes (figures A et B). En effet, les plans des troglodytes latéraux tunisiens (figure C) peuvent être rapprochés des plans rencontrés lors de l'étude des troglodytes latéraux chinois (figure 15,16,18, chapitre 4).

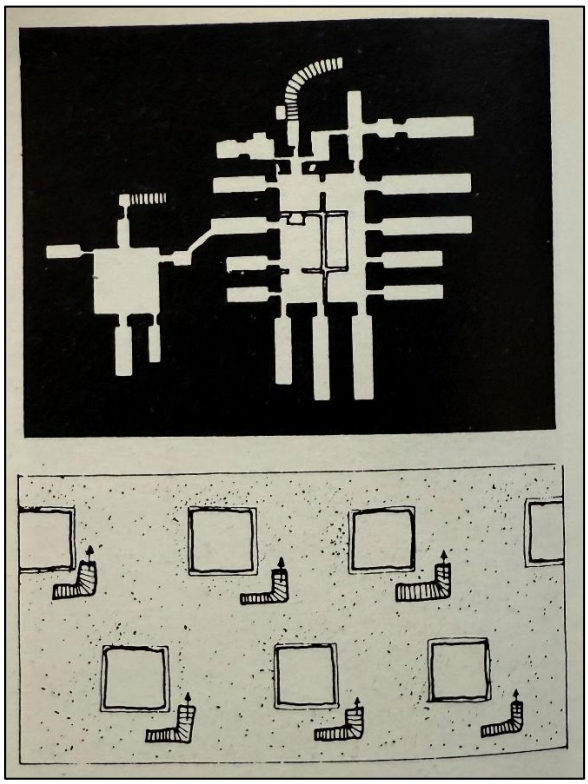


Figure 200 – A : Groupement d'habitations enterrées en

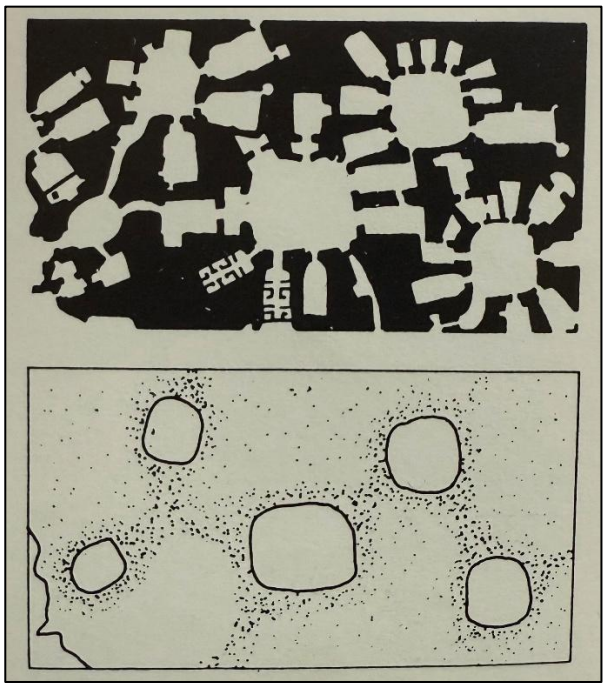


Figure 200 -B : Groupement d'habitations enterrées à Matmata

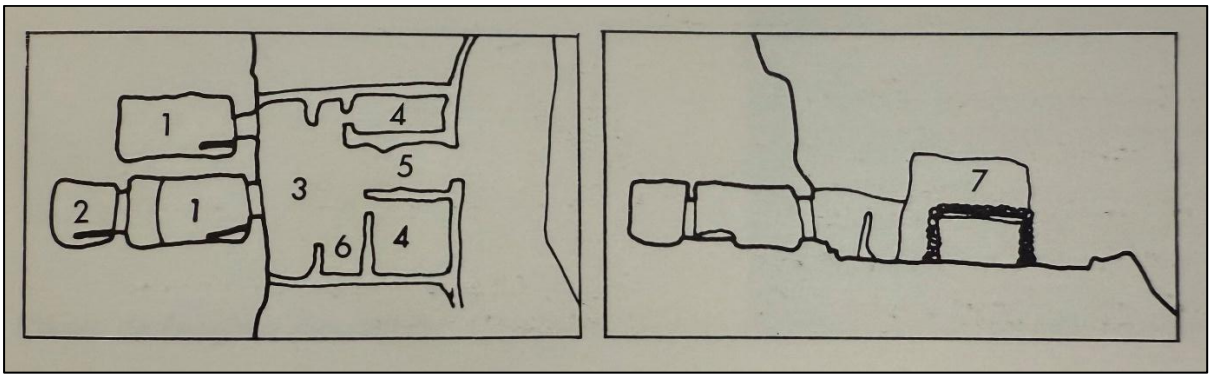


Figure 200- C : Tunisie, habitation troglodytique latérale :

1. *Pièce principale.*
2. *Réserve.*
3. *Cour.*
4. *Etable.*
5. *Entrée.*
6. *Cuisine.*
7. *Ghorfa (grenier pour le grain).*

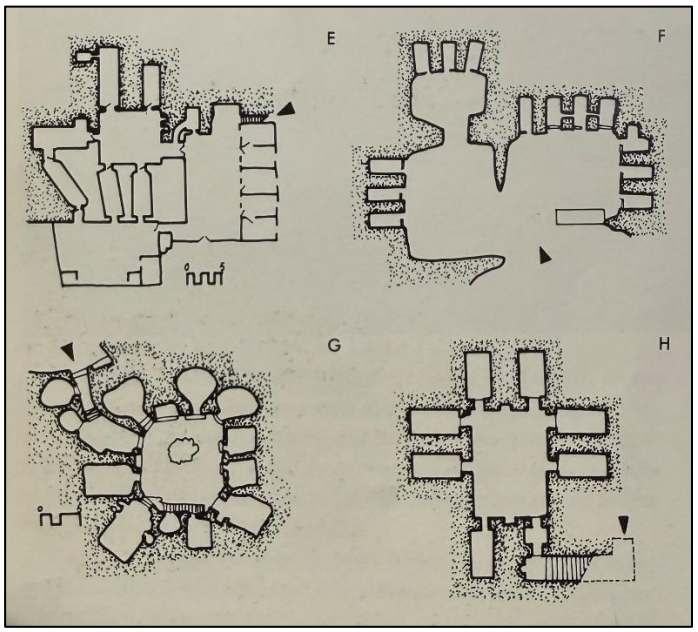


Figure 201 : Typologie des plans :

E. Henan
F. Shanxi
G. Matmata (Tunisie)
H. Luoyang

L'orthogonalité et la symétrie sont la règle en Chine. Lorsque le cercle intervient, c'est pour permettre la rotation d'un moulin à huile ou à farine par un animal actionnant une meule horizontale.

1.2.4.7 L'habitation troglodytique contemporaine en Chine

Le troglodytisme dans les pays du lœss est une des réponses les plus adaptées dans un contexte de pénurie de matériaux, de coût de l'énergie et de pénurie de sols cultivables.

Trois axes forts conditionnent les recherches contemporaines de la problématique du logement en Chine : la dimension collective de l'habitat, la recherche de matériaux et techniques économiques (la terre crue par exemple) et les problèmes d'énergie liés à l'habitat (approche bioclimatique, énergie solaire).

Réalisations troglodytiques récentes :

Les grottes construites de Dazhai :

Dazhai est un village de 400 personnes qui depuis le début des années 50, eut à subir une série de catastrophes. Une sécheresse s'abat sur la région durant deux saisons en 1965 et 1966 notamment, année où un déluge emporte 70% des constructions et 1968 c'est la grêle qui détruit les récoltes. Ces évènements ont permis d'élaborer des solutions constructives et un urbanisme par le recours aux grottes construites.

L'ensemble d'habitations comprend trois alignements de grottes construites suivent les courbes de niveau, ménageant entre chacune d'elles une circulation. La partie supérieure des grottes en alignement supporte une architecture construite. Un arc en plein cintre délimite l'unique vaste ouverture qui regroupera la porte, la fenêtre et le grand imposte semi-circulaire permettant l'éclairement. L'édification de Dazhaï est en parfaite harmonie avec le paysage environnant.

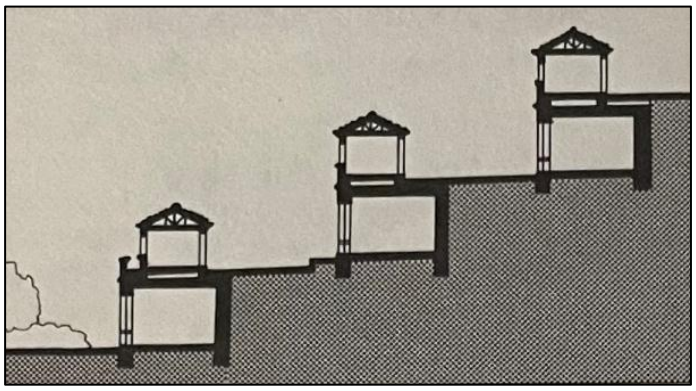


Figure 202 : VILLAGE DE DAZHAI. Coupe sur les habitations semi-enterrées.

Le village de Fenghuo :

Un autre exemple remarquable d'urbanisme associant le creusé et le construit, dans une continuité de qualité d'espace, est fourni par la commune de Fenghuo. Située à environ 60 km de Xian, elle constitue, au même titre que Dazhaï, une référence-modèle pour les Chinois.

Dans ce village de 240 habitants, les habitations construites en briques et en tuiles sont implantées selon un tracé de voies orthogonal. Les habitations construites reprennent dans le dessin de leurs façades, le tracé des voûtes des grottes. Les planchers intermédiaires de ces habitations comprenant deux niveaux, sont établis sur voute, donnant à la pièce inférieure le volume et les qualités d'espace de la grotte. Cet emprunt du construit au creusé assure une remarquable unité et continuité entre deux techniques constructives différentes.

Les recherches pour un troglodytisme contemporain :

Le département d'architecture du Xian Institute of Metallurgy and Construction Engineering (XIMCE) dispose d'un bâtiment expérimental semi-enterré qui rappelle dans son principe les maisons solaires passives semi-enterrées américaines. L'équipe du professeur Xia-Yun développe ainsi des recherches du type de celles du Minnesota Underground Space Center (Minneapolis, USA).

La situation de Xian au cœur des régions du lœss est particulièrement favorable au croisement des études conduites sur les troglodytes traditionnels locaux et sur les constructions expérimentales qui associent les divers dispositifs de captation solaire aux propriétés de l'habitat enterré ou semi-enterré.

Le bâtiment expérimental du XIMCE :

Le bâtiment fait l'objet de suivis de mesures destinés à mieux connaître le comportement thermique de l'habitat à très forte inertie. Il comprend trois pièces principales orientées au sud, les apports solaires sont directs (simples baies vitrées). Un dispositif d'écrans mobiles, isolant la nuit, réflecteurs du rayonnement solaire le jour, équipe ces baies. Un couloir au nord distribue ces pièces. Il est éclairé et frappé par un rayonnement indirect l'hiver grâce à des miroirs réflecteurs en toiture (figure 7). La terrasse est recouverte de terre engazonnée et plantée d'arbustes, ainsi que les talus qui constituent les façades est, ouest et nord. Seule une fente dans ce talus permet, au nord, de trouver l'accès.

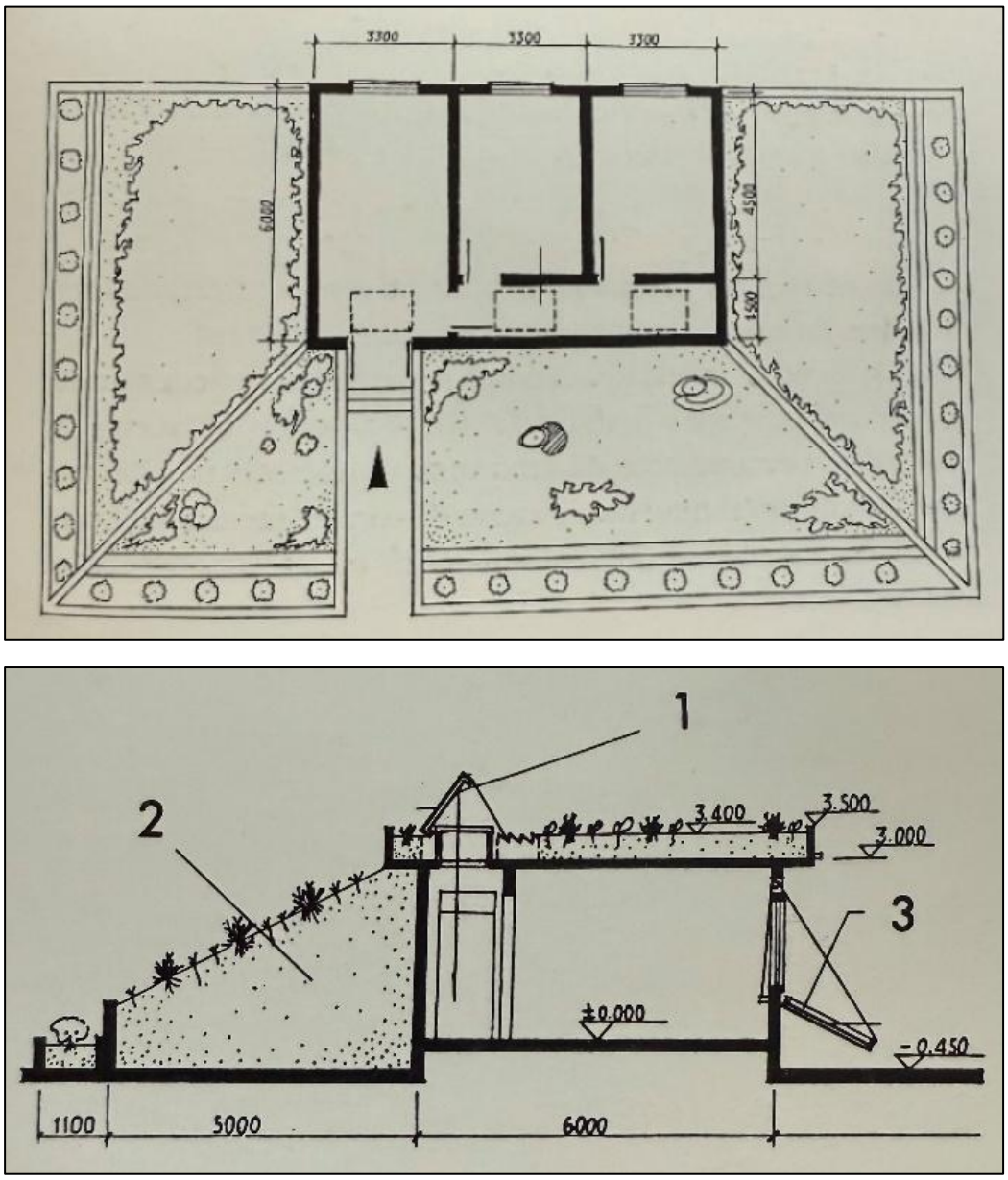


Figure. 203 : Construction semi-enterrée expérimentale du Xian Institute of Metallurgy and Construction Engineering (Xian).

1. Miroirs réflecteurs pour ensoleillement d'hiver.
2. Talus plantés.
3. Ecran isolant et réflecteur.

Etude pour un habitat collectif à Lanzhou (Gansu) :

On pourrait qualifier d'habitat intermédiaire cette proposition pour la ville de Lanzhou, faite dans le cadre d'un diplôme d'étudiant.

La capitale du Gansu se développe en longueur sur les bords du Huanghe (Fleuve Jaune) qui la coupe en deux. Large de 2 à 10 km, sur une longueur de 32 km, l'agglomération est enserrée dans la vallée, le relief empêchant le développement de l'urbanisation de part et d'autre du fleuve.

Le projet veut démontrer qu'il est possible d'urbaniser les versants de ces collines par une architecture adaptée à la topographie et mettant à profit les qualités de l'habitat troglodytique, tant du point de vue paysager que du recours aux énergies naturelles (solaire).

La construction est adossée aux versants de la colline Bai-Ta, développant trois niveaux d'habitations étagées, le toit terrasse d'un niveau d'habitation servant de jardin pour les logements du niveau supérieur. Cette faible consommation de terrain, réduite à la seule emprise des constructions, fait qualifier ces logements de « zéro-land houses ».

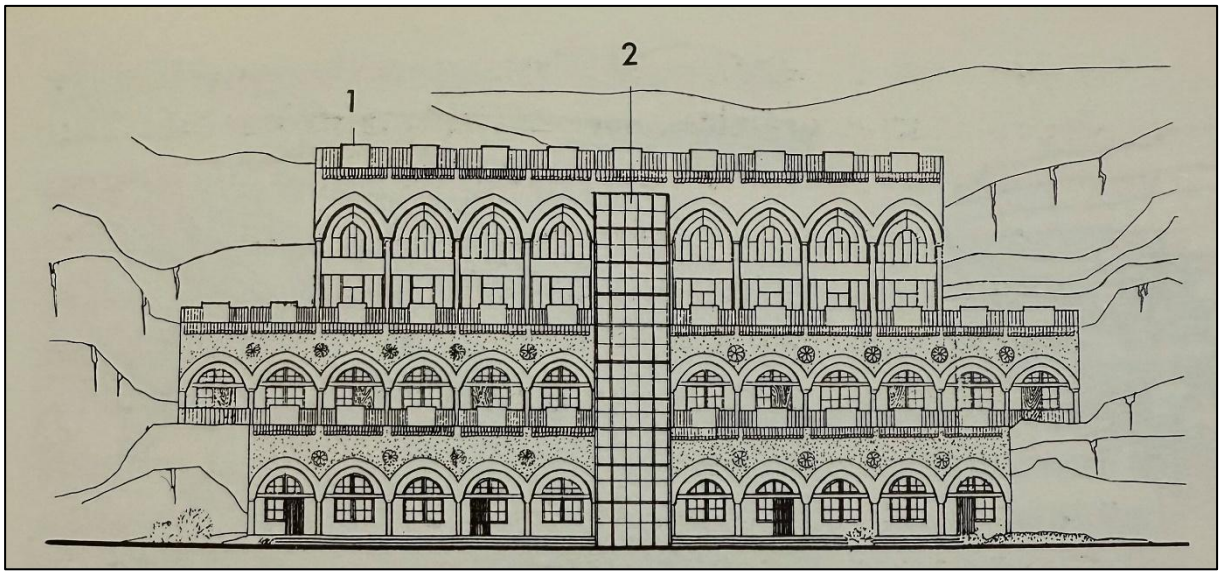


Figure 204 : Projet pour un habitat collectif troglodytique. (« Double Zero Building », recherche de Shi Yan, étudiante), Façade sud.
1. Capteurs plans pour production d'eau chaude.
2. Serre sur escaliers centraux.

Les dispositifs de captation de l'énergie solaire s'allient à des dispositions bioclimatiques passives et actives. Les gains escomptés théoriques (calculés) sont de 89% à la consommation, pouvant aller jusqu'à 98% en cas d'hiver exceptionnellement ensoleillé.

Les dispositifs solaires suivants sont utilisés :
- gains directs par les baies et système d'occultation par stores ;
- murs « trombe » ;
- collecteurs à eau pour eau chaude domestique ;
- serre sur l'escalier central : produisant un air chaud récupéré pour les habitations ;
- utilisation d'un stockage par matériaux à chaleur latente restituée lors d'un changement d'état (liquide-solide). Il est disposé en allège des baies.

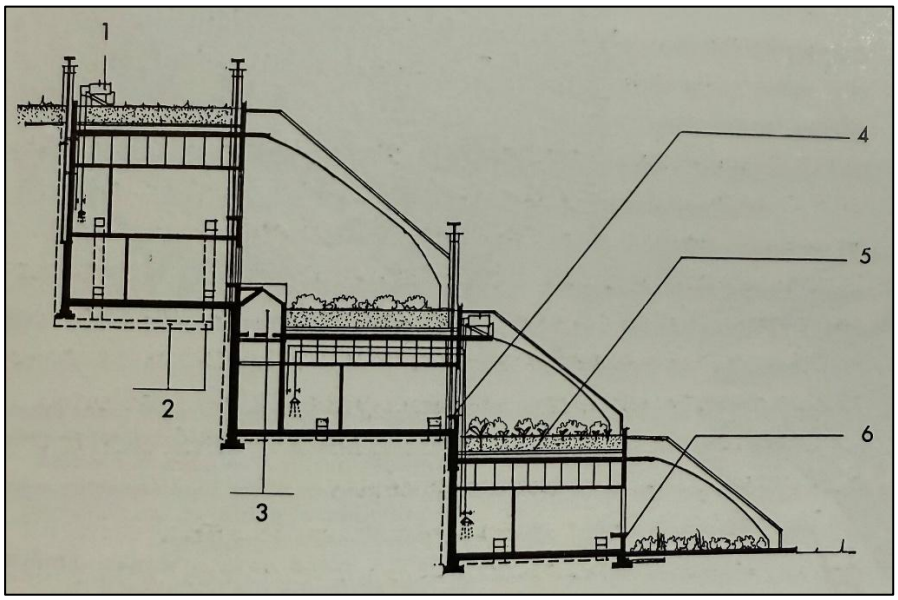


Figure 205 :

1. Production d'eau chaude solaire.
2. Conduits de climatisation.
3. Circulation avec éclairement indirect.
4. Matériaux de stockage à chaleur latente.
5. Isolation de la terrasse.
6. Mur capteur (trombe).

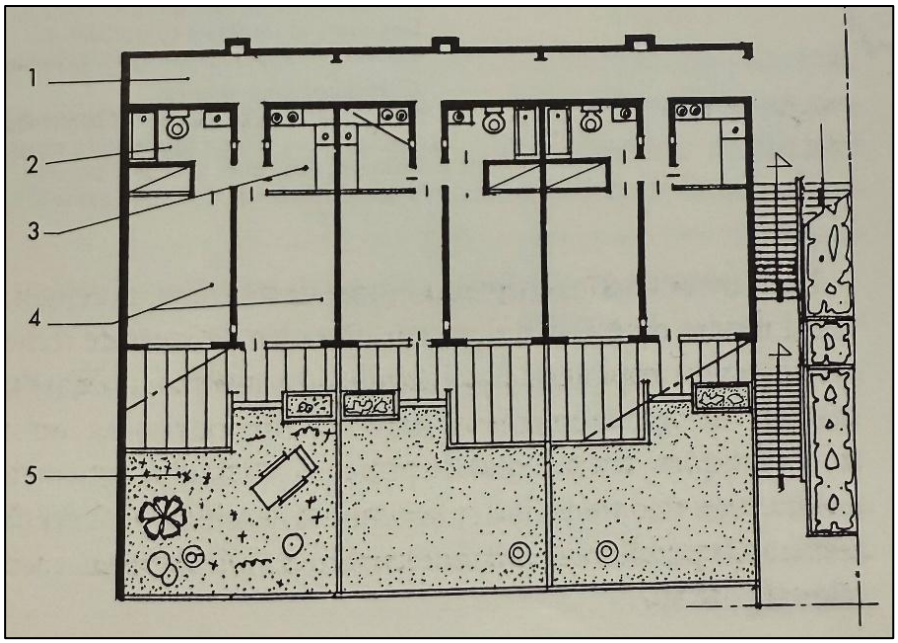


Figure 206 :

1. Circulation avec éclairement indirect.
2. Salle de bains.
3. Cuisine.
4. Pièces principales.
5. Terrasses.

Ce projet est à considérer comme un exercice théorique, l'expérimentation montrant le peu d'intérêt qu'il y a à accumuler tous ces dispositifs, pour des raisons de coût élevé d'autre part. Ce profil énergétique très bas, proche de l'énergie zéro, fait qualifier l'ensemble de « double-zéro-building ».

Enfin, il existe un certain nombre d'études du XIMCE donnant une idée de voies de recherches en matière de groupements d'habitats troglodytiques ou semi-troglodytiques.

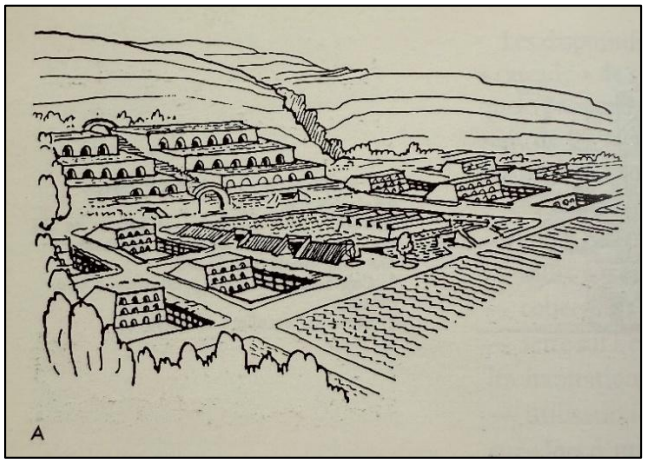


Figure 207- A. Habitat en terrain plat ou à faible pente.

En terrain plat, des unités d'habitation sont constituées autour d'un puits. Sur le côté nord du puits un étage supplémentaire crée une protection et permet un ensoleillement sur trois niveaux d'habitation. En terrain incliné, un large escalier distribue de part et d'autre des alignements de grottes construites.

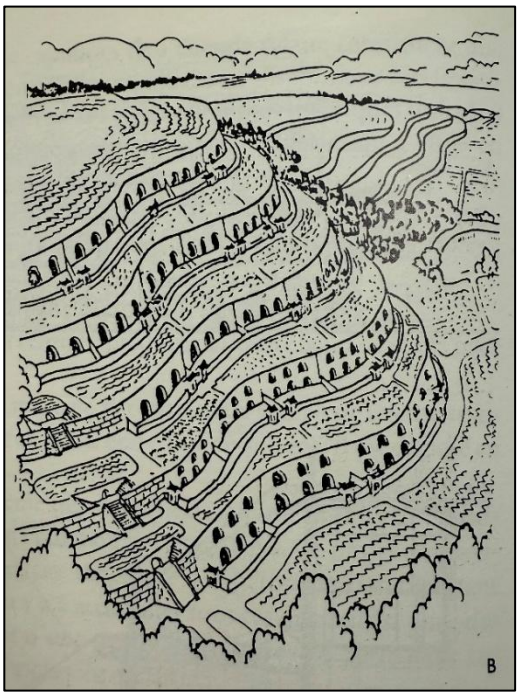


Figure 207- B. Habitat en terrain de forte déclivité.

Des cours et jardinets constituent des espaces extérieurs prolongeant l'habitation.

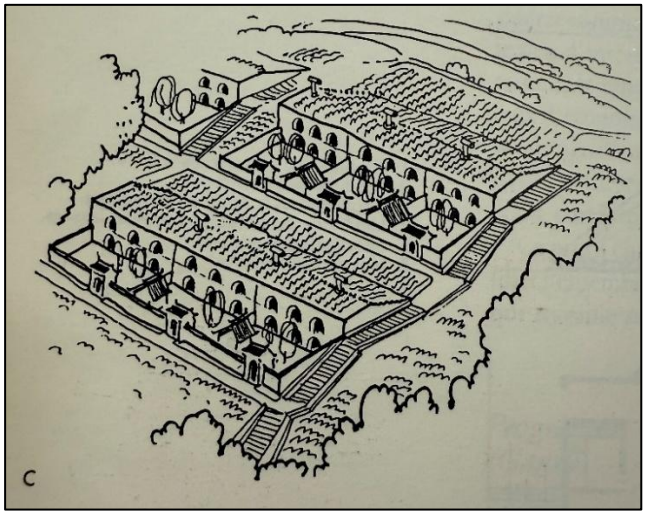


Figure 207-C. Habitat semi-enterré.

Les habitations comprennent un niveau de grottes et un niveau sous-toiture classique inclinée. Des cours avec leur porche d'entrée, précédent chaque maison.

Nouvelles propositions d'urbanisme :

Les tissus en damier regroupant les habitations en puits propose un concept d'articulation entre espace privé (dessous) et public (dessus).

Des éléments structurants tels que voierie centrale assurent ces relations, liaisons dans des propositions de villages troglodytiques contemporains intégrant la circulation automobile.

Le projet de Jin Qumin et Anthony Vacchione, du Département d'Architecture de l'Université de Tianjin développe une organisation urbaine autour d'un axe principal creusé dans le lœss.

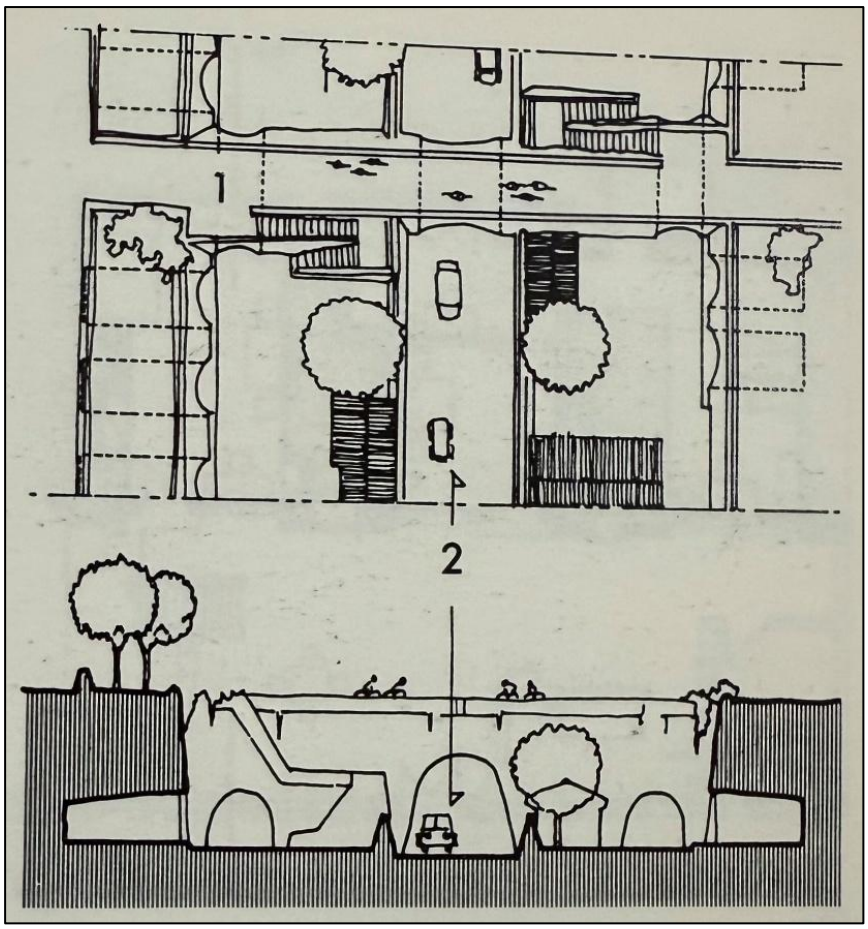


Figure 208 : Projet d'urbanisme troglodytique de Jin Qumin et Anthony Vacchione.

1. Cyclistes

2. Automobiles

Cet axe va supporter le trafic automobile, générateur de bruit (ici, en site enterré).
Il traverse la zone de concentration des services communautaires, équipements collectifs, commerces, creusées dans le lœss.

Une trame de voies parallèles, perpendiculaires à l'axe principal, est constituée par les voies cyclables ; ces voies déterminent un parcellaire des terrains cultivablese. Les habitations creusées dans le lœss se développent de part et d'autre de ces axes secondaires. Des zones boisées réservées constituent les espaces publics de détente.

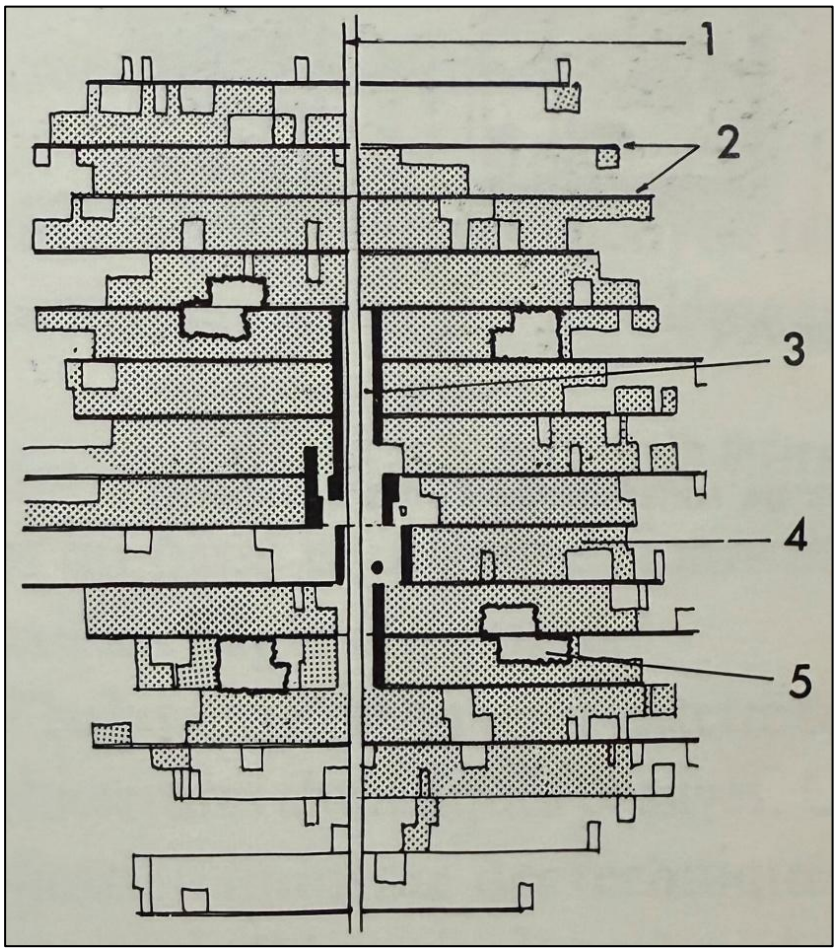


Figure 209 : Principe d'organisation :
1. Voie principale (automobile):
2. Voies secondaires (cyclables).
3. Centre communautaire.
4. Cultures.
5. Pares publics.

Le concours pour l'habitat rural (1980) :

En 1980, en Chine, un concours national pour la conception de maisons rurales a été organisé. Le but était de concevoir des types de maisons économiques, confortables et s'adaptant aux différentes régions géographiques de la Chine. Le programme définissait des maisons pour trois, cinq et sept personnes, 6 500 projets ont été jugés en juin 1981.

Beaucoup de projets organisaient l'habitation autour d'une cour, mais on trouvait aussi, pour les régions du lœss, des propositions d'habitations semi-enterrées.

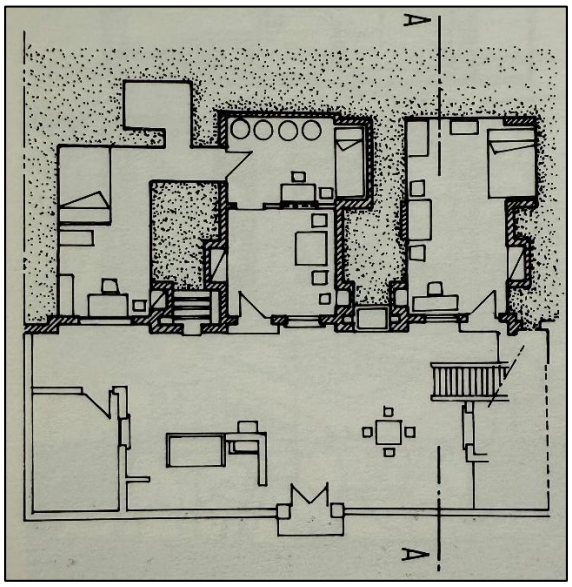


Figure 210

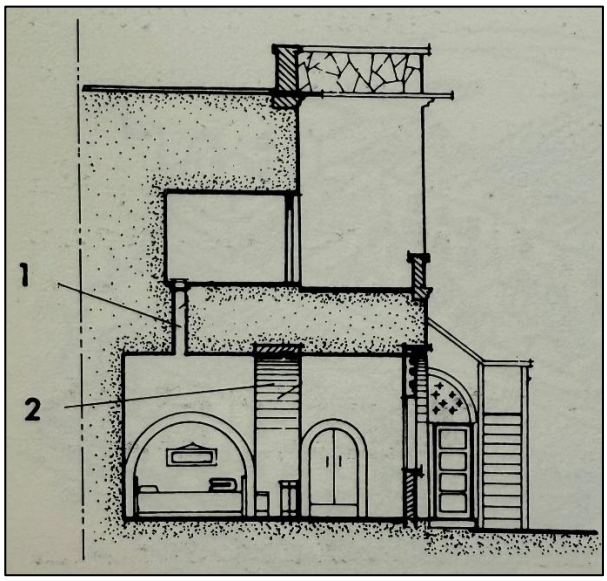


Figure 210 : Coupe AA :
1. Conduit d'aération; 2. Arc de consolidation en maçonnerie

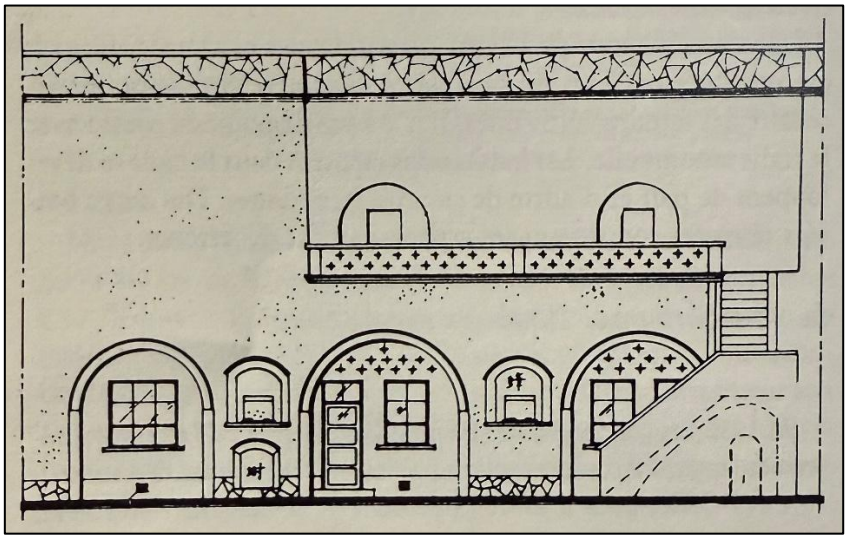


Figure 210 : Le concours pour l'habitat rural, 1980. Proposition d'habitat troglodyte, Elevation.

Tous ces projets perfectionnent les formes traditionnelles par plusieurs démarches :
— amélioration du plan : on cherche à casser la rigueur du troglodyte latéral et à améliorer les proportions des pièces. L'organisation nouvelle met en communication les pièces par l'intérieur.
— l'éclairement est souvent amélioré par de grandes baies ;
— l'aération est traitée : des conduits permettent à l'air de circuler intérieurement d'un niveau à l'autre. Des prises d'air en façade et des conduits d'aération en partie arrière sont prévus ;
— le parement extérieur est protégé ;
— la maison s'organise autour d'une cour qui comprend des annexes au logement : cellier, toilettes, fourneau à cuisson.

Deux axes peuvent être garants d'une continuité de ce type d'architecture : le site et le climat.

Le site est en effet la contrainte commune entre les troglodytes traditionnels et les propositions contemporaines. La problématique d'insertion est la même.

Le climat : la permanence des données climatiques auxquelles étaient soumises les habitations du passé conditionnent aussi les architectures contemporaines.

Ces deux axes se rejoignent : l'habitat creusé ou semi-enterré constitue la plus performante des architectures climatiques passives. En effet, c'est un champ d'application immense des techniques de captation, de stockage et de maîtrise de l'énergie.

Partie II : L’architecture troglodyte et hypogéisme comme modèle de durabilité dans le cadre de la résilience climatique

2.1 Les habitats troglodytes, une alternative écologique et durable

Le matériau de l'architecture troglodytique possède une uniformité absolue telle que par soustraction d'éléments pleins, il permet de caractériser un espace. En effet, la roche peut définir les murs, les colonnes, mais aussi le mobilier le plus modeste d'un espace troglodytique. Une grande diversité spatiale peut ainsi être obtenu, engendrant des possibilités d'espaces multifonctionnelle. Toutefois, l'architecture troglodytique se caractérise par sa simplicité en plan qui lui permet de réaliser des économies d'énergies conséquentes. Sur le plan énergétique, l'habitat troglodytique permet donc un usage mesuré des ressources.

2.1.1 Les paramètres du climat souterrain

2.1.1.1 Les conditions climatiques de l'habitat

La construction d'une habitation permet de tempérer un climat extérieur et ainsi de créer artificiellement les conditions d'un climat intérieur plus agréable. L'habitation est donc un lieu où sont atténuées ou fortement réduites (voire supprimées pour l'habitat moderne) les amplitudes du climat extérieur. Ces amplitudes ont des périodicités diverses en fonction des saisons : été-hiver et jour-nuit. L'habitat troglodytique apporte une réponse idéale à ces variations des conditions climatiques.

A ce propos, quelques régions du monde font face à certaines conditions climatiques extrêmes (dont l'Andalousie qui subit chaque année de longues périodes de sécheresse et de haussement du degré de température) que nous pouvons rappeler ici :

Températures :

Température maximale mondiale : 58°C en Libye

Température maximale Andalousie : 47°C à Montoro dans la province de Cordoue

Précipitations :

Le record du minimum annuel est détenu par le nord du Chili, avec 0,8 mm/an.

Le niveau de pluviométrie moyenne en Andalousie tourne autour de 150–170 mm/an.
Dans un cas de températures extrêmes, une année particulièrement sèche aurait vu le niveau de précipitation tomber à ≈ 52 mm à Cabo de Gata près d'Almeria.

Ensoleillement :

Le point le plus ensoleillé du globe se trouve dans le Sahara libyen avec 4 300 heures/an.

En Andalousie, près de la côte d'Almería, on peut atteindre voire dépasser les 3 000 à 3 300 heures d'ensoillement par an.

Ces chiffres montrent les conditions extrêmes contre lesquelles l'homme a dû lutter pour vivre dans certaines régions, et renforcent l'intérêt de l'habitat troglodytique pour une réponse à ce problème des écarts de températures, lié à l'ensoleillement. En effet, la masse thermique de l'enveloppe d'un habitat souterrain lui permet d'amortir les fluctuations de températures liées aux conditions climatiques extérieures.

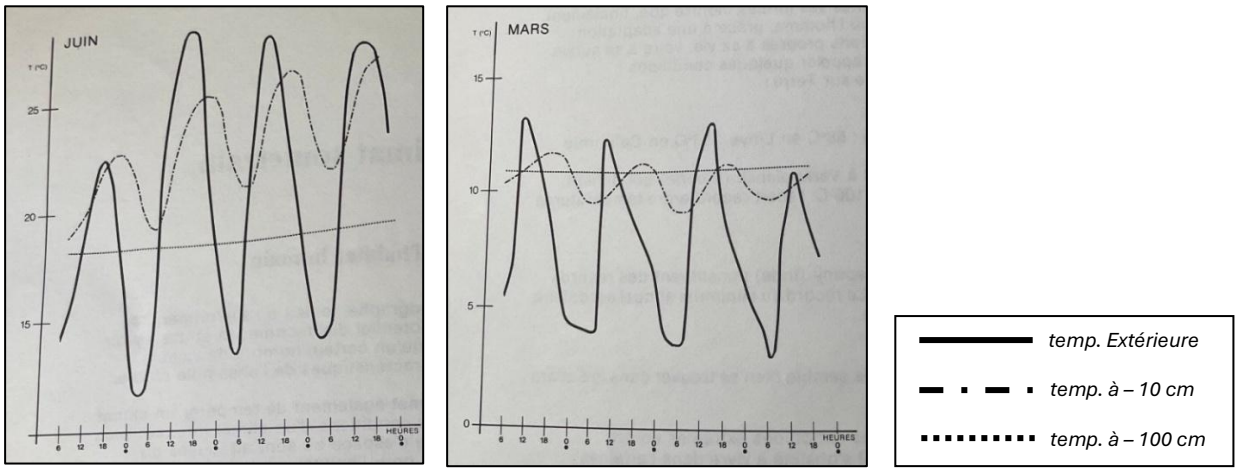


Figure 211 : Températures relevées à Bordeaux-Mérignac. Source : LOUBES Jean-Paul, Archi troglo, Roquevaire : Parenthèses, 1984

Les courbes de la Figure 104 illustrent l'efficacité de l'amortissement dans le sol des variations de la température extérieure.

2.1.1.2 Les données météorologiques concernant le sol

Les stations de météorologie font, en Espagne, des relevés de différentes températures à différents niveaux de profondeur et à différents moments de la journée.

La température dans le sol est mesurée à quatre niveaux de profondeur :
- 10 cm, trois fois par jour à 6 h, 12 h, 18 h.
- 20 cm, -50 cm, -100 cm généralement à 12 heures.

Variations journalières :

Une profondeur de 10 cm suffit pour atténuer les variations de températures journalières avec un déphasage d'environ 6 heures. Au-delà de 30 cm, les variations journalières de la température sont complètement amorties.

Variations annuelles :

Contrairement à une idée reçue, la température à 2 m de profondeur est loin d'être constante et égale à la température moyenne annuelle d'un site. Pour obtenir cette condition à + ou – 1°C, il faut atteindre une profondeur de 5 m. Si l'on suppose que les caractéristiques du sol sont constantes avec la profondeur, on peut énoncer cette règle simple : toute épaisseur supplémentaire de 1 m réduit les variations de températures annuelle dans le rapport 2/3.

Ainsi, pour un climat méditerranéen, comme celui de Setenil, où les moyennes mensuelles extérieures sont comprises dans la fourchette 36°C +- 16°C on a donc, en fonction de la profondeur :

- à 1 m : 36 +- 14 °C
- à 2 m : 36 +- 12,3°C
- à 3 m : 36 +- 11,2°C
- à 4 m : 36 +- 10,5°C
- à 5 m : 36 +- 10° C

Remarque : Cette réduction des variations par rapport aux températures extérieures aura des effets importants sur le chauffage d'un habitat enterré. En effet, les déperditions extrêmes d'un habitat souterrain seront très proches des déperditions moyennes annuelle. Les conditions de confort thermique seront, en conséquence, plus faciles à atteindre, tant en hiver qu'en été.

2.1.1.3 Problèmes posés par la thermique de l'habitat troglodytique

Premier ensemble de données :

La thermique de l'habitat traditionnel se propose de déterminer les points suivants :

- Evaluation de la perméabilité d'une enveloppe (calcul de déperditions à travers des parois données).
- Evaluation des gains solaires possibles compte tenu de la morphologie de l'enveloppe et de ses parois captantes d'énergie solaire (baies, capteurs, serres, etc.).

D'autre part, les paramètres du climat atmosphérique du lieu vont intervenir de plusieurs manières :

- Température extérieure : les écarts de température vont contribuer à définir les pertes.
- Les données d'ensoleillement du lieu (nombre d'heures d'ensoleillement annuel ou énergie reçue sur le site) vont contribuer à définir les apports.
- Quelques autres données vont agir comme facteur de correction : orientation, effets de masque divers, vent...

Deuxième ensemble de données : le milieu souterrain :

Dans le sol et à toute profondeur on pourra définir un « climat souterrain théorique » du lieu, caractérisé par :

- Des paramètres de type climatique :
• température du massif à la profondeur X
• hygrométrie

- Des paramètres physiques liés à la nature du sol :
• conductivité thermique
• chaleur spécifique

La thermique de l'habitat souterrain :

Elle consiste à superposer les ensembles de données 1 et 2.
En effet, créer un habitat troglodytique, c'est croiser ces deux influences :

- Un climat atmosphérique : on crée un volume d'air, une atmosphère habitable, communicante avec le climat extérieur, donc soumis à ses variations.
- Un climat souterrain: ce volume d'air habitable se situe dans le massif de sol donc en contact avec les paramètres du climat souterrain théorique.

La compréhension du climat d'un habitat enterré est de ce fait assez complexe, car le processus de formation de ce climat est la superposition de deux niveaux d'influence des apports énergétiques solaires sur le site :

- apports solaires définissant le climat atmosphérique : effets quasi immédiats sur l'air.
- apports solaires définissant le climat souterrain théorique : effets différés.
- apport de chauffage intérieur qui va agir sur l'air d'une part et sur le massif de sol de l'autre.

2.1.1.4 Les paramètres

Lors de la conception d'un habitat souterrain, il est conseillé de prendre en compte un certain nombre de dispositions qui permettent la formation d'un climat souterrain agréable et confortable. Sous l'effet du rayonnement solaire, le sol de l'habitat va absorber une partie de celui-ci et en réfléchir une autre. La proportion des radiations absorbantes ou réfléchies dépend des caractéristiques du site.

Inclinaison du sol :

Selon la pente du terrain, l'énergie reçue par une même surface au sol sera différente.
Pour un micro-relief, à l'échelle de l'architecture et de l'urbanisme, les conséquences de la pente et de son exposition le sont sur l'énergie reçue par la section de massif de terre.

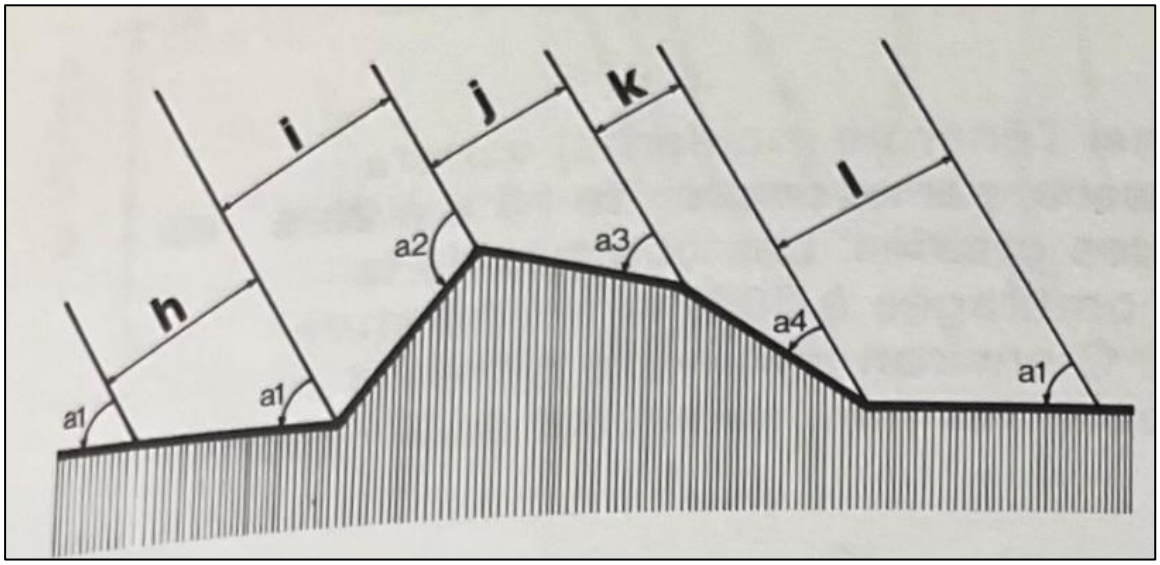


Figure 212 : Variations de l'énergie reçue par une même surface au sol en fonction de l'inclinaison du terrain et de l'orientation.

Le flux incident varie (h, i, j, k, l) et l'angle d'incidence varie (a1, a2, a3, a4).

Couleur du sol :

La couleur du sol va modifier son absorptivité. Les sols foncés peuvent absorber jusqu'à 80% de la radiation solaire tandis que les sols très clairs seulement 30 %. S'il n'est pas recommandé de modifier la couleur de la terre d'un site, il est en revanche possible de modifier la couche superficielle par un apport de matériau extérieur: sable clair, gravier, si l'on recherche une réflexivité, ou au contraire, un matériau ombré pour un effet inverse[1].

Chaleur spécifique du sol :

C'est la quantité de chaleur qu'il faut apporter à un matériau pour augmenter d'un degré l'unité de sa masse. L'échauffement va croître quand la chaleur spécifique va décroître. Le sol est un matériau hétérogène, et l'échauffement va dépendre de la texture et du pourcentage des divers constituants[2].

1. Pour les valeurs de pourcentage de rayonnement solaire absorbé en fonction des couleurs de surface, voir :
E. Mazria, Le guide de l'énergie solaire passive, Roquevaire, Ed. Parenthèses, 1981, p. 273.
2. Pour les caractéristiques physiques des solides, voir : E. Mazria, op. cit., pp. 268-269.

Teneur en eau :

Un sol sera d'autant plus lent à s'échauffer qu'il sera plus humide (sa chaleur spécifique augmentant). Les propriétés thermiques d'un même sol peuvent varier sensiblement selon l'humidité. Ainsi, la teneur en eau est aussi déterminante que la nature du matériau.
Des techniques de drainage, d'imperméabilisation ou au contraire de maintien d'une certaine présence d'eau peuvent contribuer à éviter des variations considérables d'humidité, ou au contraire à les provoquer. On peut imaginer augmenter l'inertie thermique d'un massif en faisant croître son taux d'humidité à certaines périodes par exemple.

La couverture végétale du sol :

Les végétaux modifient d'une part la couleur du sol, et d'autre part sa texture superficielle. L'albédo (rapport de l'énergie réfléchie par l'énergie incidente) variera selon le type de couvert végétal. Les courbes de la Figure 106 montrent que pour une zone ombragée à 50% la température superficielle du sol à 14 h est de 12°C environ inférieure à celle d'un même sol sans ombrage. La différence est de 20° pour une zone ombragée à 65 %.

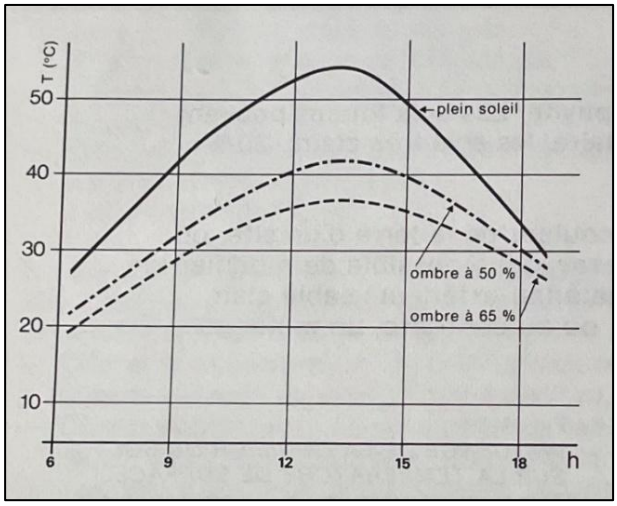


Figure 213 : Influence du couvert végétal sur la température de surface

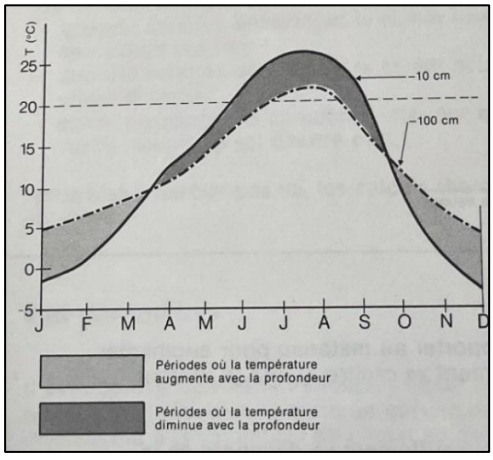


Figure 214 : Courbes de température annuelles en fonction de la profondeur

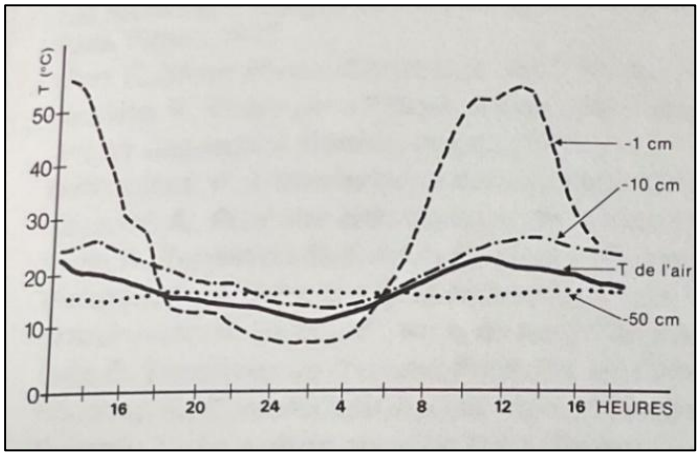


Figure 215 : Courbes de température journalières en fonction de la profondeur

Les variations de températures, en fonction des paramètres de surface, s'estompent avec la profondeur. Les courbes ci-dessus mettent en évidence la relation entre température du sol et paramètres de surfaces.

La lumière :

Les grottes, en général, sont confrontées à une difficulté spécifique : la lumière naturelle, qui peut y pénétrer que d'un seul côté. Cette caractéristique nécessite parfois la création de dispositifs d'éclairage annexes pour subvenir au besoin d'éclairage et de luminosité de l'habitat. Les patios ou cour centrales des plaines d'Afrique du Nord ou les puits de lumière des habitats troglodytiques en Chine en sont des exemples concrets.

La lumière influence le choix d'un site et l'orientation qu'on va donner à un habitat.
De préférence, un habitat troglodytique sera orienté vers le sud pour capter au maximum le rayonnement solaire par les ouvertures de l'habitat.

2.1.2 Qualités de vie et confort usuel des habitations troglodytiques dans les régions étudiées

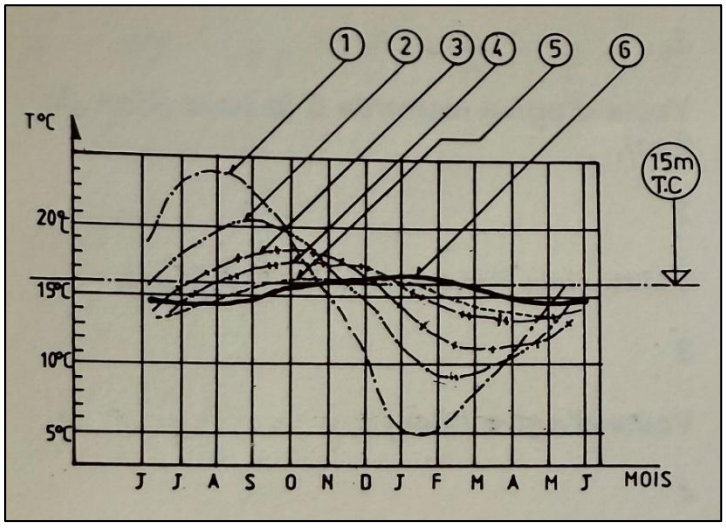
2.1.2.1 Le confort thermique des maisons creusées traditionnelles : étude de cas en Chine

L'intégration maximale aux sites, la capacité de composer avec lui, la bonne tenue aux secousses sismiques, sont parmi les qualités de l'habitat creusé, mais ce sont surtout ses performances climatiques qui sont remarquables.

Le climat souterrain et les données climatiques locales :

L'amortissement, avec la profondeur, des variations de la température d'air extérieur (variations journalières et annuelles) va contribuer au confort intérieur. Les apports solaires extérieurs par les baies, le chauffage interne éventuellement et la chaleur produite par les habitants eux-mêmes vont corriger un climat théorique de base à l'intérieur d'un habitat troglodytique.

La figure 1 montre pour la région de Xian en Chine, les courbes annuelles de température à différentes profondeurs :



Courbes 1, 2, 3, 4, 5, 6 : températures à 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m de profondeur.

T.C. : température constante à 15 m de profondeur.

Figure 216 : Températures annuelles dans le sol à Xian en fonction de la

Le climat à Xian est semi-aride, chaud l'été avec 38 ou 40° C et froid et sec l'hiver (températures minimales inférieures à - 10° C).

Les courbes de la figure 1 montrent qu'à des profondeurs de 4 à 6 m, la température moyenne journalière reste entre 14°C et 15°C pendant les mois les plus froids de janvier à février.
Il y a donc à cette profondeur (qui correspond à la profondeur de creusement des habitations) un déphasage du maximum des températures d'air extérieur, dû à l'inertie du sol.

On voit donc à quel point les conditions théoriques de température à cette profondeur sont favorables à l'établissement d'un habitat : bon niveau de température (14 à 16°), faible amplitude des variations annuelles (courbe très aplanie) et déphasage maximum des températures d'air extérieur (été) vers un maximum dans le sol en saison froide.

Comportement climatique des maisons creusées traditionnelles :

Le Groupe de Recherche sur l'Habitat Enterré de Nanjing a mis en place, durant l'été et l'hiver 1982, un suivi de température sur la maison de Dian Lui dans le Henan.

La maison est complexe et permet sur un même site d'évaluer comparativement les niveaux de température dans trois configurations différentes :
- cave creusée, ouvrant à l'extérieur sur un seul côté (cave non ventilée) ;
- cave creusée, ouvrant à l'extérieur par deux côtés opposés (cave ventilée) ;
- maison construite au-dessus du sol qui sert de référence non troglodytique comparative.

L'épaisseur du lœss au-dessus des maisons creusées est de 6 m et la maison de référence comparative a des murs en brique d'adobe de 24 cm d'épaisseur.

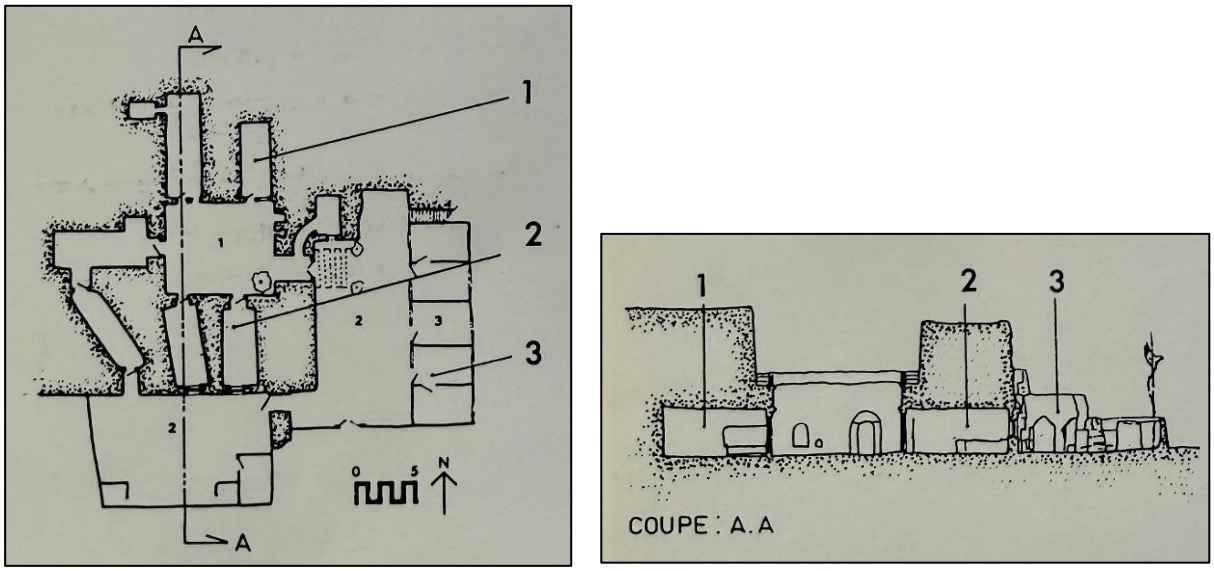


Figure 217 : Maison de Dian Lui (Henan). Sur un même site sont mesurées les températures d'air.

1. Cave non ventilée ; 2. Cave ventilée (fenêtres sur deux parois opposées) ; 3. Maison en terre crue construite au-dessus du sol.

La figure 3 montre les courbes de températures obtenues dans des séquences de mesures effectuées en février et en juillet 1982. Ces courbes montrent que la cave non ventilée est la plus chaude, suivie de près par son homologue ventilée. La maison en surface est la plus froide. Cet ordre est inversé l'été, la maison en surface étant la plus chaude, la cave non ventilée la plus fraîche. Les analyses ont également porté sur les températures de parois, de sols, de plafonds, ainsi que sur les variations de l'hygrométrie dans les trois configurations étudiées.

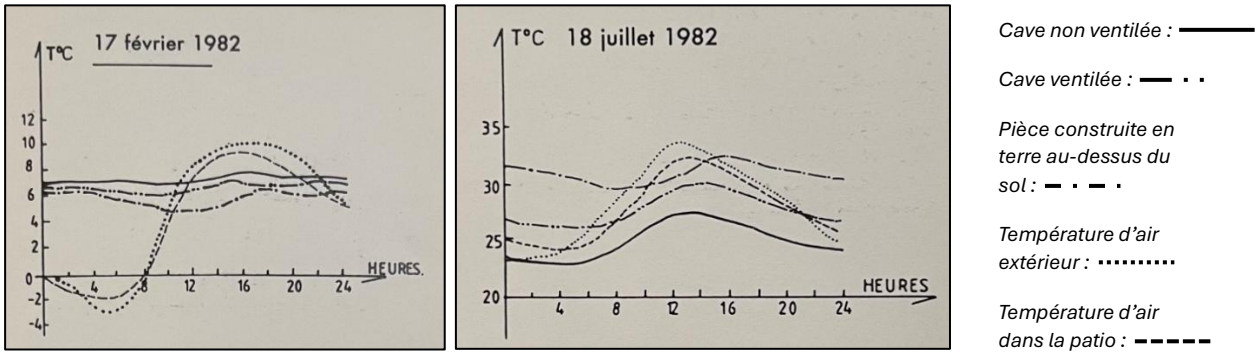


Figure 218 :: Températures d'air intérieur dans la Maison de Dian Lui en fonction des variations journalières

2.1.2.2 Résistance aux séismes

La tenue du massif de terre constituant la voûte de l'habitation creusée est un élément déterminant pour une architecture troglodytique.

Ce problème va se poser de façon différente :
- lors du creusement : en effet, c'est une phase de modifications importantes des contraintes mécaniques dans le massif de terre ;
- lors de séismes : des efforts horizontaux, inexistants dans l'équilibre normal de la voûte, vont apparaître.

Les tracés des voûtes :

Selon les régions et les natures de sol rencontrées, on observe un certain nombre de variantes dans la section des voûtes utilisées mais dans tous les cas, les problèmes de résistance mécanique ne varient pas tant dans la définition des efforts que dans la localisation des points de fragilité des habitations. Certaines sections se rapprochent toutefois d'assez près de la section idéale de résistance maximum (figure 4A). De toute manière, le lœss est un matériau suffisamment homogène pour qu'une amélioration de la stabilité des voûtes puisse être apportée. La variété des profils rencontrés est dictée selon le type d'outillage utilisé pour excaver l'habitat troglodytique et la dimension des pièces souhaitée.

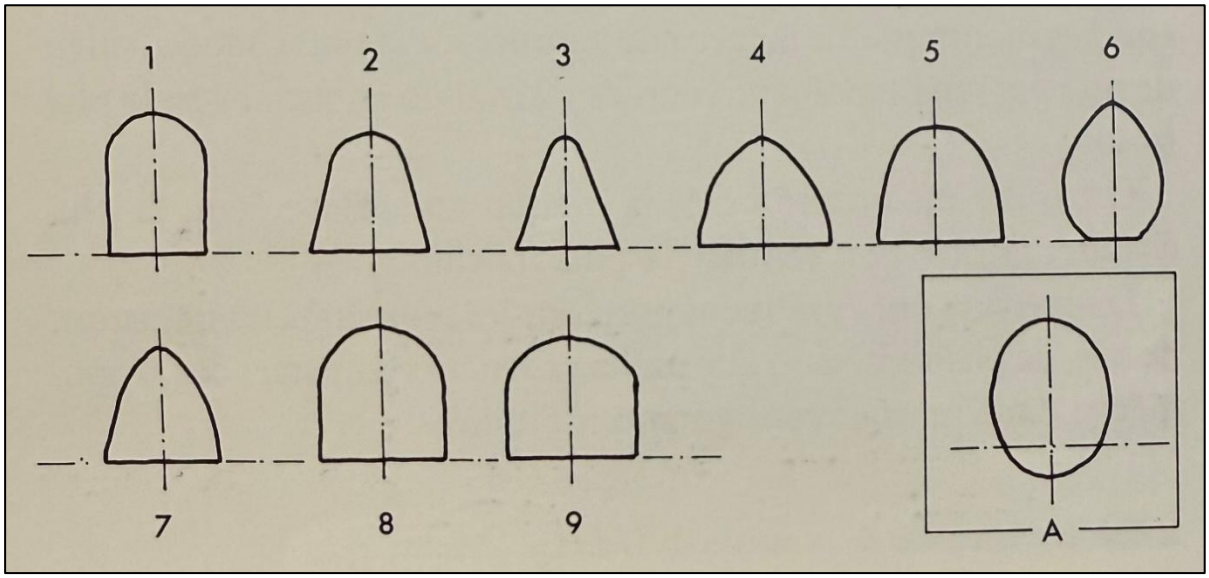


Figure 219 : Typologie des voûtes rencontrées en diverses régions.

1-9 : Nord du Henan. Région de Luoyang.
4-5-7 : Sud-Est de Gansu. Centre du Shaanxi.
7-4 : Shanxi (village de Wang-Zhuang).
8-9 : Yan An. Nord Shaanxi.
6: Shanxi (village de Zongauo, Jixian County).
A : Section théorique optimale de résistance.

Les conditions de creusement :

Les dépôts de lœss, selon leur âge, ont une dureté différente. Un lœss ancien sera plus dur à creuser mais aura une meilleure uniformité et offrira ainsi une meilleure stabilité à l'habitat troglodytique qu'un lœss plus récent, qui sera plus tendre. Ces zones de lœss trop poreux sont à proscrire pour la construction d'habitats troglodytiques. Il faudra donc se rapprocher des qualités de dureté observées plutôt dans le lœss ancien.

Les périodes de creusement et leur durée, ne sont pas sans conséquences sur la bonne tenue des grottes. La proportion d'eau contenue dans la terre fait aussi varier ses qualités mécaniques. La résistance à la compression peut varier de 1 kg/cm^2 à 3 kg/cm^2 si l'on parvient à diminuer la teneur en eau du massif (par drainage, séchage ou aération).

Durant le creusement d'un habitat troglodytique, on interrompt une ou deux fois les travaux d'excavation, afin laisser le temps aux parois de sécher afin de permettre d'augmenter leur solidité. En situation normale, l'humidité du lœss est de 15 à 20 %. Ce taux peut être ramené à 10% ou moins lorsque les travaux sont bien effectués. Dans ce cas-là, il y a alors une bonne résistance mécanique des parois de la voûte.

Le maintien d'une ambiance sèche à l'abri de toute source d'humidité est donc important durant les travaux d'excavation d'un habitat troglodytique. Pour y arriver, une bonne orientation et exposition au soleil, des circuits d'aération, une protection du sol au-dessus de la voûte (étanchéité) et conduits de drainage seront nécessaire.

Il faut noter que les causes d'humidification d'un massif rocheux peuvent être aussi bien des infiltrations d'eau qu'une condensation d'eau sur les murs, par effet de « paroi froide » en période d'été (où l'air ambiant est beaucoup plus chaud que la paroi des grottes).

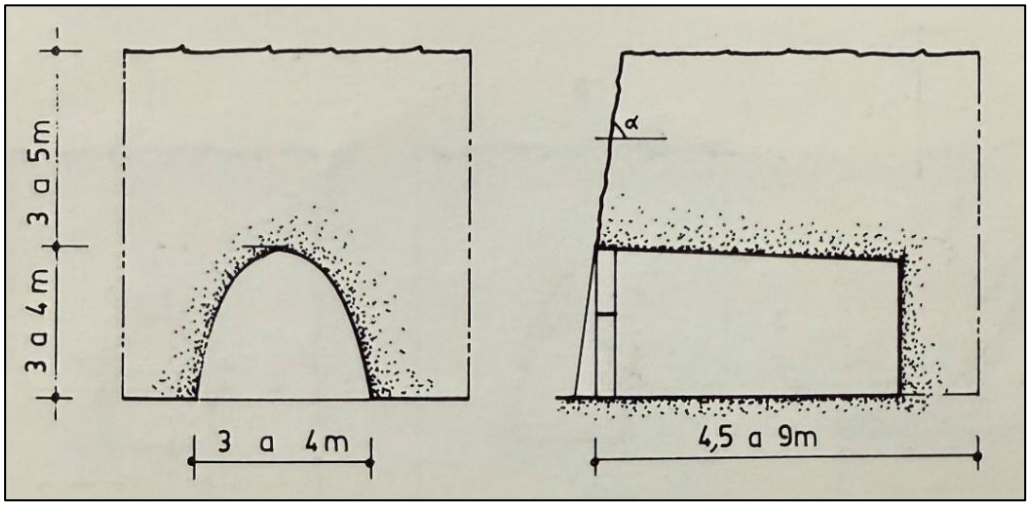


Figure 220 : Caractéristiques dimensionnelles d'un habitat troglodytique.

Selon les régions et la nature des sols, les dimensions des grottes varient dans les plages suivantes :
- la hauteur au sommet de la voûte varie de 3 à 4 m ;
- la profondeur de 4,5 à 9 m ;
- l'épaisseur de terre au-dessus de la voûte de 3 à 5 m.

Les effondrements :

En période normale, pendant le creusement ou lorsque celui-ci est achevé, les effondrements d'une cavité souterraine peuvent être de deux types :
- effondrements de la partie frontale : sur le front de taille constituant la façade, une partie du massif (un « coin » de matériau) peut se détacher (figure 6A) ;
- effondrements en plafonds le long de l'axe longitudinal (figure 6B).

En situation de séisme, les deux cas précédents d'effondrement peuvent se produire ainsi qu'une troisième liée à l'apparition des efforts horizontaux propres à la secousse (figure 6C).

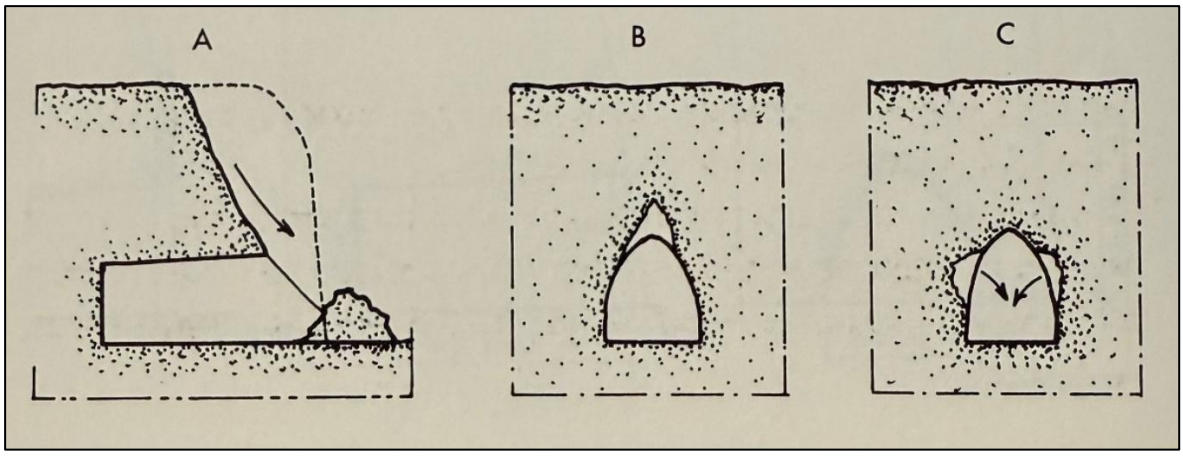


Figure 221 : Les différents types d'effondrements possibles d'une cavité souterraine.

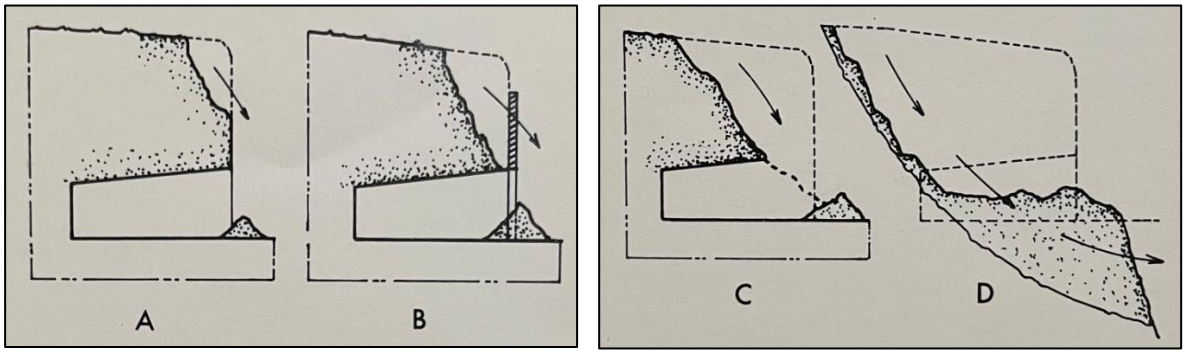


Figure 222 : Point de vulnérabilité d'une paroi rocheuse lors d'un épisode de séisme :

A. Premier point de vulnérabilité, la façade, ou le front de taille, dont la pente naturelle est de l'ordre de 70 à 85%.
Parfois la paroi peut être verticale, cette partie va être la première à se détacher et peut empêcher l'évacuation des habitants en obstruant la sortie de la cavité.

B et C. Le deuxième niveau d'atteinte, pour des efforts horizontaux plus grands concernera l'ensemble de la partie avant de la grotte.

D. Lentille d'effondrement : la totalité du massif peut se détacher selon une surface de glissement entraînant une totale destruction de la cavité. Les effondrements de l'axe de la voûte et des murs latéraux peuvent également intervenir avec une amplification liée à la secousse.

Durée de vie des habitats troglodytiques :

Elle est liée à leur entretien et en particulier à la lutte contre l'humidité.
Les conditions optimales sont bien sûr liées à la présence de l'habitant susceptible de veiller d'une part à l'étanchéité du sol-toit, et d'autre part, à la ventilation. Une durée de vie supérieure à 100 ans est chose courante lorsque la grotte est occupée, mais lorsqu'elle est inhabitée elle peut se détruire en une dizaine d'années. La force et la fréquence des séismes influe bien entendu aussi directement sur leur durée de vie.

Les séismes :

Comportements comparés des habitations creusées, construites en terre et construites en bois :

Les provinces du Fleuve Jaune sont concernées par une importante activité sismique.
La question qui surgit immédiatement lorsque l'on évoque les séismes est bien entendu la suivante : les habitations creusées sont-elles plus ou moins vulnérables que les habitations construites en surface ?

Deux études menées en 1970 et en 1976 sur deux séismes conduisent au résultat suivant : les grottes ont une meilleure résistance que les habitations construites en surface. En effet, le pourcentage de destructions observé dans les grottes est inférieur à celui observé sur les maisons construites traditionnelles (bois, terre crue, maçonnerie).

Le tableau suivant résume ces observations relatives au séisme de magnitude 7 qui en 1970 ébranla une partie de la province de Ningxia :

TYPE D'HABITATION	**Pourcentage de destruction**			
Maisons en adobe	64	24	3	9
Maisons troglodytiques	42	14	13	31
Niveau de destruction	Destruction totale	Dommages graves	Dommages légers	Sans dommage

Alors que 9 % seulement des maisons construites en surface, en adobe, sont demeurées intactes, ce sont 31 % des grottes qui ont bien résisté.

La figure 8 visualise, pour une zone plus vaste où le séisme a varié de 6 à 8 degrés, la proportion respective d'habitations ayant subi des dommages modérés et/ou graves.

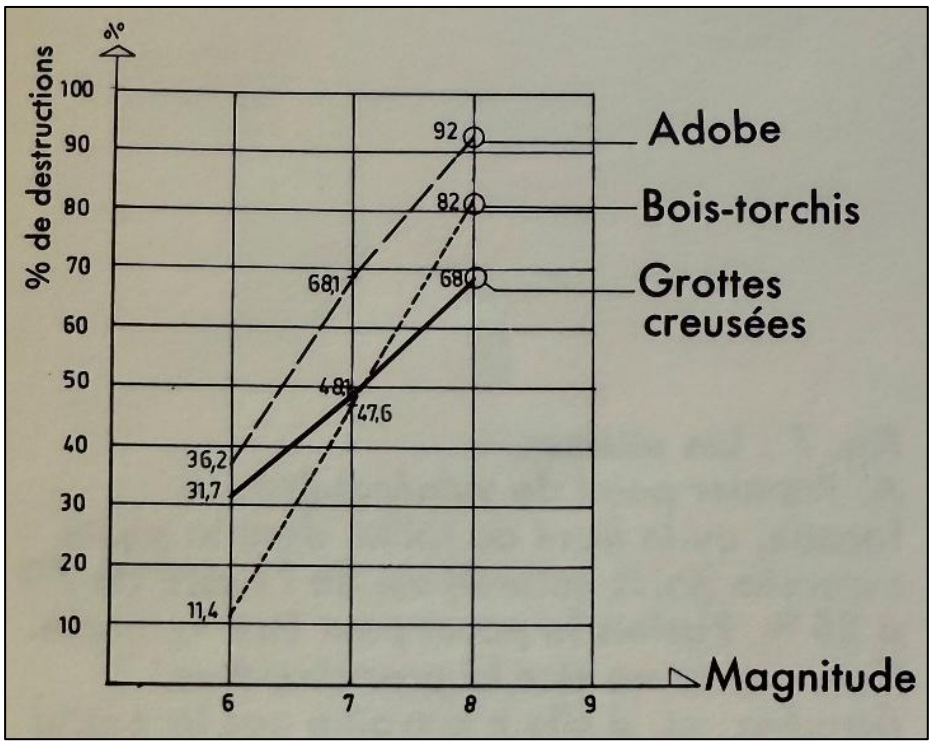


Figure 223 : Pourcentage de destruction selon le type de construction.

Résultats basés sur l'observation de 1 006 travées de maisons en ossature bois et torchis, 669 travées de maisons en adobe et 369 voûtes de grottes creusées.

Le graphique permet une fois de plus de démontrer une meilleure résistance des grottes dont le pourcentage de destruction reste inférieur à celui des constructions en adobe, quelle que soit la magnitude considérée. Seulement pour des séismes modérés, les constructions en bois sont plus résistante. Au-dessus d'une magnitude de niveau 7, les grottes viennent en tête des trois catégories de constructions, pour leur résistance face aux séismes.

Enfin, il existe un certain nombre de mesures permettant de réduire la vulnérabilité des habitats troglodytiques face aux séismes :

- le choix judicieux du site : les zones d'érosion intense sont bien entendu à proscrire ;
- la hauteur de lœss au-dessus de la voûte devra être importante et le front de taille aménagé en retraits successifs ;
- une consolidation de la façade par un mur de pierre ou brique la protégera de l'érosion et la consolidera mécaniquement (effet de soutènement).
- la simplicité des formes des pièces, issues d'un plan simple, permet de renforcer la stabilité de l'ensemble de l'habitat troglodytique.
- le doublage intérieur de la voûte par une épaisseur de brique ou de pierre renforcera également la stabilité et la solidité de l'habitat souterrain.

2.1.2.3 Tableau comparatif des qualités de confort usuel des habitations troglodytiques dans les régions étudiées

Critères / Régions étudiées	Andalousie (Espagne)	Sud de la Tunisie	Cappadoce (Turquie)	Shensi (Chine)
Inertie thermique	Élevée : température stable, idéale pour climats chauds et modérés	Moyenne à élever : bonne protection contre la chaleur	Très élevée : performance exceptionnelle dans les variations extrêmes	Bonne : température stable pour les climats continentaux
Hygrométrie	Modérée : faible humidité naturelle, évite l'accumulation d'humidité excessive	Faible : très sèche en raison du climat désertique	Très basse : les roches volcaniques absorbent peu d'humidité	Moyenne : nécessite parfois une gestion de l'humidité en raison des lœss
Éclairage naturel	Moyen : ouvertures limitées, recours à des puits de lumière	Faible : ouvertures réduites pour conserver la fraîcheur	Moyen : utilisation de fenêtres et de puits de lumière	Faible : dépend souvent d'aménagements pour améliorer l'entrée de lumière
Capacité à accueillir des réseaux de fluides	Bonne : compatible avec l'installation de plomberie et d'électricité moderne	Moyenne : nécessite des aménagements spécifiques pour installer des infrastructures	Très bonne : le tuf est facile à travailler pour intégrer des réseaux modernes	Moyenne : le lœss est fragile, ce qui peut compliquer les travaux
Possibilité d'extension du logement	Bonne : l'argile et le calcaire sont faciles à creuser, extensions réalisables	Moyenne : les matériaux rocheux et sableux sont plus limitants	Très bonne : le tuf est facile à modeler pour agrandir ou modifier les habitations	Moyenne : les risques d'effondrement limitent les extensions importantes
Confort thermique	Élevé : frais en été, tempéré en hiver	Très élevé : maintien de la fraîcheur, mais peut nécessiter du chauffage en hiver	Exceptionnel : confort maximal été comme hiver	Bon : stable mais nécessite un chauffage supplémentaire en hiver
Coût d'entretien	Modéré : nécessite un entretien pour limiter l'érosion	Faible : peu de maintenance requise, sauf pour les ouvertures	Modéré : l'érosion naturelle du tuf peut nécessiter des réparations périodiques	Modéré à élever : le lœss peut nécessiter des consolidations régulières
Isolation acoustique	Très bonne : murs épais bloquent les bruits extérieurs	Bonne : l'argile et le sable offrent une isolation satisfaisante	Excellente : les murs en tuf absorbent efficacement les sons	Moyenne : les habitations en lœss sont moins isolantes acoustiquement
Esthétique intérieure	Agréable : murs en argile/calcaires souvent décorés	Rustique : charme minimaliste des matériaux bruts	Unique : murs sculptés dans le tuf, ambiance chaleureuse	Fonctionnelle : murs en lœss souvent laissés bruts ou peu décorés

2.1.3 Les performances climatiques, énergétiques et écologiques des différents habitats troglodytes

2.1.3.1 Tableau comparatif dans le monde

Critères / Régions étudiées	Habitats troglodytiques en Chine	Habitats troglodytiques en Espagne
Types d'habitats	Principalement les yaodongs (grottes creusées dans des falaises ou des plaines de lœss)	Maisons troglodytiques creusées dans des collines ou sous des formations rocheuses
Matériau naturel	Lœss : roche meuble et isolante	Roches volcaniques (Guadix), calcaires (Setenil), argileuses (Cuevas de Almanzora, Purullena)
Régulation thermique	Excellente isolation : température stable entre 10 et 15 °C toute l'année	Température constante entre 18 et 20 °C en moyenne, adapté aux climats chauds
Adaptation au climat	Idéal pour des climats continentaux : hivers froids et étés chauds	Adapté aux climats méditerranéens et semi-arides : protection contre les chaleurs intenses
Ressources énergétiques	Réduction des besoins en chauffage l'hiver et en refroidissement l'été	Faible consommation d'énergie pour maintenir un confort thermique
Durabilité	Pérennité grâce à la structure compacte du lœss, résistante aux intempéries	Longue durée de vie, mais entretien nécessaire selon la qualité de la roche
Résistance aux conditions climatiques externes	Bonne résistance au vent, aux variations climatiques et à l'humidité	Bonne protection contre les températures extrêmes, mais vulnérabilité en cas d'érosion
Confort climatique	Confort optimal dans des régions avec des écarts thermiques importants	Confort optimal dans des climats chauds et secs
Impact environnemental	Faible empreinte écologique : matériaux locaux utilisés	Écologique, utilisant des matériaux naturels et minimisant l'impact sur le paysage
Particularités régionales	Présence dans les régions de lœss du nord de la Chine : style de vie communautaire marqué	Présence dans plusieurs régions d'Andalousie : intégration esthétique et fonctionnelle au sein du paysage

Critères / Régions étudiées	Architecture troglodyte en Cappadoce	Architecture troglodyte en Tunisie
Types d'habitats	Maisons troglodytiques creusées dans des cheminées de fée, des formations rocheuses volcaniques	Maisons troglodytiques creusées dans des collines argileuses, souvent en structure circulaire
Matériau naturel	Roches volcaniques tendres : tuf	Argile compacte et grès
Régulation thermique	Excellente isolation thermique : température intérieure stable autour de 15-20 °C	Température stable et fraîche entre 15 et 18 °C : idéal pour les zones désertiques
Adaptation au climat	Adapté aux climats continentaux : étés chauds et hivers froids	Adapté aux climats désertiques chauds et arides
Ressources énergétiques	Réduction des besoins en chauffage l'hiver et en refroidissement l'été	Réduction quasi-totale de la dépendance aux systèmes de climatisation
Durabilité	Durable, mais nécessite un entretien régulier pour éviter l'érosion	Faible entretien nécessaire grâce à la pérennité de l'argile compacte
Résistance aux conditions climatiques externes	Bonne résistance aux variations climatiques et à l'humidité	Protection efficace contre la chaleur intense et les vents secs du désert
Confort climatique	Confort optimal pour les régions avec des écarts thermiques importants	Confort optimal dans des régions chaudes et sèches
Impact environnemental	Faible empreinte écologique : utilisation de matériaux locaux et intégration dans le paysage naturel	Très écologique, utilisant des matériaux locaux et minimisant l'impact environnemental
Particularités régionales	Présence dans la région de Göreme : utilisation souvent liée à des fonctions religieuses (églises, monastères)	Présence dans les villages berbères comme Matmata : souvent utilisées comme habitations familiales

Bilan du tableau comparatif des performances climatiques, énergétiques et écologiques des différents habitats troglodytes dans le monde

Les études de cas menées dans le Shensi, en Andalousie, en Cappadoce et dans le sud de la Tunisie montrent que, malgré la diversité des contextes géographiques et culturels, les habitats troglodytiques présentent partout d'excellentes performances climatiques, énergétiques et écologiques. Dans le Shensi chinois, les *yaodong* creusés dans le loess démontrent une remarquable efficacité thermique grâce aux propriétés isolantes de ce sol poreux, permettant de maintenir des températures intérieures stables tout au long de l'année et de réduire considérablement les dépenses énergétiques. En Andalousie, les cuevas de Guadix et les habitats sous rochers de Setenil confirment aussi cette capacité d'autorégulation thermique, en offrant une fraîcheur constante malgré des températures extérieures extrêmes, souvent supérieures à 40 °C, ce qui en fait un modèle de résilience dans un climat semi-désertique.

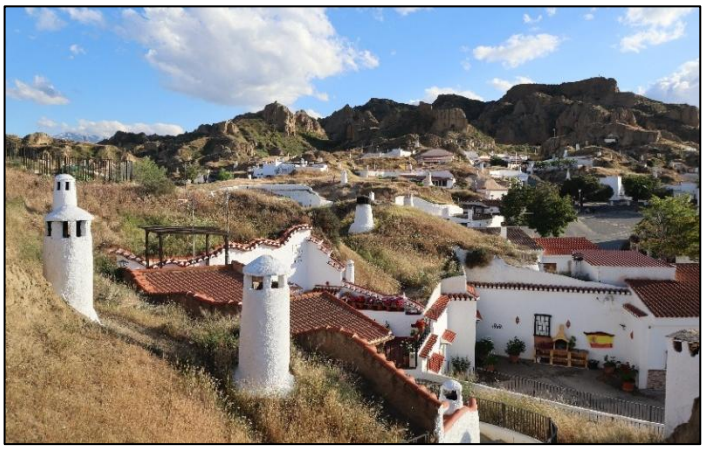
En Cappadoce, le creusement dans le tuf volcanique illustre une autre déclinaison performante de l'habitat souterrain : ce matériau léger et poreux assure une inertie thermique importante et une régulation naturelle de l'humidité, tout en permettant des extensions architecturales particulièrement souples. Quant au sud de la Tunisie, les habitations creusées en cratère autour d'une cour souterraine constituent l'une des solutions les plus efficaces contre la chaleur désertique, protégeant les habitants des vents, du rayonnement solaire et des écarts thermiques majeurs, tout en s'appuyant presque exclusivement sur la terre crue comme ressource constructive.

Dans l'ensemble, ces exemples montrent que le troglodytisme, loin d'être une architecture marginale, propose un modèle de durabilité passive fondé sur l'inertie du sol, une consommation énergétique réduite et une empreinte écologique minimale. Toutefois, chaque territoire révèle aussi des limites spécifiques liées à l'humidité, à l'érosion, à la sismicité ou à la faible luminosité qui rappellent que ces architectures, aussi performantes soient-elles, restent étroitement dépendantes de leurs conditions géologiques et environnementales.
Ainsi, ces habitats offrent un panorama riche et inspirant sur les potentialités de l'habitat souterrain, tout en soulignant la nécessité d'adapter chaque typologie à son contexte local.

2.1.3.2 Des villages andalous étudiés

2.1.3.2.1 Etude de cas n°1 - Guadix

Située dans la province de Grenade, en Andalousie, Guadix est une ville réputée pour ses habitations troglodytiques nichées dans les collines de roche volcaniques tendre qui composent la région.
Ce type d'habitat témoigne d'une ingénieuse adaptation à la topographie d'un site accidenté.





Etant soumis à un climat plutôt chaud et aride, les grottes de Guadix permettent de créer des espaces de vie frais et fonctionnels. Au fil du temps, ces habitats souterrains ont été transformées pour répondre aux exigences modernes mais ont tout de même gardé leur charme rustique.

Les habitations troglodytiques de Guadix se distinguent par leur façade extérieure composée d'une entrée blanchie à la chaux et de cheminées qui émergent des collines. Ces maisons troglodytes dispose d'un confort usuel agréable car elles maintiennent une température stable toute l'année, autour de 18 à 20 °C, offrant une solution aux contraintes climatiques imposées par les chaleurs estivale.

Aujourd'hui, à Guadix, plusieurs grottes transformées en musées ou en hébergements touristiques sont ouvertes au public afin de sensibiliser les gens aux avantages de ce mode de vie ancestral.

Critères d'analyse	Description
Type de structures	Grottes creusées dans la roche tendre
Matériaux utilisés	Roches volcaniques tendres et argile
Disposition des habitats	Souterraine, avec façades visibles
Éléments architecturaux	Façades blanchies, intérieurs spacieux
Température ambiante	Stable grâce à l'épaisseur des parois
Esthétique extérieure	Entrées souvent blanchies à la chaux
Origine historique	Développé sous influence arabe
Adaptation au terrain	Structures horizontales sur collines rocheuses
Usages modernes	Hôtels, maisons contemporaine

2.1.3.2.2 Etude de cas n°2 - Setenil de las Bodegas

Niché dans la province de Cadix, en Andalousie, Setenil de las Bodegas est un village troglodytique où les maisons s'implantent sous d'immenses formations rocheuses.

L'origine de Setenil remonte à l'époque médiévale, où les populations locales ont commencé à bâtir des habitats dans les parois rocheuses naturelles pour se protéger des invasions arabes et s'abriter de l'ensoleillement qui à un taux extrêmement élevé dans cette région.

Contrairement aux villages troglodytiques où les habitations sont creusées dans la roche, Setenil se distingue par ses constructions sous des gigantesques rochers de calcaire qui servent de murs et de toits naturels.
Cette disposition permet une excellente isolation thermique, offrant un refuge frais en été et chaud en hiver.

Les maisons de Setenil sont fonctionnelles, combinant des éléments d'architecture traditionnelle andalouse comme les murs blanchis à la chaux avec la robustesse brut de la roche.

Setenil de las Bodegas incarne un exemple réussi d'architecture-paysage.





Critères d'analyse	Description
Type de structures	Maisons sous et entre des rochers massifs
Matériaux utilisés	Roches calcaires et substrats naturels
Disposition des habitats	Intégrés sous des formations rocheuses verticales
Éléments architecturaux	Murs et plafonds en roche brute
Ambiance climatique	Ombragé grâce aux rochers
Esthétique extérieure	Contraste marqué entre roche brute et murs peints
Origine historique	Exploité dès le Moyen Âge
Adaptation au terrain	Constructions verticales dans un canyon rocheux
Usages modernes	Rénovation et réhabilitation

2.1.3.2.3 Etude de cas n°3 - Baza

Située dans la province de Grenade, en Andalousie, Baza est une ville connue pour son patrimoine troglodytique nichée entre la Sierra et les vastes plaines andalouses.

Les habitations de la ville sont un témoignage de la capacité du troglodytisme à s'adapter aux environnements arides.
Les grottes de Baza, qui servaient autrefois de refuges, continuent aujourd'hui de représenter un mode de vie confortable.

Les habitations troglodytiques de Baza, creusées dans des collines d'argile, offrent une régulation thermique naturelle, garantissant des intérieurs frais en été et chauds en hiver. Leur façade blanchie et leurs cheminées qui émergent du sol sont également des dispositifs permettant de réguler la température, la luminosité et la ventilation au sein du logement.





Critères d'analyse	Description
Type de structures	Grottes troglodytiques souvent profondes
Matériaux utilisés	Argile et matériaux sédimentaires
Disposition des habitats	Souterraines et dispersées
Éléments architecturaux	Façades blanchies
Température ambiante	Stable entre 18° à 20°C
Esthétique extérieure	Apparence rustique, peu ornementée
Origine historique	Origines arabes et médiévales
Adaptation au terrain	Habitations en pente douce sur terrains argileux
Usages modernes	Certaines habitations transformées en musées

2.1.3.2.4 Etude de cas n°4 - Gorafe

Situé au cœur de la région désertique de Grenade, Gorafe est un petit village andalou réputé pour ses habitations troglodytiques creusées dans une multitude de collines d'argile qui composent le village, permettant aux habitants de bénéficier d'une isolation thermique naturelle, essentielle dans cette région soumise à des étés extrêmement chaud et des hivers froids.

Les grottes, bien que rustiques dans leur apparence extérieure, offrent des intérieurs spacieux et confortables.





Critères d'analyse	Description
Type de structures	Habitations troglodytiques groupées en colonnes
Matériaux utilisés	Roches argileuses et sédimentaires
Disposition des habitats	Groupées sur des terrains escarpés
Éléments architecturaux	Façades simples, souvent rustiques
Température ambiante	Isolation naturelle par la roche
Esthétique extérieure	Sobre, intégrée au paysage désertique
Origine historique	Liens avec l'époque préhistorique
Adaptation au terrain	Exploitation de falaises naturelles
Usages modernes	Simples modernisations pour la plupart

2.1.3.2.5 Etude de cas n°5 – Cuevas de Almanzora

Située dans la province d'Almería, en Andalousie, Cuevas de Almanzora est une ville emblématique pour ses habitations troglodytiques creusées dans les collines argileuses qui s'harmonisent avec le paysage naturel.

Développées à l'époque romaine et perfectionnées sous l'influence arabe, ces habitations creusées dans la roche ont été rénovées pour inclure des aménagements modernes tout en conservant leur charme originel.

Les maisons troglodytiques de Cuevas de Almanzora se distinguent par leur capacité à maintenir une température ambiante constante tout au long de l'année, un atout précieux dans cette région au climat chaud.





Critères d'analyse	Description
Type de structures	Grottes aménagées dans les collines
Matériaux utilisés	Argile et calcaires des collines
Disposition des habitats	Constructions dans les collines basses
Éléments architecturaux	Maisons troglodytiques avec finitions modernes
Température ambiante	Bonne régulation thermique naturelle
Esthétique extérieure	Intégration paysagère importante
Origine historique	Développé sous l'influence romaine et arabe
Adaptation au terrain	Façades exposées, creusées dans les collines
Usages modernes	Visites touristiques

2.1.3.2.6 Etude de cas n°6 – Caniles

Situé dans la province de Grenade, à proximité de Baza, entouré de paysages pittoresques avec la Sierra et les plaines agricoles qui caractérisent la région, Caniles est un charmant village andalou connu pour ses habitations troglodytiques adaptées aux conditions climatiques et aux ressources naturelles locales.

Les maisons troglodytiques de Caniles, creusées dans les collines d'argile, se fondent harmonieusement dans le paysage environnant. Elles sont également réputées pour leur capacité à maintenir une température ambiante constante tout au long de l'année, offrant un confort naturel dans une région marquée par des étés chauds et des hivers froids.





Critères d'analyse	Description
Type de structures	Habitations troglodytiques avec espaces modernisés
Matériaux utilisés	Argile compactée et roche tendre
Disposition des habitats	Regroupées en petits ensembles familiaux
Éléments architecturaux	Simplicité architecturale
Température ambiante	Température stable été comme hiver
Esthétique extérieure	Apparence rustique avec quelques modernisations
Origine historique	Évolution lente vers des habitations modernes
Adaptation au terrain	Construction adaptée aux terrains plats et collines
Usages modernes	Habitations modernisées

2.1.3.2.7 Etude de cas n°7 – Purullena

Situé dans la province de Grenade, Purullena est un village emblématique de l'habitat troglodytique, niché au pied de la Sierra Nevada.

L'histoire de Purullena remonte à l'époque préhistorique, mais c'est sous l'influence arabe que les grottes ont été perfectionnées et popularisées comme mode de vie. Aujourd'hui, ces habitations troglodytiques continuent d'être utilisées, témoignant de leur durabilité et de leur adaptation aux conditions climatiques locales.

Les habitations troglodytiques de Purullena, blanchies à la chaux, s'intègrent harmonieusement dans les collines d'argile. Ces maisons offrent une régulation thermique naturelle essentielle dans une région au climat chaud et sec.

Critères d'analyse	Description
Type de structures	Grottes troglodytiques avec une forte densité
Matériaux utilisés	Argile et calcaire avec des revêtements modernes
Disposition des habitats	Densité élevée sur terrains plats et collines
Éléments architecturaux	Façades et entrées souvent colorées
Température ambiante	Température constante, très adaptée au climat chaud
Esthétique extérieure	Couleurs vives sur certaines entrées
Origine historique	Développement grâce à la proximité de Guadix
Adaptation au terrain	Exploitation maximale des collines
Usages modernes	Maisons contemporaines et hôtels

2.1.3.2.8 Etude de cas n°8 – Sacromonte

Perché sur les collines qui dominent la ville de Grenade, Sacromonte est un quartier célèbre pour ses habitations troglodytiques creusées dans la roche calcaire.

Il s'est développé au XVIe siècle, lorsque les populations gitanes et morisques ont commencé à s'installer dans les grottes naturelles des collines environnantes. Connu comme le berceau du flamenco gitan, Sacromonte est aujourd'hui un quartier où la vie communautaire reste très forte.

Les maisons de Sacromonte possèdent des façades blanches enduites à la chaux et souvent ornées de petits balcons en fer forgé. Ces grottes offrent une excellente isolation thermique, créant un microclimat agréable tout au long de l'année.

Critères	Description
Localisation	Quartier sur les collines au nord-est de Grenade, dominant la ville et l'Alhambra
Origines historiques	Développement à partir du XVIe siècle, lié aux communautés gitanes et morisques
Type d'habitat	Maisons troglodytiques creusées dans la roche calcaire, façades blanchies
Architecture	Grottes avec façades souvent ornées, balcons en fer forgé, isolation thermique naturelle efficace
Usage actuel	Résidences, lieux culturels, tablaos de flamenco, musées
Caractéristiques culturelles	Berceau du flamenco gitan, forte vie communautaire, riche patrimoine immatériel
Patrimoine naturel	Collines calcaires offrant vues panoramiques sur Grenade et l'Alhambra
Adaptation au climat	Isolation naturelle grâce à la roche calcaire, microclimat tempéré
Atmosphère	Ambiance conviviale, artistique, vibrante, ancrée dans la tradition andalouse




Figure 224 : Vue d'une partie du quartier troglodytique Sacromonte à Grenade.
Vue intérieur d'un habitat troglodytique de Sacromonte. .

2.1.3.2.9 Tableau comparatif

Critères	Guadix	Setenil de las Bodegas
Types d'habitats	Maisons troglodytiques creusées dans des collines de roche volcanique tendre	Maisons construites sous de grandes formations rocheuses calcaires
Matériau naturel	Roche volcanique tendre	Roche calcaire dense
Régulation thermique	Température intérieure stable entre 18 et 20 °C, idéale pour les climats chauds	Régulation thermique naturelle grâce à la masse rocheuse qui protège du soleil et du froid
Adaptation au climat	Adapté aux climats semi-arides avec des températures extrêmes	Idéal pour le climat méditerranéen avec des étés chauds et des hivers doux
Ressources énergétiques	Faible consommation d'énergie pour chauffer ou refroidir	Réduction des besoins en climatisation ou en chauffage grâce à la protection naturelle
Pérennité	Durable, mais un entretien est requis pour prévenir l'érosion des collines volcaniques	Très durable, la roche calcaire offre une excellente résistance structurelle
Résistance aux conditions climatiques externes	Bonne résistance aux variations climatiques, sensible à l'érosion des collines	Très bonne résistance aux intempéries et aux variations climatiques
Confort climatique	Intérieur frais en été et tempéré en hiver, agréable tout au long de l'année	Confort thermique exceptionnel grâce à l'épaisseur et la densité de la roche
Impact environnemental	Intégration dans le paysage naturel : faible empreinte écologique	Empreinte écologique minimale
Particularités régionales	Villages entourés de collines troglodytiques	Maisons uniques installées sous des surplombs rocheux

Critères	Baza	Gorafe
Types d'habitats	Maisons troglodytiques creusées dans des collines argileuses	Maisons troglodytiques creusées dans des formations rocheuses argileuses
Matériau naturel	Argile compacte, offrant une bonne isolation thermique	Argile et roches tendres présentes dans le désert de Gorafe
Régulation thermique	Température intérieure stable autour de 18-20 °C, idéale pour des climats chauds et arides	Excellente isolation, température intérieure stable entre 18-20 °C
Adaptation au climat	Adapté aux climats semi-arides, protection contre les variations thermiques importantes	Parfait pour un climat désertique : protection efficace contre la chaleur extrême
Ressources énergétiques	Faible consommation d'énergie pour maintenir un confort thermique agréable	Réduction importante des besoins en chauffage et en climatisation
Pérennité	Très durable, nécessite un entretien limité selon la qualité de l'argile	Structure durable, mais vulnérable à l'érosion naturelle dans les zones exposées
Résistance aux conditions climatiques externes	Bonne résistance aux températures élevées et aux vents secs	Protection optimale contre la chaleur et les vents du désert
Confort climatique	Intérieur frais en été et tempéré en hiver, adapté aux saisons arides	Confort thermique toute l'année, idéal pour les variations climatiques extrêmes
Impact environnemental	Empreinte écologique faible, intégration dans le paysage naturel	Très faible impact écologique et utilisation de matériaux locaux pour la construction des habitats troglodytiques
Particularités régionales	Cadre rural	Environnement désertique

Critères	Cuevas de Almanzora	Caniles
Types d'habitats	Maisons troglodytiques creusées dans des collines argileuses, souvent intégrées à des espaces modernes	Maisons troglodytiques creusées dans des collines de roche tendre, dans un cadre rural
Matériau naturel	Argile et roches tendres	Argile et roches volcaniques
Régulation thermique	Température stable autour de 18 à 20 °C, protection contre les chaleurs intenses	Excellente isolation thermique : température constante autour de 18-20 °C
Adaptation au climat	Adapté aux climats méditerranéens chauds et secs	Conçu pour résister aux variations climatiques dans les climats semi-arides
Ressources énergétiques	Réduction significative des besoins en climatisation et en chauffage	Très faible consommation d'énergie grâce à l'isolation naturelle
Pérennité	Durable, mais nécessite un entretien pour prévenir l'érosion des collines	Structure solide et durable
Résistance aux conditions climatiques externes	Bonne résistance aux températures élevées, mais sensible à l'érosion naturelle	Résistant aux vents secs et aux variations de température
Confort climatique	Intérieur frais en été et tempéré en hiver, assurant un confort thermique toute l'année	Intérieur confortable en toutes saisons, bien adapté aux écarts thermiques
Impact environnemental	Faible empreinte écologique : utilisation de matériaux locaux	Empreinte écologique minimale
Particularités régionales	Grandes falaises rocheuses dans lesquelles s'intègrent les habitations troglodytiques	Ambiance rurale avec des maisons troglodytiques toujours habitées

Critères	Purullena	Sacromonte (Grenade)
Types d'habitats	Maisons troglodytiques creusées dans des collines argileuses	Maisons troglodytiques creusées dans des collines calcaires
Matériau naturel	Argile compacte offrant une isolation thermique naturelle	Roche calcaire dense, utilisée pour sa durabilité et ses propriétés isolantes
Régulation thermique	Température intérieure stable entre 18-20 °C, idéale pour les climats chauds et secs	Température stable autour de 15-20 °C, adapté aux saisons chaudes et tempérées
Adaptation au climat	Conçu pour résister aux climats semi-arides	Adapté aux climats méditerranéens : protection contre les chaleurs estivales
Ressources énergétiques	Très faible consommation d'énergie pour chauffer ou refroidir l'habitat	Réduction importante des besoins en chauffage et en climatisation
Pérennité	Très durable, mais nécessite un entretien pour éviter l'érosion	Structure durable qui nécessite peu d'entretien malgré l'ancienneté des habitations
Résistance aux conditions climatiques externes	Bonne résistance aux variations climatiques mais vulnérable à l'érosion	Excellente résistance aux intempéries et aux variations thermiques
Confort climatique	Intérieur frais en été et tempéré en hiver, assurant un confort thermique toute l'année	Intérieur frais en été et tempéré en hiver, assurant un confort thermique toute l'année
Impact environnemental	Faible empreinte écologique et utilisation de matériaux locaux pour la construction de l'habitat troglodytique	Intégration harmonieuse dans le paysage naturel : empreinte écologique minimale
Particularités régionales	Villages ruraux avec un fort lien à l'agriculture	Quartier connu pour le flamenco gitan

Bilan du tableau comparatif des performances climatiques, énergétiques et écologiques des différents habitats troglodytes étudiées en Andalousie

L'analyse des différents ensembles troglodytiques d'Andalousie montre une remarquable cohérence en termes de performances climatiques et énergétiques, malgré la diversité géologique et paysagère de ces secteurs. À Guadix, Purullena, Baza, Caniles et Gorafe, les cuevas creusées dans les badlands argileux illustrent le modèle le plus répandu : une architecture souterraine dont la masse thermique permet une stabilité intérieure autour de 18–22 °C tout au long de l'année, y compris lors des périodes de canicule pouvant dépasser les 45 °C. Dans ces habitats, la terre compacte agit à la fois comme isolant et régulateur hygrométrique, limitant les variations de température et réduisant presque totalement la nécessité de climatisation ou de chauffage. Sur le plan énergétique, cette inertie naturelle constitue l'un des atouts majeurs : l'habitat fonctionne essentiellement en régime passif, avec des besoins énergétiques extrêmement faibles. Sur le plan écologique, l'utilisation du terrain disponible, l'absence de matériaux industriels et l'intégration paysagère quasi invisible confèrent à ces villages un impact environnemental minimal.

Le cas de Gorafe montre en outre une dimension géomorphologique intéressante : les profondes ravines (cárcavas) offrent des zones naturellement protégées du vent et du rayonnement direct, optimisant les performances bioclimatiques. Les cuevas de Baza et Caniles illustrent quant à elles des typologies plus complexes avec plusieurs niveaux, cours semi-fermées et pièces communicantes permettant une ventilation naturelle efficace.

Cuevas de Almanzora constitue un cas particulier : ses habitations troglodytiques, creusées dans des zones plus côtières et soumises à des influences maritimes, montrent une régulation hygrométrique légèrement différente mais tout aussi performante. L'humidité est mieux contrôlée grâce à la porosité du terrain, tandis que les températures restent stables malgré un climat plus doux mais variable. Là encore, l'efficacité énergétique du modèle troglodytique démontre sa pertinence dans un contexte méditerranéen.

Setenil de las Bodegas représente un autre type d'habitat troglodytique : les maisons ne sont pas creusées mais logées sous d'immenses surplombs calcaires. Cette configuration semi-troglodytique offre une excellente protection solaire et une réduction massive du rayonnement direct, conférant un confort thermique notable l'été. L'inertie de la roche surplombante suffit à maintenir des ambiances fraîches, bien qu'une partie de l'efficacité énergétique dépende ici de l'architecture hors-sol attenante. Le modèle illustre la capacité du troglodytisme à s'adapter à des géologies très différentes.

Enfin, le quartier du Sacromonte à Grenade montre une version plus artisanale et parfois moins régularisée des cuevas, mais les performances thermiques restent très proches de celles de Guadix ou Purullena. Situées sur des pentes très exposées, ces habitations offrent un excellent exemple d'intégration paysagère, combinant stabilité thermique, faible énergie grise et gestion efficace du microclimat local, notamment grâce à la ventilation naturelle des pièces troglodytiques et à leur orientation stratégique.

2.1.3.2.10 Entretiens avec les habitants des villages andalous étudiés

Pour voir les fiches d'entretien, questionnaire complet et les questions qui ont été posées aux habitants des villages andalous étudiés, se référer à l'annexe en fin d'ouvrage (p...)

Entretien N°1 : Patricia, 25 ans, Baza :

A. Contexte personnel et historique :

1. **Pouvez-vous vous présenter brièvement et nous parler de votre parcours dans la vie ?**

Je fais des études en sciences de l'infirmerie.

2. **Depuis combien de temps habitez-vous dans une maison troglodyte ?**

Cela fait 1 an que je vis dans une maison troglodyte. J'habite à Guadix et non à Baza.
Cette maison troglodyte, c'est la maison de mon mari. Nous venons ici pour les vacances et nous reposer les week-end. C'est une maison secondaire et non notre lieu de vie principal.
Cela va faire un peu plus de 4 ans que mon mari a décidé de l'acquérir.

3. **Avez-vous grandi dans ce type d'habitat ou est-ce un choix que vous avez fait plus tard ? Pourquoi ?**

Oui j'ai grandi et vécu dans une maison troglodyte depuis mon enfance, dans le quartier des Cuevas de Guadix. J'ai également opté pour continuer à vivre dans ce type d'habitat pour les qualités architecturales qu'il possède.

4. **Pouvez-vous nous raconter l'histoire de votre maison troglodyte ?**

Ce qui m'a été raconté, c'est que cette maison troglodyte a été habité en premier par l'arrière-arrière-grand-père de mon mari. Aujourd'hui, la maison dispose de tout le nécessaire d'une maison moderne avec de nombreuses pièces de vie. Il y a en tout 5 pièces de vie habitables dans cette maison et 2 chambres en plus que nous utilisons pour stocker les bûches pour la cheminée et stocker du matériel. Cependant, au début, ce n'était rien d'autre qu'un tunnel large pour stocker des objets et il servait aussi de lieu pour y faire dormir les animaux.

B. Architecture et aménagement :

1. **Avez-vous apporté des modifications ou rénovations à votre maison ? Si oui, lesquelles et pourquoi ?**

L'unique rénovation que nous avons effectué sur la maison a été de faire poser du carrelage dans la cuisine et du terrazzo dans le reste des pièces de la maison.

2. **Comment décririez-vous la répartition des espaces intérieurs ? Est-elle fonctionnelle pour votre mode de vie ?**

L'entrée du logement donne sur le salon avec la cheminée. La chambre principale se situe dans le prolongement de l'axe central de l'entrée du logement et s'ouvre sur cet espace central.
Une seconde chambre suit ce prolongement plus au fond que Patricia utilise comme garde-robe. A gauche du salon, sur la façade principale se suivent respectivement la salle à manger et la cuisine et de l'autre côté du salon se trouve la salle de bain. La salle de bain est la partie à part entière de la maison troglodyte car elle ne fait pas partie de la cueva, c'est la seule pièce qui n'est pas enterrée et l'unique volume construit qui ressort de la paroi rocheuse.

3. Quels sont les avantages et inconvénients liés au fait de vivre dans une maison troglodyte en termes de confort et de fonctionnalité ?

Les avantages architecturaux principaux de cette maison sont la température de 16 degrés qui ne varie pas tout au long de l'année. *« Pour moi, c'est aussi une maison accueillante, tu t'y sens au calme à l'inverse d'une maison traditionnelle où tu entends beaucoup de bruit »*.
Il y a seulement 2 fenêtres sur la façade de la maison qui permettent de l'éclairer, une sur la porte d'entrée et l'autre qui permet d'éclairer la cuisine. *« C'est un peu sombre à l'intérieur parfois, mais on finit par s'y habituer avec le temps »*.

C. Expérience de vie quotidienne :

10. Comment votre maison troglodyte répond-elle aux variations climatiques (été, hiver) ?

La température est la même tout au long de l'année. Ici à Baza, il fait entre 15 à 16 degrés dans la maison peu importe les variations de températures extérieures et les changements de saison. Ici, l'été, il fait plus de 40 degrés, alors c'est optimale de vivre dans un maison troglodyte avec ce type de conditions climatiques. Il se peut qu'en été, on puisse remarquer qu'il y a un peu plus d'humidité au sein de la maison si il a plu une grande partie de l'hiver et du printemps car la terre ne filtre pas assez les eaux de pluies. D'autre part, nous avons la cheminée qui fonctionne toujours actuellement pour si jamais nous souhaitons augmenter drastiquement la température au sein de la maison. *« C'est toujours plus agréable d'allumer un petit feu en hiver »*.

11. Quelles sont les différences majeures avec un habitat "traditionnel" en surface ?

La différence principale avec une maison traditionnelle, c'est la distribution des espaces intérieurs. En effet, pour rentrer dans une pièce, tu es toujours obligé de passer par une autre. De plus, à l'intérieur de notre maison, aucune pièces ne comportent de portes.

D. Dimension patrimoniale et sociale :

15. Avez-vous l'impression que ce type d'habitat est reconnu et valorisé dans la région ?

Non. J'ai l'impression que ce type d'habitat n'est pas valorisé car dans un premier temps, il se situe tout le temps à la périphérie des villes, dans des zones éloignées du centre-ville, loin des commerces et des services de transport en commun par exemple. Ce sont souvent des quartiers qui ne sont pas desservis et qui sont laissés à l'abandon par les politiques publiques. La plupart des gens préfèrent largement vivre vers le centre de la ville. D'autre part, j'ai l'impression que ce type d'habitat ne se rencontre que dans les quartiers pauvres des villes.

17. Y a-t-il des initiatives locales pour préserver ou promouvoir ce type d'habitat ?

Non, il n'en existe aucune à Baza.

E. Perspectives et réflexions :

18. Pensez-vous que les maisons troglodytes pourraient répondre aux besoins modernes de logement, en particulier dans les environnements climatiques extrêmes ?

Oui totalement, même si les coût et les dépenses en termes d'électricité sont plus important, le fait que le température ambiante intérieure ne varie tout au long de l'année compense cet aspect négatif des maisons troglodytes. Pour les gens qui n'ont pas beaucoup d'argent, de revenus ou de ressources, je trouve que c'est la meilleure option de choisir de vivre dans une maison troglodyte dans des régions climatiques comme l'Andalousie. Habituellement, les maisons troglodytes de Baza sont plutôt abordables en terme de prix car il y en a beaucoup qui sont soit abandonnées, soit en mauvaise état, qui attendent d'être rénovées ou réhabilitées, alors, la plupart des propriétaires baissent et diminuent fortement les prix des maisons troglodytes pour pouvoir s'en débarrasser.

20. Si vous pouviez améliorer un aspect de votre maison troglodyte, lequel serait-il et pourquoi ?

Il s'agirait de la luminosité et de l'éclairage naturelle. Si l'occasion se présentait à moi, je ferai intervenir un architecte spécialisé pour pouvoir mettre en place un système d'éclairage zénithal au niveau des pièces principales. Cependant, la plupart du temps et à Baza, il n'est pas possible de tailler la pierre vers le sommet de la cueva sous peine d'un possible effondrement.
Les maisons sont vieilles et les méthodes de constructions traditionnelles ont été perdues avec le temps, peu de gens savent comment construire des cuevas de nos jours.

21. Recommanderiez-vous ce type d'habitat à d'autres personnes ? Si oui, pourquoi ?

Bien évidemment, que ce soit pour les vacances ou toute l'année, je recommanderai à quiconque de vivre dans ce type d'habitat, par-dessus tout pour la tranquillité qu'il offre.



Figure 225 : Vue de l'entrée de l'habitation troglodytique de Patricia à Baza depuis les collines situées sur les hauteurs de la ville.

Entretien N°2 : Violeta, 20 ans, Gorafe :

A. Contexte personnel et historique :

1. Pouvez-vous vous présenter brièvement et nous parler de votre parcours dans la vie ?

Je fais des études en géologie.

2. Depuis combien de temps habitez-vous dans une maison troglodyte ?

Je vis à Grenade mais toute ma famille vit ici, dans le village troglodyte de Gorafe.
Je viens ici dès que je peux, quand j'ai des vacances ou les week-end.

4. Pouvez-vous nous raconter l'histoire de votre maison troglodyte ?

Cette maison a été construite il y a plus de 100 ans. Elle appartenait à mon arrière-grand-père.

B. Architecture et aménagement :

5. Quelles sont, selon vous, les principales caractéristiques architecturales de votre maison troglodyte ?

Ce type de maisons est plutôt confortable pour sa stabilité climatique. Elles sont également faites dans la roche donc il n'y aura pas de problèmes d'entretien ou d'usures avec le temps. Même si parfois tu peux voir quelques fissures apparaître à cause de l'infiltration des eaux de pluie dans la terre et la roche, les parois ne vont jamais s'effondrer.

1. Avez-vous apporté des modifications ou rénovations à votre maison ? Si oui, lesquelles et pourquoi ?

Nous avons effectué quelques rénovations pour réparer les fissures sur les parois rocheuses de la maison. Nous avons également posé du carrelage dans toutes les pièces principales de la maison car le sol de la maison était seulement composé de ciment auparavant.

2. Comment décririez-vous la répartition des espaces intérieurs ? Est-elle fonctionnelle pour votre mode de vie ?

L'entrée du logement donne sur le salon. Les pièces qui se succèdent le long de la façade principale qui donne sur la rue sont la cuisine, la salle de bain car ce sont les pièces qui nécessitent le plus d'éclairage naturelle. Toutes les chambres de la maison se situe en profondeur, au fond de la maison troglodyte. Il y a un système de ventilation naturelle de toute part au sein de la maison. Parfois, entre les pièces, il y a des petites fenêtres qui les font communiquer entre elles et permettent de générer ce système de ventilation intérieur pour faire circuler l'air.

C. Expérience de vie quotidienne :

4. Comment votre maison troglodyte répond-elle aux variations climatiques (été, hiver) ?

Je ne sais pas exactement mais tout ce que je peux te dire c'est qu'en été à l'intérieur de la maison, il fait très frais et en hiver, il fait relativement chaud en comparaison avec le climat extérieur.

5. Quelles sont les différences majeures avec un habitat "traditionnel" en surface ?

Personnellement, je préférais vivre dans une cueva que dans une maison traditionnelle. Premièrement pour la température mais aussi pour la lumière pour dormir, c'est un lieu idéal car dans la ville il y a tout le temps des lumières de partout. Moi j'aime énormément le cadre de tranquillité que ce type de maison propose. Aucun bruit ne pénètre dans l'habitation.

D. Dimension patrimoniale et sociale :

15. Avez-vous l'impression que ce type habitat est reconnu et valorisé dans la région ?

J'ai l'impression que non, je pense que les gens qui s'y intéressent et essayent de faire le nécessaire pour préserver cette typologie d'habitat sont plus les étrangers que les Espagnols et les politiques publiques du pays.

17. Y a-t-il des initiatives locales pour préserver ou promouvoir ce type d'habitat ?

A Gorafe, il n'en existe pas mais il me semble qu'ils existent quelque initiatives locales pour préserver le quartier Sacromonte de Grenade.

E. Perspectives et réflexions :

18. Pensez-vous que les maisons troglodytes pourraient répondre aux besoins modernes de logement, en particulier dans les environnements climatiques extrêmes ?

Oui totalement, je crois que ce type d'habitat serait la solution et la meilleure option à l'avenir pour des régions climatiques extrêmes similaires à celle-ci.

20. Si vous pouviez améliorer un aspect de votre maison troglodyte, lequel serait-il et pourquoi ?

Personnellement, je trouve que ma maison troglodyte répond à toute les attentes d'une maison traditionnelle. Je n'ai pas de commentaires spécifiques à faire à ce sujet.

21. Recommanderiez-vous ce type d'habitat à d'autres personnes ? Si oui, pourquoi ?

Bien évidemment, j'ai l'habitude d'en parler autour de moi, à mes amis et mes connaissances qui ne sont pas habitués à vivre dans ce genre d'endroit. J'aime énormément sensibiliser les gens à ce mode de vie car j'estime que c'est le type de logement qui pourra persister sur le long terme dans des régions climatiques extrêmes comme l'Andalousie.



Figure 226 : Vue d'ensemble de l'habitation troglodytique de Violeta en plein cœur de Gorafe.

Entretien N°3 : Antonio, 74 ans, Setenil de las Bodegas :

A. Contexte personnel et historique :

1. Pouvez-vous vous présenter brièvement et nous parler de votre parcours dans la vie ?

J'ai 4 enfants.

2. Depuis combien de temps habitez-vous dans une maison troglodyte ?

Cette maison troglodyte a appartenu à mon arrière-grand-père. Elle a appartenu à 4 génération consécutive. C'est la maison dans laquelle je vis actuellement. Auparavant, je vivais à Majorque. Je vis ici depuis que je suis à la retraite, cela va faire 10 à 12 ans que je vis ici. Néanmoins, j'ai grandi dans cette maison jusqu'à mes 15 ans.

3. Pouvez-vous nous raconter l'histoire de votre maison troglodyte ?

J'ai travaillé toute ma vie sur cette maison pour faire des aménagements à l'intérieur.
La dernière modification que j'ai effectué à l'intérieur est l'ajout d'une chambre. Cela m'a pris plus de 2 ans pour tailler la roche et créer cet espace supplémentaire au sein de la maison.
La maison fait un peu plus de 50 m^2.

B. Architecture et aménagement :

5. Quelles sont, selon vous, les principales caractéristiques architecturales de votre maison troglodyte ?

Je dirais que la première caractéristique de cette maison est qu'elle est plus ancienne que la plupart des autres maisons traditionnelles. C'est quasiment la nature qui a créée à elle seule cette maison.

1. Avez-vous apporté des modifications ou rénovations à votre maison ? Si oui, lesquelles et pourquoi ?

Bien sûr que oui, à chaque fois qu'une nouvelle génération venait s'installer dans cette maison, il y a eu de grandes modifications et des grands travaux à l'intérieur, comme l'ajout systématique d'une pièce supplémentaire. Au début, dans cette maison vivait seulement une femme, c'était une chambre de bonne. La maison s'est donc construit aux fils du temps à travers les nouvelles générations qui venaient y vivre.

9. Quels sont les avantages et inconvénients liés au fait de vivre dans une maison troglodyte en termes de confort et de fonctionnalité ?

L'avantage principal de cette maison est que je n'ai pas besoin d'utiliser de chauffage.

C. Expérience de vie quotidienne :

10. Comment votre maison troglodyte répond-elle aux variations climatiques (été, hiver) ?

A l'intérieur de la maison, il fait toujours approximativement 20 degrés. Quand en été, à l'extérieur on peut parfois atteindre les 50 degrés, ici il fait toujours la même température.

13. Y a-t-il des particularités dans l'entretien ou la maintenance de ce type de logement ?

Les rénovations au sein des maisons troglodytes sont plutôt coûteuses. Parfois, la plupart des gens font appel à un architecte spécialisé dans les maisons troglodytes pour effectuer des agrandissements, parce que les méthodes de taille de la pierre dépendent de nombreux facteurs dont la position du logement dans la paroi rocheuse.

D. Dimension patrimoniale et sociale :

17. Y a-t-il des initiatives locales pour préserver ou promouvoir ce type d'habitat ?

Non, il n'existe aucune initiative locale pour préserver ce type d'habitat, bien que Setenil soit l'un des villages troglodytes les plus emblématiques de l'Andalousie.

E. Perspectives et réflexions :

18. Pensez-vous que les maisons troglodytes pourraient répondre aux besoins modernes de logement, en particulier dans les environnements climatiques extrêmes ?

Pas forcément, mais je dirais tout de même que je me sens plus en sécurité et plus à l'aise dans une maison troglodyte que dans un appartement à Madrid par rapport aux conditions climatiques actuelles en Andalousie.

19. Si vous pouviez améliorer un aspect de votre maison troglodyte, lequel serait-il et pourquoi ?

Avec la famille et les besoins que j'ai, non je ne pense pas. Il s'agirait peut être simplement de rajouter des chambres pour mes futurs petit enfant et le fait de devoir tailler la pierre à chaque fois prend beaucoup de temps.

21. Recommanderiez-vous ce type d'habitat à d'autres personnes ? Si oui, pourquoi ?

Bien sûr, toutes les personnes vivant dans des maisons traditionnelles en Andalousie meurt de chaud en été, quand il fait plus de 40 degrés. Ils gaspillent beaucoup d'argent dans le chauffage et l'électricité en hiver. Ici, on est tout le temps au frais et il n' y a aucun bruit au sein de la maison. Si une personne cherche un cadre de vie de tranquillité, je lui recommanderai à 100% une maison troglodyte.



Figure 227 : Vue intérieur de l'une des chambres de l'habitation troglodytique d'Antonio au niveau de la « calle Mina » à Setenil de las Bodegas

Entretien N°4 : Rafael, 50 ans, Guadix :

A. Contexte personnel et historique :

2. Depuis combien de temps habitez-vous dans une maison troglodyte ?

Je vivais dans un appartement à Barcelone, mais j'ai décidé de déménager pour vivre ici avant l'arrivée de mon premier enfant. Mes parents sont nés ici, et j'ai grandi durant mon enfance dans ce quartier. Cela va faire maintenant plus de 30 ans que je vis dans une cueva.

4. Pouvez-vous nous raconter l'histoire de votre maison troglodyte ?

Les maisons troglodytiques de Guadix ont été construites à partir de l'excavation de la terre. Mes parents ont achetés la maison et depuis qu'ils sont décédés, je n'ai effectué aucunes modifications à l'intérieur.

B. Architecture et aménagement :

6. Quels matériaux ou techniques spécifiques ont été utilisés dans sa construction ou sa rénovation ?

Certaines personnes ajoutent des couches de ciment pour les parois intérieurs du logement.

8. Comment décririez-vous la répartition des espaces intérieurs ? Est-elle fonctionnelle pour votre mode de vie ?

Oui en effet, la cuisine et la salle de bain se situe en dehors de la partie enterrée dans les constructions récentes suite à de nombreuses réformes et lois sur l'hygiène et la salubrité des logements à propos des normes de ventilation naturelle.

9. Quels sont les avantages et inconvénients liés au fait de vivre dans une maison troglodyte en termes de confort et de fonctionnalité ?

L'avantage principal de ma maison troglodyte est que la température ambiante ne varie pas durant l'année. D'autre part, tu n'entends aucun bruit extérieur à l'intérieur de la maison.
« Tu n'entends pas la voisine casse-pied avec ses talons au-dessus de ta tête ».
« Tu peux me proposer de me vendre le meilleur appartement n'importe où en Espagne contre un habitat troglodyte, je ne le choisirai pas ».

E. Perspectives et réflexions :

18. Pensez-vous que les maisons troglodytes pourraient répondre aux besoins modernes de logement, en particulier dans les environnements climatiques extrêmes ?

Oui complètement.

21. Recommanderiez-vous ce type d'habitat à d'autres personnes ? Si oui, pourquoi ?

Oui complètement.

Entretien N°5 : Maria, 43 ans, Guadix :

A. Contexte personnel et historique :

1. Pouvez-vous vous présenter brièvement et nous parler de votre parcours dans la vie ?

J'ai 3 enfants et je suis très heureuse de vivre dans une cueva.

2. Depuis combien de temps habitez-vous dans une maison troglodyte ?

Je suis né ici dans le quartier des Cuevas de Guadix. J'y ai toujours été heureuse et désormais, je possède la plupart des hôtels cuevas de Guadix.

B. Architecture et aménagement :

7. Avez-vous apporté des modifications ou rénovations à votre maison ? Si oui, lesquelles et pourquoi ?

Oui, moi j'ai effectué énormément de travaux et de rénovations dans chacune des maisons troglodytes que j'ai acheté et dans lesquelles j'ai vécu. Ceci s'explique par le fait que pour pouvoir accueillir des locataires dans les hôtels cuevas que je voulais créer, les normes de logement actuelles m'imposaient de faire des travaux de rénovation. Je devais respecter plusieurs règles que les maisons troglodytes ne respectait pas au début. Nous avons agrandi par exemple des chambres qui ne respectaient pas les 9 m^2 minimum requis. D'autre part,on a ajouté des textures de sol modernes comme du carrelage et du terrazzo pour rendre les cuevas plus accueillante.

8. Comment décririez-vous la répartition des espaces intérieurs ? Est-elle fonctionnelle pour votre mode de vie ?

Je dispose de 9 pièces dans mon habitat troglodytique.

9. Quels sont les avantages et inconvénients liés au fait de vivre dans une maison troglodyte en termes de confort et de fonctionnalité ?

L'avantage principal de ce type d'habitat est qu'en hiver, à l'intérieur il fait chaud et en été il y fait frais. La température de 20 degrés est stable tout au long de l'année. Si tu souhaites avoir un cadre de tranquillité, c'est la meilleure option que ce soit pour dormir ou autre car tu n'entends aucun bruit à l'intérieur du logement.

C. Expérience de vie quotidienne :

10. Comment votre maison troglodyte répond-elle aux variations climatiques (été, hiver) ?

La température au sein de la maison est de 20 degrés durant toute l'année.

D. Dimension patrimoniale et sociale :

15. Avez-vous l'impression que ce type habitat est reconnu et valorisé dans la région ?

Personnellement, chacun de mes hôtels troglodytes sont complets durant chaque vacances scolaires. Beaucoup de touristes étrangers réservent ce type d'hébergement pour découvrir ce type d'habitat.

17. Y a-t-il des initiatives locales pour préserver ou promouvoir ce type d'habitat ?

A Guadix, oui, il existe des initiatives locales pour promouvoir et protéger ce type d'habitats avec l'émergence de nombreux musées dans le quartier notamment. Des documentaires qui ont été réalisés sur le village et au sein du quartier ont aussi contribué à diffuser la culture et la patrimoine troglodytique de Guadix. De plus, de nombreux habitants se mobilisent pour faire découvrir la culture et la patrimoine locale aux touristes en permettant de pouvoir visiter leur maison troglodyte. Enfin de nombreuses entreprises se sont lancés dans le tourisme troglodytique en créant des hôtels cuevas, ce qui a permis de renforcer la défense et de justifier l'aide pour la réhabilitation de ce patrimoine ancien.

E. Perspectives et réflexions :

18. Pensez-vous que les maisons troglodytes pourraient répondre aux besoins modernes de logement, en particulier dans les environnements climatiques extrêmes ?

Oui complètement.

21. Recommanderiez-vous ce type d'habitat à d'autres personnes ? Si oui, pourquoi ?

Oui complètement. Personnellement, je possède plusieurs hôtels troglodytiques à Guadix donc je pousse généralement les gens à découvrir ce mode d'habiter typique de la région.



Figure 228 : Vue de la façade du musée troglodytique de Guadix qui comprend également une partie habitable appartenant à Maria.

Entretien N°6 : Anna, 38 ans, Guadix :

A. Contexte personnel et historique :

1. Pouvez-vous vous présenter brièvement et nous parler de votre parcours dans la vie ?

J'ai 2 enfants et pareil, je suis extrêmement heureuse de vivre dans ce quartier des cuevas de Guadix.

2. Depuis combien de temps habitez-vous dans une maison troglodyte ?

Je viens de Baza initialement qui possède aussi un quartier troglodyte mais dans lequel je n'avais jamais vraiment m'y les pieds. Maintenant, cela fait plus de 18 ans que je vis dans une cueva.

3. Avez-vous grandi dans ce type d'habitat ou est-ce un choix que vous avez fait plus tard ? Pourquoi ?

Au tout début, lorsque je suis arrivé ici avec mon mari pour nous installer, l'idée d'habiter dans une cueva ne me plaisait pas. Je n'avais jamais vu une cueva de ma vie, mon mari souhaitait absolument vivre dans ce type d'habitat tandis que moi j'étais septique à l'idée qu'il n'y avait pas beaucoup de fenêtres et de luminosité à l'intérieur du logement. Pourtant, avec le temps, j'ai su apprécier les qualités architecturales des cuevas.

B. Architecture et aménagement :

5. Quelles sont, selon vous, les principales caractéristiques architecturales de votre maison troglodyte ?

Toutes les pièces de ma maison hormis 2 possèdent des ouvertures vers l'extérieur avec un apport d'éclairage naturel direct.

7. Avez-vous apporté des modifications ou rénovations à votre maison ? Si oui, lesquelles et pourquoi ?

Ma maison troglodytique a été rénové avec des parois intérieurs en béton. A la base, la maison ne possédait aucunes portes. Nous en avons ajouté une à chacune des pièces pour pouvoir avoir un peu plus d'intimité entre chaque partie.

8. Comment décririez-vous la répartition des espaces intérieurs ? Est-elle fonctionnelle pour votre mode de vie ?

La cuisine et la salle de bain se situe la plupart du temps dans la partie construite de l'habitat troglodyte, dans la partie qui ressort de la façade du logement avec un éclairage naturel direct. La cuisine se situe généralement tout le temps à proximité de l'entrée en façade de l'habitat troglodyte.

9. Quels sont les avantages et inconvénients liés au fait de vivre dans une maison troglodyte en termes de confort et de fonctionnalité ?

La même chose que mes voisins de Guadix. Le seul désavantage notable que j'aurais à faire remarquer, c'est que parfois, certaines pièces de la maison ne bénéficient pas d'un éclairage naturel régulier à cause de leur orientation, tandis que d'autre n'en n'ont pas du tout.

C. Expérience de vie quotidienne :

11. Quelles sont les différences majeures avec un habitat « traditionnel » en surface ?

Je dirais que la différence majeure avec un habitat « traditionnel » serait le fait que les pièces soient en enfilade. En effet, pour rejoindre certaines pièces de l'habitat troglodytique, tu es obligé de passer par la pièce précédente. Ainsi, il n'y a généralement pas de couloirs dans un habitat troglodytique. La plupart des chambres dans les habitations troglodytiques de Guadix sont en enfilade.

D. Dimension patrimoniale et sociale :

14. Quel lien entretenez-vous avec le patrimoine troglodyte local ?

Moi, j'estime que les habitats troglodytes font partie de l'histoire de l'Andalousie et plus particulièrement de Guadix. Tous les lieux historiques et les lieux d'intérêts créée pour promouvoir ce patrimoine riche et unique sont bénéfique. C'est le cas de la Paroisse Sanctuaire de la Señora de Gracia y de San Pedro Poveda par exemple, qui a été récemment réhabilité en musée troglodyte où il est possible de visiter des habitats troglodytes traditionnels et d'en apprendre plus sur l'histoire de l'émergence de ce quartier à Guadix et plus largement des habitats troglodytiques en Andalousie.

E. Perspectives et réflexions :

18. Pensez-vous que les maisons troglodytes pourraient répondre aux besoins modernes de logement, en particulier dans les environnements climatiques extrêmes ?

Oui complètement.

21. Recommanderiez-vous ce type d'habitat à d'autres personnes ? Si oui, pourquoi ?

Oui complètement. Personnellement, je ne retournerai jamais vivre dans une maison traditionnelle ou un appartement. Je n'échangerai ma cueva pour rien au monde.



Figure 229 : Vue de la façade de la maison de Anna dans le quartier troglodytique de Guadix.

Entretien N°7 : Gabriela, 81 ans, Guadix :

A. Contexte personnel et historique :

1. Pouvez-vous vous présenter brièvement et nous parler de votre parcours dans la vie ?

J'ai 3 filles. Je vis seule dans une cueva depuis que mon mari est décédé il y a plus de 20 ans.

2. Depuis combien de temps habitez-vous dans une maison troglodyte ?

Je suis né dans ce quartier des Cuevas de Guadix. J'ai grandi et vécu toute ma vie ici.

B. Architecture et aménagement :

8. Comment décririez-vous la répartition des espaces intérieurs ? Est-elle fonctionnelle pour votre mode de vie ?

Je dispose de 12 pièces dans mon habitat troglodytique.

9. Quels sont les avantages et inconvénients liés au fait de vivre dans une maison troglodyte en termes de confort et de fonctionnalité ?

J'apprécie davantage l'isolation phonique et thermique qu'offre un habitat troglodytique qu'une maison traditionnelle.

D. Dimension patrimoniale et sociale :

14. Quel lien entretenez-vous avec le patrimoine troglodyte local ?

Nous avons de merveilleux lieux à Guadix pour découvrir et en apprendre davantage sur la culture troglodytique en Andalousie et l'histoire du quartier de las cuevas de Guadix.
Nous avons par exemple le musée et centre d'interprétation troglodytique de Guadix.

E. Perspectives et réflexions :

20. Pensez-vous que les maisons troglodytes pourraient répondre aux besoins modernes de logement, en particulier dans les environnements climatiques extrêmes ?

Oui complètement.

21. Recommanderiez-vous ce type d'habitat à d'autres personnes ? Si oui, pourquoi ?

Oui complètement.

Le plaisir d'habiter la roche :

Au-delà d'une réticence au changement, les attitudes que nous venons d'apprendre vis-à-vis du fait de posséder et vivre dans un habitat troglodytique témoignent d'un réel plaisir à habiter la roche. Pour les troglodytes, en effet, habiter sous terre apporte une certaine sécurité psychologique et physique. S'y ajoute la sensibilité au bruit. De ce point de vue, l'espace troglodytique est idéal puisque parfaitement insonore aux bruits extérieurs, compte tenu des masses isolant les différents espaces de l'habitation.

Bilan des entretiens :

Les sept entretiens réalisés auprès d'habitants des villages troglodytiques de Guadix, Baza, Gorafe et Setenil de las Bodegas révèlent un ensemble de constantes architecturales, climatiques, sociales et culturelles qui permettent de dégager une image claire de la réalité contemporaine de l'habitat troglodytique andalou. Ces témoignages, issus de profils intergénérationnels et socio-culturels variés, convergent vers une même conclusion : l'habitat troglodytique constitue, aujourd'hui encore, une solution climatique et économique particulièrement pertinente pour faire face aux conditions extrêmes du sud de l'Espagne.

Un habitat ancré dans l'histoire familiale et transmis sur plusieurs générations

Une première dimension majeure qui ressort des entretiens est la forte continuité familiale associée aux *cuevas*. Patricia, Violeta, Antonio, Maria, Anna et Gabriela témoignent tous, à des degrés différents, d'un lien intime entre ces habitations et leur histoire familiale.
La plupart sont nés ou ont grandi dans une maison troglodyte ; d'autres, comme Rafael ou Antonio, y sont revenus plus tard, par choix ou par attachement au quartier.
Les cuevas apparaissent ainsi comme des héritages matériels et symboliques, transmis et transformés par les générations successives. Leur histoire est souvent celle d'un habitat modeste, agrandi au fil du temps au rythme des besoins familiaux, parfois entièrement reconfiguré pour répondre aux normes contemporaines.

Cette dimension patrimoniale vivante, profondément enracinée dans la culture andalouse, contraste cependant avec un manque flagrant de reconnaissance institutionnelle dans plusieurs villages, notamment Baza, Gorafe et Setenil, où les habitants constatent l'absence totale de politiques publiques de conservation.

Des performances climatiques exceptionnelles : un confort thermique unanimement reconnu

Tous les habitants interrogés soulignent la stabilité thermique remarquable des maisons troglodytes. Les températures intérieures oscillent en général entre 15 et 20 °C toute l'année, indépendamment des variations saisonnières et des extrêmes climatiques extérieurs, qui dépassent régulièrement les 40 à 50 °C en été. Cette inertie thermique est perçue comme l'atout principal de ce mode d'habiter : elle garantit un confort permanent, sans chauffage intensif ni climatisation, et procure une sensation de fraîcheur en été et de chaleur relative en hiver. À cela s'ajoutent des qualités secondaires mais essentielles : une isolation phonique quasi totale, un sentiment de protection grâce aux parois rocheuses de l'habitation.
Plusieurs habitants évoquent une atmosphère de calme et de retraite, difficile à retrouver dans les habitats urbains traditionnels.

Certaines limites sont toutefois évoquées : manque de luminosité naturelle, humidité saisonnière liée aux infiltrations d'eau, distribution en enfilade qui peut restreindre la flexibilité des espaces.

Une architecture adaptée mais contraignante : évolutive, robuste, mais peu flexible

Les aménagements décrits témoignent d'une architecture façonnée progressivement : tailles successives de la roche, ajouts de volumes construits (cuisines, salles de bain, entrées), normalisation progressive des revêtements de sol, installation de portes pour répondre aux besoins contemporains d'intimité. Dans les cas de Maria et d'Anna, propriétaires d'hôtels troglodytiques ou de maisons rénovées, ces transformations ont été nécessaires pour se conformer aux normes actuelles de salubrité, d'hygiène ou d'accessibilité.

Toutefois, les habitants rapportent les limites structurelles de cette architecture :

- impossibilité fréquente de percer des ouvertures zénithales,
- risque d'effondrement en cas de mauvaise taille,
- nécessité de recourir à un savoir-faire spécialisé aujourd'hui presque disparu,
- coût élevé des agrandissements.

L'habitat troglodytique apparaît ainsi comme un système robuste et durable, mais exigeant, nécessitant une connaissance fine des sols et des configurations rocheuses.

Une reconnaissance sociale contrastée : entre marginalisation et valorisation touristique

Les entretiens témoignent d'une tension entre deux réalités sociales. D'un côté, certains habitants, notamment Patricia, Antonio ou Violeta, décrivent une forme de marginalisation : quartiers éloignés des centres-villes, peu desservis, associés à des populations pauvres et à un manque de reconnaissance institutionnelle. Dans de nombreux villages, les cuevas sont encore perçues comme des logements anciens, vétustes ou dévalorisés.

D'un autre côté, Guadix offre un contre-exemple frappant : le développement des musées troglodytiques, la mobilisation des habitants, la création d'hôtels cuevas et l'essor du tourisme patrimonial ont contribué à revaloriser ces quartiers et à leur redonner une visibilité culturelle. Les touristes étrangers jouent un rôle important dans cette redécouverte et dans la reconnaissance internationale de ce patrimoine.

Un modèle d'habitat d'avenir dans un contexte climatique extrême

Tous les habitants interrogés, sans exception, considèrent que les maisons troglodytiques constituent une réponse pertinente aux enjeux contemporains du logement dans les zones à climat extrême. Leur stabilité thermique, leur faible dépendance énergétique, leur confort acoustique et leur capacité à offrir une qualité de vie élevée en font, selon eux, un modèle architectural sous-estimé mais prometteur.

Pour plusieurs habitants, cet habitat pourrait constituer une solution d'avenir pour les populations à faibles revenus, les régions désertiques ou les zones soumises aux canicules répétées. Certains mettent en avant le caractère économique de ces logements, souvent vendus à bas prix lorsqu'ils nécessitent des rénovations.

Conclusion générale : l'habitat troglodytique en Andalousie est un habitat performant, identitaire et durable, mais nécessitant une stratégie de préservation.

Les entretiens menés démontrent que l'habitat troglodytique andalou ne relève pas forcément un patrimoine vernaculaire ancien prêt à être laissé à l'abandon, il constitue plutôt un modèle

climatique et spatial astucieux, particulièrement adapté aux défis environnementaux contemporains. Les habitants rencontrés expriment un attachement profond à leurs logements, fondé autant sur le confort quotidien offert par la stabilité thermique et l'isolation que sur la valeur identitaire, familiale et culturelle de ces habitations.

Toutefois, la pérennité de ce mode d'habiter dépendra de plusieurs facteurs :

- la préservation des savoir-faire traditionnels ;
- la reconnaissance institutionnelle des cuevas comme patrimoine d'intérêt public ;
- la mise en place de politiques de rénovation et de réhabilitation ;
- l'accompagnement des habitants face aux contraintes structurelles et techniques.

Ainsi, loin d'être qu'un simple vestige du passé, l'habitat troglodytique andalou apparaît comme une solution architecturale durable, capable de répondre à la fois aux enjeux climatiques, énergétiques et sociaux contemporains. Les témoignages récoltés soulignent son potentiel comme modèle alternatif d'habitat dans les environnements extrêmes, tout en rappelant la nécessité de politiques ambitieuses pour préserver et réhabiliter ce patrimoine unique.

2.2 Adaptations au climat des habitats troglodytiques

2.2.1 Etudes de cas à l'international

2.2.1.1 Tableau comparatif des climats

Critères / Régions étudiées	Cappadoce (Turquie)	Andalousie (Espagne)	Sud de la Tunisie	Shensi (Chine)
Température moyenne annuelle	Environ 12-15 °C	Environ 16-18 °C	Environ 20-22 °C	Environ 13-15 °C
Été	Chaud, entre 25-30 °C	Très chaud, souvent 35-40 °C	Caniculaire, souvent > 40 °C	Chaud, autour de 30-35 °C
Hiver	Froid, souvent -5 à 5 °C avec neige	Doux, autour de 8-12 °C	Doux, entre 10-15 °C	Froid, autour de -5 à 5 °C
Ensoleillement annuel	Environ 2 700 à 3 000 heures	Très élevé, environ 3 000-3 300 heures	Extrêmement élevé, > 3 400 heures	Modéré, environ 2 000-2 500 heures
Précipitations annuelles	Environ 300-400 mm	Environ 300-500 mm	Faible : < 200 mm	Modéré à faible, environ 500-600 mm
Type de climat	Continental sec	Méditerranéen et semi-aride	Désertique chaud	Continental avec influences semi-arides
Humidité relative	Modérée, autour de 50-60 %	Faible, souvent autour de 40-50 %	Très faible, souvent < 30 %	Modérée à faible, autour de 40-50 %
Caractéristiques climatiques	Étés secs et chauds, hivers froids et neigeux	Étés longs, chauds et secs ; hivers doux	Étés torrides, très secs, nuits fraîches	Grandes variations saisonnières : étés chauds et humides ; hivers froids et secs
Vents dominants	Vents modérés, parfois des vents froids en hiver	Alizés méditerranéens chauds	Vent chaud et sec (sirocco), pouvant soulever des tempêtes de sable	Vents continental, chargés de poussière en été
Adaptation des habitats	Protection contre le froid hivernal et la chaleur estivale grâce aux roches volcaniques	Protection contre la chaleur estivale grâce à l'épaisseur des structures troglodytes	Adaptation pour maximiser la fraîcheur dans un environnement aride	Régulation thermique naturelle grâce à l'isolation des grottes en lœss

Bilan du tableau comparatif des climats des différents habitats troglodytes étudiées dans le monde

L'analyse des conditions climatiques des quatre régions (Cappadoce, Andalousie, sud de la Tunisie et Shensi) révèle que si ces territoires partagent tous des caractéristiques extrêmes et contrastées, chacun présente des spécificités qui ont joué un rôle dans le façonnement des formes d'habitats troglodytiques. Malgré la diversité des contextes, un point commun majeur apparaît : le recours à la roche comme enveloppe thermique constitue une réponse universelle aux contraintes des milieux soumis à des conditions climatiques extrêmes.

Des climats chauds et secs en été : un facteur déterminant du troglodytisme

Toutes les régions étudiées connaissent des étés chauds ou très chauds, ce qui justifie directement le recours à l'architecture souterraine.

- En Tunisie, les températures dépassent régulièrement les 40 °C, faisant du troglodytisme une protection indispensable contre la surchauffe.
- En Andalousie, les canicules atteignant 35-40 °C rendent les caves particulièrement efficaces pour garantir une fraîcheur constante.
- La Cappadoce et le Shensi présentent des étés plus modérés (30-35 °C), mais suffisamment intenses pour rendre utile l'inertie thermique de la roche.

Dans les quatre contextes, l'habitat troglodytique apparaît ainsi comme un refuge climatique passif, capable de maintenir des températures intérieures stables malgré les extrêmes estivaux.

Des hivers contrastés : du froid continental à la douceur méditerranéenne

Les différences climatiques se révèlent plus marquées en hiver :

- La Cappadoce et le Shensi connaissent des hivers froids, parfois neigeux, avec des températures pouvant descendre sous 0 °C. Ici, la masse thermique des grottes protège surtout du froid.
- L'Andalousie et la Tunisie présentent au contraire des hivers doux, où la régulation thermique sert davantage à conserver une chaleur résiduelle.

Cette opposition démontre la polyvalence thermique du troglodytisme, capable de répondre à la fois aux besoins de conservation de la chaleur (climats continentaux) et à la recherche de fraîcheur (climats désertiques ou méditerranéens).

Des niveaux d'ensoleillement et de précipitations qui renforcent l'intérêt du souterrain

Les habitations troglodytiques jouent un rôle essentiel dans la nécessité de se protéger des rayonnements solaires et du niveau d'ensoleillement :

- La Tunisie et l'Andalousie affichent des taux parmi les plus élevés d'Eurasie (jusqu'à 3 400 h par an).
- La Cappadoce présente un ensoleillement légèrement inférieur, mais toujours intense.
- Le Shensi, avec 2 000-2 500 h, est la région la moins ensoleillée, mais connaît des étés humides associés à des pics de chaleur.

Les précipitations, quant à elles, influencent la forme architecturale :

- Le sud de la Tunisie, extrêmement aride (< 200 mm), favorise des structures enfouies profondes, protégées des vents et des tempêtes de sable.
- La Cappadoce et l'Andalousie, avec environ 300-500 mm, présentent des environnements semi-arides où l'habitat troglodytique limite l'exposition aux vents et aux variations thermiques.
- Le Shensi, plus humide (500-600 mm), bénéficie particulièrement de la capacité du lœss à réguler la température et à pouvoir supporter des excavations stables.

Des types de vents et d'humidité qui modifient les stratégies constructives

Les vents chauds et secs du sud tunisien (sirocco) ou les bourrasques continentales du Shensi et de Cappadoce justifient l'ancrage des constructions dans la roche, protégées des phénomènes érosifs et des poussières. L'humidité varie aussi fortement :

- Très faible en Tunisie (< 30 %), elle impose des matériaux résistants à la dessication.
- Modérée dans les autres régions, elle permet une meilleure habitabilité mais peut créer des problèmes d'infiltration, plus marqués en Andalousie et en Cappadoce.

Une adaptation remarquable des habitats aux contraintes locales

Chaque région a développé une réponse architecturale spécifique, mais partageant le même principe : exploiter la masse thermique du sol ou de la roche pour stabiliser la température intérieure.

- En Cappadoce, la roche volcanique tendre permet de vastes réseaux souterrains protecteurs contre le froid et la chaleur.
- En Andalousie, l'épaisseur des *cuevas* assure un confort thermique face aux étés extrêmes.
- En Tunisie, la profondeur des habitations garantit fraîcheur diurne et stabilité nocturne.
- Dans le Shensi, les grottes en lœss offrent une isolation naturelle exceptionnelle.

Ces variantes témoignent d'une architecture vernaculaire capable de s'auto-adapter sans technologie moderne, en tirant parti des matériaux et des structures géologiques présentes localement.

Conclusion générale

L'analyse climatique comparée montre que malgré des environnements très différents, tous les territoires étudiés font émerger la même logique : habiter sous terre est une réponse universelle aux contraintes climatiques extrêmes. Les habitats troglodytiques se révèlent particulièrement performants dans la gestion de la chaleur, du froid, de l'ensoleillement et des vents, tout en offrant une solution durable, passive et écologique.

2.2.1.2 Tableau comparatif de la géographie et géologie

Dans l'architecture troglodytique, les formations géologiques et le caractère accidentel du terrain sont choisis comme architecture à part entière qui deviennent partie intégrante d'un projet.

Critères / Régions étudiées	Cappadoce (Turquie)	Andalousie (Espagne)	Sud de la Tunisie	Shensi (Chine)
Climat	Continental sec : étés chauds, hivers froids avec neige	Méditerranéen : étés chauds et secs, hivers doux	Désertique chaud : étés torrides, très faibles précipitations	Continental humide à semi-aride : étés chauds et humides, hivers froids
Températures moyennes	Étés : 25-30 °C Hivers : -5 à 5 °C	Étés : 35-40 °C Hivers : 8-12 °C	Étés : > 40 °C Hivers : 10-15 °C	Étés : 30-35 °C Hivers : -5 à 5 °C
Précipitations annuelles	300-400 mm	300-500 mm	< 200 mm	500-600 mm
Géologie	Formations volcaniques : tuf tendre érodé en cheminées de fée	Roches calcaires, sols argileux, montagnes et plaines fertiles	Argile compacte, sable, formations rocheuses semi-arides	Lœss fertile, plateaux calcaires, collines érodées
Relief dominant	Plateaux volcaniques : formations rocheuses sculptées par l'érosion	Montagnes (Sierra Nevada), plaines ondulées, vallées fluviales	Déserts, dunes, collines basses	Plateaux de lœss, montagnes, vallées fluviales
Caractéristiques géographiques	Paysages uniques avec cheminées de fée, vallées encaissées, étendues semi-arides	Riche diversité : montagnes, plaines, vallées fluviales et littoral	Étendues désertiques avec oasis, paysages arides	Paysages variés : plateaux fertiles, montagnes, vallées du fleuve Jaune
Ressources naturelles	Tuf volcanique, terres fertiles dans les vallées	Sols fertiles, oliviers, minéraux, agriculture	Sols arides, nappes phréatiques dans les oasis	Sols fertiles en lœss, grandes réserves d'eau dans le fleuve Jaune
Végétation	Faible : steppe, arbustes résilients	Méditerranéenne : oliviers, chênes-lièges, vignobles	Très faible : palmiers-dattiers, plantes résistantes au désert	Mixte : forêts tempérées, terres agricoles fertiles
Hydrographie	Faible : absence de grandes rivières	Présence de fleuves comme le Guadalquivir	Rivières intermittentes ou asséchées, oasis	Fleuve Jaune et grandes nappes phréatiques
Attrait visuel	Paysages sculptés	Combinaison de reliefs et campagnes verdoyantes	Étendues désertiques	Contrastes entre plateaux, vallées fluviales et montagnes escarpées

Bilan du tableau comparatif de la géographie et de la géologie des différents habitats troglodytes étudiées dans le monde

L'étude croisée des conditions géographiques et géologiques des quatre révèle que, malgré des contextes naturels radicalement différents, chacune dispose de caractéristiques morphologiques et géologiques propices à l'émergence d'habitats troglodytiques.
La diversité des paysages et des roches exploitées montre que le troglodytisme n'est pas lié à un milieu unique, mais à une rencontre entre contraintes climatiques et opportunités géologiques.

Une géologie favorable à l'excavation malgré des natures de roche très contrastées

Les quatre régions offrent des substrats rocheux permettant l'excavation, mais de nature extrêmement différente :

En Cappadoce, le tuf volcanique, tendre et stable, est le matériau idéal pour tailler des volumes complexes et durables. Il a permis la formation de vastes réseaux souterrains.

En Andalousie, les roches calcaires et les sols argileux, associés à des collines facilement creusables, ont favorisé l'émergence des cuevas à flanc de coteau.

Dans le sud de la Tunisie, l'argile compacte a permis le creusement de structures enterrées profondes autour de patios.

Au Shensi, le lœss, extrêmement friable mais étonnamment stable lorsqu'il est sec, constitue l'un des meilleurs matériaux pour l'habitat troglodytique, permettant la création de *yaodong* aux parois quasi verticales.

Cette diversité géologique montre que troglodytisme n'est pas dépendant d'un type de roche précis, mais d'un équilibre entre creusabilité, stabilité et inertie thermique.

Des reliefs variés mais toujours structurants dans la localisation des habitats

Le relief influence directement la morphologie des habitats :

Les plateaux volcaniques de Cappadoce et leurs formations sculptées ont généré un troglodytisme en falaises, cheminées et vallées érodées.

En Andalousie, les collines et vallons argileux, souvent en périphérie des villes, accueillent les cuevas creusées horizontalement.

Le sud tunisien, dépourvu de relief marqué, utilise des structures enterrées verticalement dans le sol, protégées du vent et du soleil.

Le Shensi, avec ses plateaux de lœss et ses vallées encaissées, combine deux types d'excavation : à flancs de collines et en puits verticaux.

Ainsi, chaque région développe une forme troglodytique adaptée à son relief, qu'il soit accidenté, ondulé ou entièrement désertique.

Des environnements plus ou moins fertiles qui influencent l'économie locale et la vie quotidienne

Les ressources naturelles de chaque région varient fortement :

La Cappadoce possède des vallées fertiles mais un environnement globalement semi-aride. L'Andalousie dispose de sols propices à une agriculture diversifiée. Le sol du sud de la Tunisie repose quasi exclusivement sur des oasis et des nappes phréatiques profondes. Le Shensi, quant à lui, traversé par le fleuve Jaune, bénéficie de terres parmi les plus fertiles d'Asie.

Ces conditions modifient profondément la relation au terrain : du troglodytisme agricole au troglodytisme de survie climatique.

Une hydrographie contrastée qui influence l'organisation des villages troglodytiques

Le Shensi, riche en ressources hydrauliques, permet des installations villageoises structurées autour de la vallée du fleuve Jaune.

L'Andalousie, traversée par plusieurs fleuves, a implanté ses cuevas dans des zones où l'eau restait accessible sans risque d'inondation.

La Cappadoce et le sud tunisien, à l'hydrographie très faible, ont utilisé le troglodytisme pour limiter l'évaporation d'eau et maximiser la protection contre la sécheresse.

Ainsi, les variations hydrologiques ont façonné des modes de vie distincts, depuis les communautés agricoles du Shensi jusqu'aux systèmes d'oasis du Maghreb.

Paysages et attraits visuels marqués, mais d'une grande diversité

Chaque région possède un paysage identitaire fort :

- La Cappadoce offre un décor sculptural unique.
- L'Andalousie combine plaines verdoyantes, montagnes et zones semi-arides.
- Le sud tunisien impose l'image d'un désert minéral, homogène et lumineux.
- Le Shensi présente de vastes plateaux coupés de profondes vallées fluviales.

Cette variété montre que le troglodytisme peut émerger dans tout type d'environnement et de paysages.

Conclusion générale

Le bilan géographique et géologique montre que l'habitat troglodytique naît de la capacité d'un territoire à offrir à la fois une roche creusable et un relief exploitable, mais aussi de la nécessité de s'adapter à un climat exigeant. Bien que les paysages, les formations géologiques et les ressources naturelles diffèrent largement entre la Cappadoce, l'Andalousie, le sud de la Tunisie et le Shensi, tous ces territoires démontrent que le troglodytisme constitue une réponse universelle, contextuelle et ingénieuse, façonnée par l'interaction intime entre terre et architecture.

2.2.1.3 Tableau comparatif des propriétés thermique et performances des différents types de roches des habitats troglodytiques des régions étudiées

Critères / Régions étudiées	Andalousie (Espagne)	Sud de la Tunisie	Cappadoce (Turquie)	Shensi (Chine)
Type de roche	Argile compacte et calcaire	Argile sableuse et grès	Tuf volcanique	Lœss
Conductivité thermique	Modérée à faible : entre 0,6-1,2 W/mK	Faible, environ 0,5-0,8 W/mK	Très faible, environ 0,4-0,6 W/mK	Faible, environ 0,3-0,5 W/mK
Inertie thermique	Élevée, capable de maintenir une température intérieure stable	Moyenne à élever, offre un bon tampon thermique	Très élevée, idéale pour réguler les variations de température	Modérée, suffisante pour des écarts thermiques modérés
Capacité isolante	Bonne, adaptée aux variations diurnes et saisonnières	Bonne, surtout pour résister à la chaleur intense	Excellente, offrant une protection maximale contre les variations extrêmes	Bonne, mais moins performante en conditions climatiques extrêmes
Résistance aux températures élevées	Très bonne, protège contre les fortes chaleurs estivales	Très bonne, efficace face aux températures > 40 °C	Excellente, conserve une température stable même sous des chaleurs extrêmes	Modérée, peut nécessiter des aménagements pour maximiser l'isolation
Capacité à conserver la fraîcheur	Très efficace grâce à l'épaisseur des murs en argile ou calcaire	Très efficace, exploite les propriétés naturelles des roches sableuses	Exceptionnelle, les propriétés du tuf offrent une fraîcheur durable	Bonne, mais dépend fortement de l'épaisseur et de l'aménagement
Adaptabilité au froid	Bonne, conserve une température modérée en hiver	Moyenne, mais offre une protection suffisante contre le froid	Excellente, le tuf conserve une chaleur suffisante en hiver	Bonne, mais nécessite parfois un renforcement thermique
Pérennité	Très durable, mais vulnérable à l'érosion éolienne	Durable, mais sensible aux tempêtes de sable	Très durable, peu sensible à l'érosion	Durable, mais le lœss peut être sujet à des glissements de terrain
Coût énergétique	Très faible, peu de besoins en chauffage ou climatisation	Très faible, le climat intérieur est naturellement régulé	Très faible, les propriétés thermiques du tuf réduisent la dépendance énergétique	Faible à modéré, nécessite parfois des ajustements pour améliorer le confort
Particularités	Bonne combinaison d'isolation et d'inertie thermique	Matériaux adaptés à des environnements désertiques extrêmes	Matériau idéal pour des conditions climatiques variables	Utilisé dans des climats continentaux, moins performant pour les variations extrêmes

Bilan du tableau comparatif des propriétés thermique et des performances des différents types de roches des différents habitats troglodytes étudiées dans le monde

L'analyse comparative des matériaux des différents habitats troglodytiques dans le monde révèle que, bien que les roches varient considérablement entre les régions (argile, grès, calcaire, tuf volcanique, lœss), toutes présentent une faible conductivité thermique et une inertie suffisante pour stabiliser et réguler les températures intérieures. Cependant, leurs performances ne sont pas équivalentes.

La Cappadoce se distingue nettement des autres régions grâce au tuf volcanique qui avec sa conductivité très faible et son inertie exceptionnellement élevée, offre les meilleurs résultats thermiques. Il garantit une fraîcheur durable en été et une chaleur conservée en hiver, ce qui en fait le matériau le plus performant pour les climats à forts contrastes.

L'Andalousie et le sud de la Tunisie disposent d'argiles et de calcaires offrant de bonnes capacités isolantes et une forte résistance à la chaleur. En Tunisie, ces matériaux permettent de maintenir des conditions de confort même sous des températures dépassant 40 °C, tandis qu'en Andalousie l'épaisseur des murs optimise l'inertie thermique dans un climat semi-aride.

Le Shensi, avec son lœss facilement excavable, présente de bonnes propriétés thermiques mais moins adaptées aux climats extrêmes. Bien qu'il assure une isolation correcte et une fraîcheur raisonnable, il nécessite parfois des aménagements supplémentaires pour améliorer la performance énergétique, notamment en hiver.

En résumé, toutes les roches étudiées permettent une réduction naturelle des besoins énergétiques, mais avec des degrés d'efficacité différents : tuf (Cappadoce) > argiles d'Andalousie et de Tunisie > lœss du Shensi. Cette hiérarchie montre que la performance thermique dépend autant de la nature de la roche que de son épaisseur, de sa mise en œuvre et du climat local.

2.2.2 Adaptations des habitats troglodytiques au climat méditerranéen et semi-aride en Andalousie

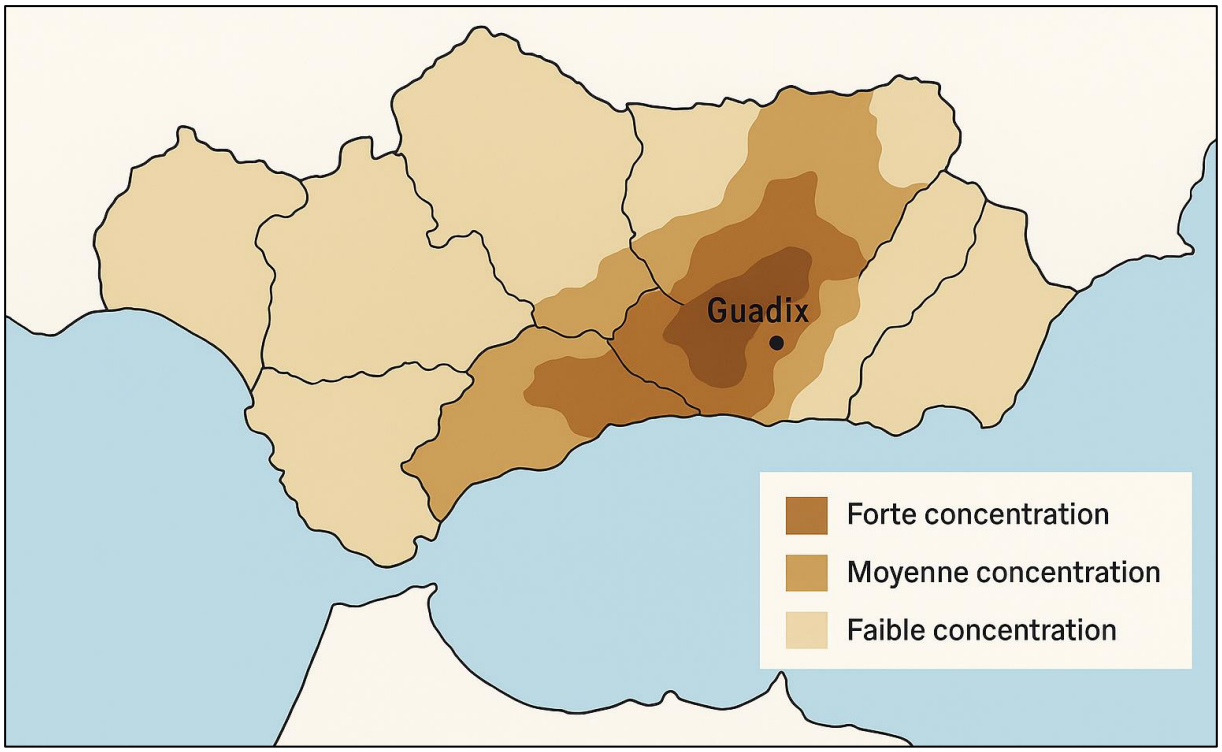


Figure 230 : Zone de forte concentration troglodytique en Andalousie.

2.2.2.1 L'influence des conditions climatiques en Andalousie sur le développement des habitats troglodytes

En Andalousie, les conditions climatiques méditerranéennes, marquées par des étés longs, chauds et secs avec des précipitations annuelles souvent inférieures à 300 mm dans les zones les plus arides, et des hivers doux, ont influencé le développement des habitats troglodytes. Ces habitations, creusées principalement dans des formations argileuses et calcaires, offrent une solution architecturale parfaitement adaptée à la gestion de ces extrêmes thermiques.

L'inertie thermique naturelle des matériaux locaux permet de maintenir une fraîcheur constante à l'intérieur des habitats troglodytiques andalous durant les mois d'été caractérisés par des températures estivales atteignant fréquemment 40 °C, tout en offrant une isolation suffisante contre les températures plus fraîches de l'hiver. Des températures stables, oscillant entre 18 et 22 °C, quelles que soient les conditions extérieures, permettent ainsi de réduire les dépenses énergétiques pour le chauffage ou la climatisation.

Ces habitats, souvent situés dans des zones rurales ou dans des collines escarpées, témoignent d'une maîtrise d'implantation avec l'environnement et une intense harmonie avec le paysage, combinant efficacité énergétique, durabilité et confort.

2.2.2.2 Les avantages de la régulation thermique naturelle des habitations troglodytes

Les habitations troglodytes, construites dans des cavités naturelles ou creusées dans la roche, présentent des avantages notables en termes de régulation thermique naturelle.
Leur conception unique offre une isolation thermique et une gestion de l'humidité remarquables, adaptées à divers climats.

Isolation contre la chaleur estivale

La roche comme isolant naturel :

Les parois des habitations troglodytes, composées de roche ou de terre, possèdent une forte inertie thermique. Cela signifie qu'elles absorbent lentement la chaleur extérieure et la diffusent tout aussi lentement, gardant l'intérieur au frais même par temps chaud.

Une température constante :

En été, la température à l'intérieur des habitations troglodytes reste inférieure à celle de l'extérieur, même sans climatisation. Cela s'explique par le fait que la masse rocheuse protège l'intérieur des fluctuations extrêmes de température.



Figure 231 : Intérieur d'un habitat troglodytique à Gorafe

Isolation contre le froid hivernal

Une protection contre le vent :

En hiver, les habitations troglodytes sont naturellement protégées des vents froids, grâce à leur structure enterrée ou semi-enterrée.

Conservation de la chaleur :

La roche emmagasine la chaleur produite à l'intérieur (par exemple, celle des feux ou des activités humaines) et la redistribue lentement, ce qui réduit les pertes de chaleur.

Des températures stables :

Contrairement aux maisons en surface, les habitations troglodytes andalouses bénéficient d'une température interne relativement stable tout au long de l'année, oscillant souvent entre 12 et 18°C en fonction de la profondeur et du matériau.



Figure 232 : Intérieur d'un habitat troglodytique à Setenil de las Bodegas

Gestion de l'Humidité

Une régulation naturelle :

La roche poreuse ou la terre utilisée pour les parois d'un troglodyte, peut absorber l'humidité en excès lorsqu'il y a une forte hygrométrie et la restituer lorsque l'air devient plus sec.

Prévention des moisissures :

Une bonne ventilation naturelle (par des cheminées ou des ouvertures soigneusement positionnées) aide à éviter l'accumulation excessive d'humidité, réduisant ainsi les risques de moisissures ou de problèmes liés à l'humidité.

Un effet de fraîcheur :

Dans les climats arides, la gestion de l'humidité améliore également la sensation de fraîcheur à l'intérieur en favorisant une légère évaporation.

Impact Écologique

Une réduction des besoins énergétiques :

Grâce à leur isolation naturelle, les habitations troglodytes nécessitent moins de chauffage en hiver et de refroidissement en été, ce qui diminue l'empreinte énergétique.

Des matériaux locaux :

Les habitations troglodytes exploitent des matériaux locaux, limitant l'impact environnemental lié à l'extraction et au transport des matériaux de construction.

Les habitations troglodytes offrent ainsi une solution architecturale écologique et efficace pour la régulation thermique et la gestion de l'humidité. Leur capacité à maintenir des températures stables et à gérer l'humidité naturellement en fait une option viable dans les régions aux climats extrêmes. Cette approche, combinée à des méthodes modernes d'amélioration de la ventilation et de l'étanchéité, pourrait inspirer des conceptions architecturales contemporaines soucieuses d'économie d'énergie et de durabilité.

2.2.2.3 Intégration paysagère et impact écologique réduit des constructions troglodytes

En Andalousie, les habitations troglodytes, souvent creusées dans des collines ou des falaises de terre argileuse, s'intègrent harmonieusement dans le paysage naturel. Leur construction ne nécessite pas de grandes modifications topographiques ni de matériaux importés, réduisant considérablement leur impact environnemental. En effet, ces habitations utilisent principalement des ressources locales, telles que la terre et la roche, limitant ainsi les besoins énergétiques liés à l'extraction et au transport de matériaux. De plus, leur faible emprise visuelle préserve le caractère naturel des paysages andalous, souvent dominés par des collines et des plaines semi-arides. En réduisant les perturbations environnementale, ces habitations troglodytiques favorisent une coexistence durable avec le site et le terrain dans lequel elles sont implantées en constituant un exemple d'architecture vernaculaire respectueuse de l'environnement.

Souple et travaillé, l'espace habitable d'un troglodyte n'est jamais pareil à un autre.
En effet, il est possible d'y établir des communications nouvelles entre les différentes pièces et étages après un effort d'excavation de la roche. On obtient ainsi un espace original propice aux économies de mobilier. *« Quoi de plus simple que de creuser quelques centimètres pour enfin avoir l'étagère dont on rêvait ! »*.



Figure 233 : Vue d'ensemble sur le quartier troglodytique de Guadix.

2.3 Etude de cas : caractéristiques architecturales des habitats troglodytes de Guadix et Setenil

2.3.1 L'évolution historique de l'urbanisme des villes de Guadix et Setenil

À Guadix, l'implantation troglodyte remonte à l'époque wisigothique et s'est intensifiée sous la domination musulmane entre le VIIIe et le XVe siècles. L'urbanisme de Guadix s'est développé autour de l'exploitation des grottes creusées dans les collines argileuses, devenant un symbole identitaire de la ville.

Après la Reconquista, au XVIe siècle, ces habitations troglodytes, souvent situées en périphérie du centre historique, ont permis de loger une population rurale importante tout en s'adaptant au climat aride de la région.

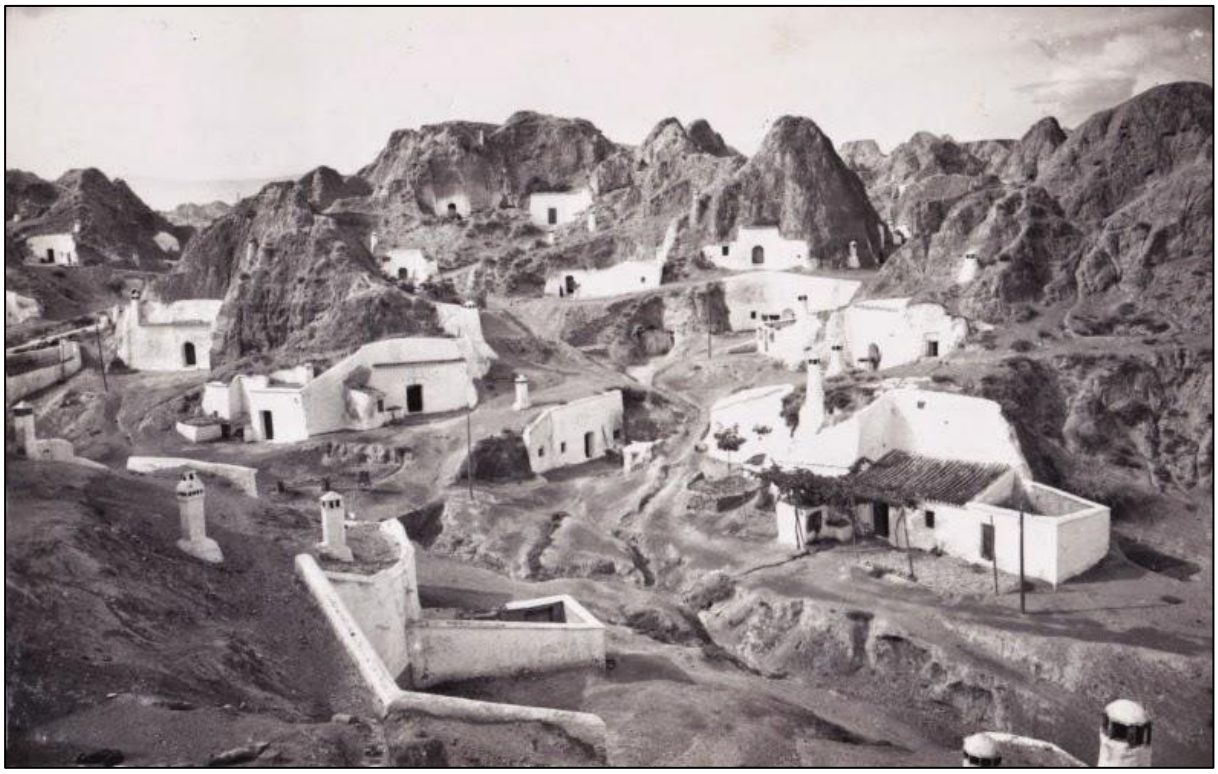


Figure 234 : Vue d'ensemble du quartier troglodytique de Guadix au XIX ème siècle
Souce : postalesantiguasdeandalucia.blogspot.com

À Setenil, c'est sous la domination almohade entre le XIIe et le XIIIe siècleslesque l'usage des cavités naturelles sous les formations rocheuses s'est généralisé pour la défense et l'habitat. Après la Reconquista, l'urbanisme troglodyte de Setenil s'est structurée avec des habitations et des commerces étant littéralement encastrés sous d'imposantes formations rocheuses au cœur de la ville. Cette configuration a été choisi pour maximiser l'utilisation de l'espace dans une vallée étroite en utilisant une protection naturelle.

Tandis que Guadix reflète une adaptation plus rurale et dispersée, Setenil illustre une symbiose entre architecture et environnement au sein d'un cadre urbain compact et dense.

2.3.2 Etude comparative des particularités architecturales dans chaque ville

Similitudes :

Adaptation au paysage :

Les deux villes intègrent leurs habitations troglodytes directement dans le paysage naturel, exploitant la topographie locale pour maximiser la protection contre les conditions climatiques. Les habitations sont semi-enterrées ou creusées directement dans la roche également pour minimiser leur impact visuel et harmoniser leur présence avec l'environnement naturel.

Utilisation des matériaux locaux :

À Guadix comme à Setenil, l'architecture troglodytique repose sur des matériaux disponibles localement. À Guadix, ce sont principalement des formations argileuses et calcaires, tandis qu'à Setenil, les habitations sont creusées sous d'énormes surplombs rocheux en calcaire. Ces matériaux assurent une excellente isolation thermique, essentielle dans ces régions aux variations de température marquées.



Figure 235 : Vue d'ensemble sur le quartier troglodytique de Setenil.

Différences notables :

Critères / Villages	Guadix	Setenil de las Bodegas
Matériaux utilisés	Roches argileuses et calcaires facilement creusables.	Surplombs rocheux de calcaires massifs
Organisation spatiale	Habitations principalement souterraines avec des ouvertures minimales pour la ventilation et la lumière.	Maisons construites sous des falaises rocheuses avec des façades exposées.
Interaction avec le paysage	Creusement dans des collines et des plateaux	Utilisation des formations rocheuses naturelles pour l'habitation troglodytique
Esthétique extérieure	Apparence sobre et intégrée au paysage, les ouvertures sont les seuls indices visibles des habitations troglodytes.	Maisons aux façades modernes mêlées à des surplombs rocheux imposants.
Fonctionnalité climatique	Optimisée pour l'isolation thermique en été comme en hiver grâce à l'épaisseur des parois argileuses.	Protection contre la chaleur directe grâce à l'ombre des surplombs mais plus exposée aux intempéries.

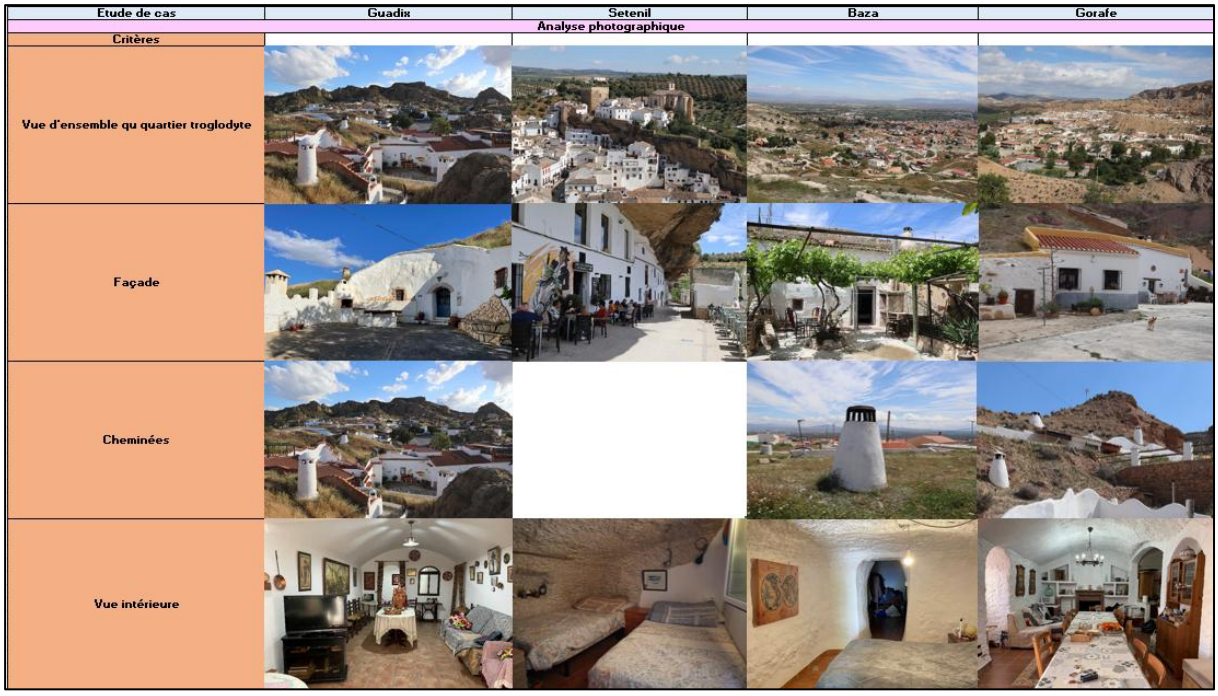
Bilan de l'étude comparative des particularités architecturales des villages troglodytiques de Guadix et de Setenil de las Bodegas

Les villages troglodytiques de Guadix et de Setenil de las Bodegas partagent une même logique d'adaptation au relief andalou. Dans les deux cas, l'architecture utilise la roche comme ressource naturelle : elle offre une isolation thermique remarquable, protège des fortes chaleurs estivales et façonne une identité locale mémorable. En effet, ces habitats intégrés au paysage témoignent d'une longue tradition d'ingéniosité humaine face à un environnement aride.

Cependant, les deux sites se distinguent nettement par leur forme et leur implantation.
À Guadix, les habitations sont de véritables grottes creusées dans des collines argileuses, formant un paysage ondulé marqué par des façades blanches et des cheminées d'aération émergeant du sol. À l'inverse, Setenil de las Bodegas s'organise autour d'un bâti construit sous d'immenses surplombs rocheux : les maisons ne sont pas creusées mais adossées au rocher, qui forme souvent le toit et une partie des parois. Cette différence se reflète également dans la morphologie urbaine : étendue à Guadix, dense et encaissée dans les rues étroites de Setenil. Ainsi, si les deux villages partagent d'un même principe d'adaptation, ils l'expriment selon des modèles architecturaux et paysagers très distincts ce qui permet d'affirmer que l'architecture troglodytique n'est pas propre à un unique type d'environnement, roche mais peut apporter une solution de logements résilients face aux climats extrêmes dans une multitude de sites et de topographie différente.

2.4 Généralités et extension à l'Andalousie : études de cas comparative des autres villages troglodytiques andalous

2.4.1 Analyse photographique



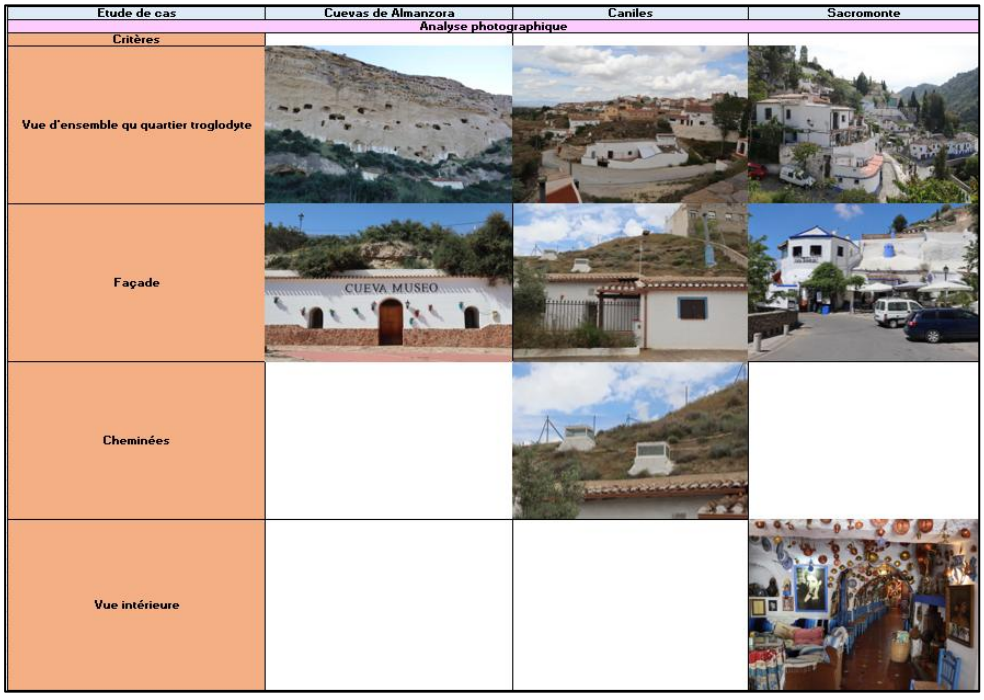


Figure 236 : Tableau d'analyse photographique des villages andalou étudiés

2.4.2 Entretiens avec des architectes et spécialistes travaillant sur l'architecture troglodytique en Andalousie

Pour voir les fiches d'entretien, questionnaire complet et les questions qui ont été posées aux différents spécialistes sur l'architecture troglodytique andalouse, se référer à l'annexe en fin d'ouvrage (p...)

Malheureusement, je ne suis pas assez resté de temps en Andalousie (9 jours) pour réussir à fixer des rendez-vous avec les architectes, les photographes et les sociologues avec qui j'étais en contact (Andrés Moreno du cabinet d'architecture Ummoestudio; Pablo Gil et Jaime Bartolomé du studio d'architecture GilBartolomé Architecture, David Vico – photographe et Jean-Pierre Liégeois – sociologue spécialisé sur les populations troglodytiques en Andalousie) car nous n'avons pas trouvé de créneaux de disponibilités en commun. Ce sera donc ici, un point à retravailler et à développer ultérieurement afin d'acquérir davantage d'expériences, de connaissances et d'informations sur notre sujet principal qui est : habiter sous terre : l'architecture troglodyte comme solution d'habitat face aux climats extrêmes.

2.5 Un habitat solaire passif extrême

Cette dénomination peut être adoptée pour désigner et qualifier l'habitat troglodytique andalou si l'on comprend bien son fonctionnement.

Le concept de « maison solaire passive » développe deux dispositions essentielles :
- l'inertie thermique de la construction que l'habitat troglodytique développe de façon importante, qui est recherchée pour des raisons de stockage de la chaleur ainsi que pour des raisons de régulation des échanges thermiques (captation, stockage, restitution).
- des dispositifs de captation liés à l'effet de serre

Dans une maison enterrée, l'inertie thermique de la structure est quasiment infinie puisque la masse des parois où pourra se faire le stockage est énorme. Cela signifie que la stabilité des températures dans le massif rocheux est importante, qui est l'une des caractéristiques du confort thermique. En effet, dans les grottes naturelles, la courbe des températures intérieures est constante et s'établit autour de 8°C à 9°C durant toute l'année (en Andalousie elle s'établit plus autour de 15°C à 20°C).

Ce niveau de température est bien entendu trop bas pour que l'on puisse habiter de façon continue une cavité. Mais celle-ci par son organisation et ses communications avec le climat extérieur (ouverture vers le sud, organisation du plan autour d'un puits-cout), peut être reliée à un environnement immédiat recevant 2 500 à 3 000 h d'ensoleillement par an, de ce fait, les performances climatiques et thermiques de l'espace souterrain en sont considérablement améliorées. De 9° C, sans apport de soleil (grotte naturelle), ce niveau d'équilibre passera de 16° C à 18° C et plus encore avec un apport de soleil, soit un gain de 7 à 9° C.

Cependant, si les configurations troglodytiques étudiées, par leur orientation, la protection aux pluies et vents et l'insertion physique dans des sites naturels réunissent les conditions nécessaires à un habitat bioclimatique, il leur manque ces organes de captation liés aux développements des matériaux modernes (verre en particulier).

Apporter cette adaptation d'éléments de captation est l'une des voies pour une réhabilitation-amélioration et également pour un développement contemporain de cette architecture troglodytique.

Partie III : Réponses aux défis climatiques contemporains : perspectives d'avenir de l'architecture troglodyte et adaptation aux normes modernes

3.1 Rénovation et réhabilitation des habitats troglodytes : enjeux et perspectives d'un concept ancien au goût du jour

3.1.1 Etat actuel du bâti : facteurs de dégradation, usure des matériaux, disparition des savoirs faire

L'état actuel du bâti troglodytique en Andalousie reflète une situation contrastée, mêlant préservation locale et fragilités croissantes. Dans des zones comme Guadix ou Setenil de las Bodegas, de nombreuses habitations sont encore occupées et entretenues, mais dans d'autres villages troglodytiques d'Andalousie, des ensembles troglodytiques souffrent d'un manque de maintenance régulière. En effet, leur intégration directe dans la roche les expose à des phénomènes naturels tels que l'érosion, l'humidité et les mouvements du terrain, qui fragilisent progressivement la structure des parois et des voûtes.

Les facteurs de dégradation sont multiples. L'humidité ascensionnelle ou infiltrée est l'une des principales causes d'usure : elle peut provoquer des fissures, l'effritement des surfaces argileuses et l'apparition de moisissures. Les variations de température, particulièrement marquées dans les zones semi-arides, accélèrent aussi les micro-déformations du matériau naturel. Par ailleurs, le manque de ventilation dans certaines grottes rend difficile la gestion de la condensation, aggravant encore les dégradations internes. Lorsque les habitations sont abandonnées, l'absence d'aération et d'entretien accélère nettement le processus de détérioration.

Un autre enjeu majeur est la disparition progressive des savoir-faire traditionnels.
Les techniques de creusement, d'étayage naturel ou de finition enduite, autrefois transmises de génération en génération, sont aujourd'hui moins pratiquées. Faute d'artisans spécialisés, les restaurations sont parfois réalisées avec des matériaux ou méthodes inadaptés, ce qui peut nuire à la stabilité du bâti troglodytique. Cette perte de compétences et connaissances fragilise la capacité des communautés à entretenir ces habitats de manière durable, menaçant à terme ce patrimoine troglodytique unique dont la pérennité repose autant sur la qualité du matériau naturel que sur la maîtrise de son entretien.

3.1.2 Analyse de projets de réhabilitation : succès et échecs

L'intervention sur l'ancien, réhabilitation ou restauration, représente aujourd'hui près de 60 % du marché du bâtiment.

La réhabilitation d'habitat troglodytique demande une bonne connaissance des spécificités juridiques, géologiques et architecturales du phénomène troglodytique. Durant de longues années, du XVIIIème au XIXème siècle, les populations cherchaient à fuir le mode de vie troglodytique qui était considéré comme indigne d'une société aspirant au confort et à la modernité. Désormais, certaines anciennes demeures souterraines sont aujourd'hui transformées en luxueuses résidences qui sont choisi comme lieu de vie principal ou maison secondaire pour les vacances ou la mise en location pour des particuliers.

On pourrait prendre comme exemple concret les habitations troglodytiques de Trôo (Loir-et-Cher) qui sont encore nombreuses et sont désormais très prisés profitant ainsi d'un grand programme de réhabilitation et réfection. En effet, le charme du village, les vues sur les bords et les plaines du Loir et l'idéal orientation au sud des habitats troglodytiques ont séduit de riches investisseurs qui souhaitent profiter d'un cadre original et agréable pour leur résidence secondaire.



Figure 237 : Cave des Mouret : Vue intérieur d'un habitat troglodytique de Trôo restauré alliant modernisme et conservation du patrimoine. Source Photo : Annie Brethon.

L'habitation troglodytique n'est concevable en « abri » de week-end ou « résidence secondaire » qu'à certaines conditions. En effet, il faut l'aménager de telle façon qu'elle ne souffre pas des absences prolongées d'occupation. Sa température constante (de 9°C à 13°C) la met, certes, à l'abri du gel mais non de l'humidité.

Parfois pour amener les politiques publiques et les acteurs locaux à agir et entamer des programmes de conservation, rénovation et réhabilitation d'habitats troglodytiques, les communes sont dans l'obligation d'ouvrir des lieux comme des musées troglodytiques afin de sensibiliser les populations et promouvoir ce mode d'habitat ancestral qui peut avoir un emploi contemporain très utile pour répondre aux problématiques de confort au sein des logements se positionnant dans des régions soumises à des conditions climatiques extrêmes.



Figure 238 : Musée Cueva de Cuevas del Almanzora (Andalousie) qui permet de découvrir la vie des troglodytes d'autrefois. Il possède un ensemble de caves modernisés et réhabilitées à des fins d'habitat.

3.1.3 Les défis administratifs et financiers de la réhabilitation des sites troglodytes

La réhabilitation des habitats troglodytiques pose d'abord des défis administratifs liés à leur statut particulier. Comme ces logements sont souvent anciens, partiellement enterrés et parfois situés dans des zones protégées, ils exigent des autorisations spécifiques et un dialogue complexe avec les services d'urbanisme, du patrimoine et de l'environnement.
Sur le plan financier, la principale difficulté réside dans le coût élevé des travaux adaptés à des structures troglodytiques. La consolidation de la roche, l'amélioration de la ventilation ou l'intégration de réseaux modernes (électricité, eau, assainissement) nécessitent des techniques spécialisées qui font augmenter le budget car les propriétaires doivent faire appel à des artisans formés pour ce type d'interventions.

Enfin, la mobilisation de financements publics peut être compliqué. Même si certaines collectivités proposent des aides pour préserver ces habitats emblématiques, les projets doivent entrer la plupart du temps dans des cadres précis comme la conservation du patrimoine historique et culturel. Les habitants se trouvent alors face à un équilibre fragile entre l'envie de moderniser leur logement, l'obligation de respecter des normes spécifiques et la capacité à financer des travaux coûteux.

Toutefois, les habitats troglodytiques bénéficient d'avantages financiers non négligeables.
En effet, le prix d'achat des habitats troglodytiques est souvent minime si l'on tient compte de la surface « habitable ». C'est que le troglodyte, aux termes de la loi, n'existe pas.
Le code de l'urbanisme et du logement est très précis sur ce point : il n'y a construction que s'il y a un toit ! Cette particularité juridique fait que sur les relevés du cadastre, les grottes taillées dans la roche n'apparaissent pas. L'acheteur d'un d'habitat troglodytique se retrouve très souvent acheteur d'une simple parcelle de terrain sur laquelle n'apparaît aucune construction.

Notons toutefois que cet avantage se transforme parfois en inconvénient lorsqu'il faut connecter la nouvelle habitation troglodytique, inexistante, aux réseaux électrique et des télécoms. Une fois ces petits problèmes réglés, les habitants propriétaires d'un habitat troglodytique n'auront aucun impôt à s'acquitter. En effet, combien paye-t 'on d'impôts pour une maison inexistante ?

3.2 Adaptation des habitats troglodytiques aux normes modernes

Les recherches contemporaines pour l'architecture troglodytique portent sur plusieurs préoccupations dont le rapport avec le paysage qui converge généralement vers un mimétisme architectural et les économies de dépenses énergétique. Les techniques constructives moderne vont donc tenter de trouver des solutions efficaces pour répondre à ces défis et améliorer davantage la qualité et le confort de vie au sein des habitats troglodytiques.

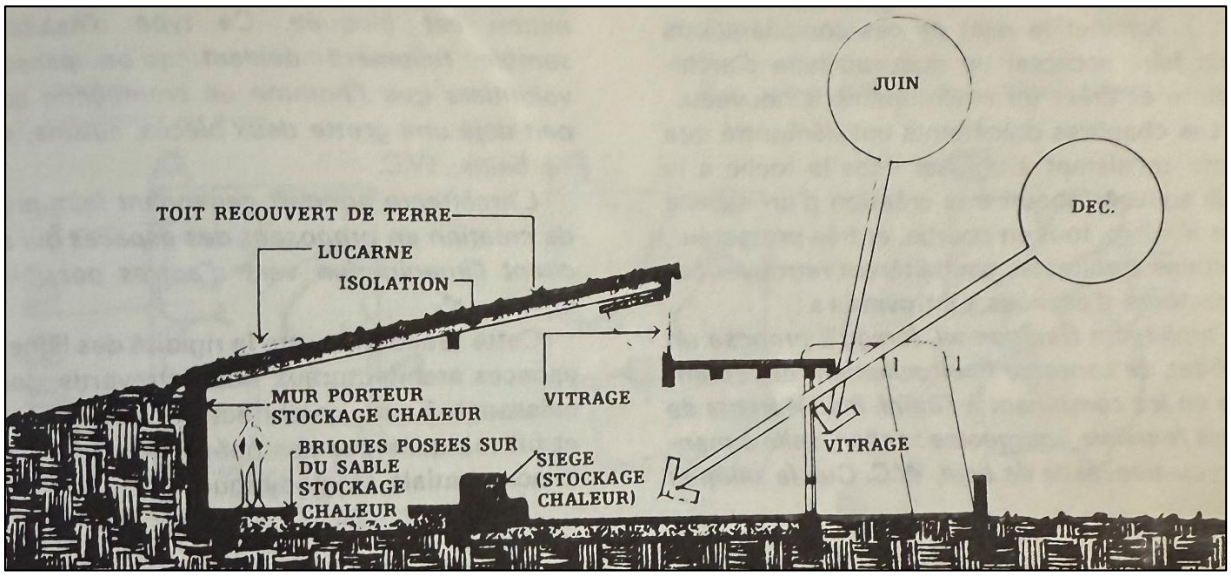


Figure 239 : « SUN - CAVE» - ARCHITECTE DAVID WRIGHT - SANTA FE - (NOUVEAU MEXIQUE).

Se fondant dans le paysage aride; la grotte ensoleillée est entourée de terre sur trois côtés la protégeant ainsi contre les vents froids et les tempêtes de neige. Les fenêtres sud, en retrait, permettent au soleil d'y pénétrer plus profondément.

C'est ainsi que va émerger une initiative scientifique à Minneapolis, dans les années 70, promue par l'Université du Minnesota. L'objectif est d'analyser les conditions d'habitat souterrain pour les installations industrielles et, surtout, pour les économies d'énergie. Sous la direction de Ray Sterling, le Centre élargit rapidement son champ d'action à l'architecture et à la préservation des paysages. En 1976, il publie la revue « Underground Space » et, en 1979, il synthétise ses recherches dans un ouvrage intitulé « Earth Sheltered Housing Design » (qui m'a beaucoup servi), conçu comme un manuel sur les aspects techniques, juridiques et méthodologiques de l'architecture troglodytique moderne. C'est aussi à Jean-Paul Loubes, Jean-Charles Trebbi et Nicole Charneau que l'on doit les premiers ouvrages destinés à promouvoir l'habitat souterrain, troglodytique et intégré au paysage.

L'Underground Space Center de l'Université du Minnesota a également fait des tests dans le cadre de divers projets. Parmi ceux-ci figure le Williamson Hall, la bibliothèque du campus universitaire, conçue par Myers & Bennett, qui est ainsi devenue un précieux laboratoire pour tester les effets, notamment psychologiques, des techniques de conception « underground » sur les populations.

À ce jour, ces travaux n'ont abordé que les grandes thématiques de l'urbanisme troglodytique, ils semblent néanmoins capables de rassembler le meilleur de l'héritage de Soleri et d'Utudjian. L'étude écologique qu'ils réalisent, en effet, ne se contente pas de résultats tels que le camouflage visuel ou l'isolation thermique, mais cherche à raviver des savoir-faire et des techniques qui avait été effacés de la mémoire collective.

En effet, d'anciennes valeurs psycho-spatiales sont examinées en les reliant à la recherche sur l'autonomie énergétique complète du bâtiment, obtenue non seulement grâce à des panneaux solaires ou des réserves de froid, mais aussi grâce à des outils « naturels » intégrés à l'organisme souterrain : orientation, circulation de l'air, nombre d'ouvertures et relations avec la végétation. Ainsi, en explorant de nouveaux contenus, ils envisagent une approche consistant à favoriser l'invention de nouvelles relations et de nouveaux outils afin d'améliorer les performances et les qualités de l'habitat souterrain.

Les architectes sont, les premiers, à s'emparer du sujet du renouveau des habitats troglodytiques pour répondre aux problèmes que subissent les habitats dans les régions soumises à des conditions climatiques extrêmes. En effet, à partir des années 70, la notion d'architecture intégrée au paysage fait son entrée en force dans les projets d'urbanisme urbain comme rural.

En effet, par exemple, énumérant les avantages de la néo-grotte industrialisée, Guy Rottier mentionne son projet Ecopolis (voir 2.3.2.2 dans les chapitres suivants) qu'il présente comme le nouveau modèle d'urbanisme à suivre.

Notons tout de même que Malcom Wells, est le premier architecte à promouvoir les maisons enterrées et sans aucun doute le premier à avoir eu l'idée de végétaliser les toits des maisons. Malcom Wells ne dessinera et ne réalisera au cours de sa carrière d'architecte, que des bâtiments souterrains ou recouverts de végétation utilisant l'énergie du soleil.

Nous présenterons ainsi quelques témoignages sur les travaux qui se sont développés pour la connaissance du patrimoine troglodytique existant (inventaires, relevés, mises en mémoire des formes et des techniques) et vers des recherches contemporaines intégrant les données actuelles de la problématique du logement dans les régions soumises aux climats extrêmes.

Avantages et inconvénients des habitats troglodytiques traditionnels :

Outre les qualités de confort thermique, les avantages de ce type de construction sont les suivants :

- adaptation à une grande diversité de terrain et de topographie, depuis les maisons-puits, adaptées aux terrains plats, jusqu'aux troglodytes latéraux, ou adossés, à flanc de falaise ;

- utilisation de terrains déclarés inconstructibles, car comportant une trop forte pente ;

- simplicité de construction : démarche soustractive, par enlèvement de matériau pour obtenir un volume en creux.

- construction réalisable en tous lieux sans apport de matériaux extérieurs. Cette qualité est très importante dans les pays où il n'existe pas de bonne desserte des zones rurales par un réseau de transport.

- coût de construction : réduit à la main d'œuvre locale, ce coût est faible. Les parties construites de l'habitat troglodytique (mur de façade) sont des ouvrages élevés à partir de matériaux locaux : pisé, adobe, torchis, bois ou brique cuite, laissant une part quasi nulle à des achats de produits importés ou manufacturés.

- isolement : la configuration en puits détermine des unités d'habitations organisées autour d'une cour centrale. La protection aux vents est quasi absolue. Il y a également une très bonne isolation phonique par rapport au voisinage même dans le cas d'un tissu d'habitations très rapprochées. En effet, chacun sait que l'isolation phonique est en fonction de la masse des matériaux. La terre ayant une masse gigantesque, son pouvoir d'isolation est important.

Les inconvénients des habitats troglodytiques que l'on peut relever sont les suivants (nous reprenons ici les points négatifs notés par les habitants eux-mêmes dans les études de cas que nous avons réalisées dans les villages troglodytiques andalous) :

- souvent une insuffisance d'habitabilité: c'est le cas des maisons creusées latéralement, la plupart des paysans modestes ne possédant qu'une ou deux « cellules » d'habitations (3,50 à 4 m de large, 5 à 7 m de long).

- l'humidité y est parfois dénoncée, essentiellement en saison chaude (hygrométrie élevée de l'air) où la condensation sur les parois froides de la grotte se produit ;

- l'insuffisance de ventilation : directement liée à l'inconvénient précédent, la faible circulation de l'air obtenue par les ouvertures concentrées sur un seul des quatre côtés de la pièce ne permet pas d'éliminer la formation d'humidité ;

- infiltrations en plafond : certaines pierres tel que le lœss sont perméables et ne permettent pas de mettre en culture le sol au-dessus de la maison creusée (nécessité d'arrosage des cultures). Cet inconvénient n'est pas négligeable dans des zones rurales où l'économie repose uniquement sur la mise en valeur des parcelles cultivables.

L'amélioration des performances thermiques des maisons creusées :

Les deux expérimentations présentées ci-dessous visent à exploiter au maximum les caractères positifs que nous venons de décrire et simultanément à réduire les inconvénients exposés.

Ainsi, on vise à :
1) augmenter les niveaux de température l'hiver à l'intérieur des habitations creusées ;
2) améliorer la ventilation des pièces ;
3) résoudre le problème des infiltrations d'eau pour rendre cultivable le « toit » du troglodyte.

• *L'expérimentation de l'Institut de recherche sur les énergies naturelles de Lanzhou (Gansu, Chine) (à Lanzhou l'ensoleillement annuel sur un plan horizontal est de 141 Kcal/cm²) :*

L'expérimentation reprend les types d'habitations troglodytiques répandus dans cette région : pièces creusées autour d'un puits carré central. La construction expérimentale comprend :
- une cour centrale de 14 m x 10 m, ensoleillée, dans laquelle se trouvent un cuiseur solaire et un chauffe-eau solaire ;
- deux pièces principales creusées dans le côté nord, donc exposées au sud ;
- la cuisine, salle de bains, toilette et cellier-réserve, occupent les côtés latéraux de la cour (est et ouest) ;
- l'accès à l'habitation se positionne frontalement aux pièces principales.

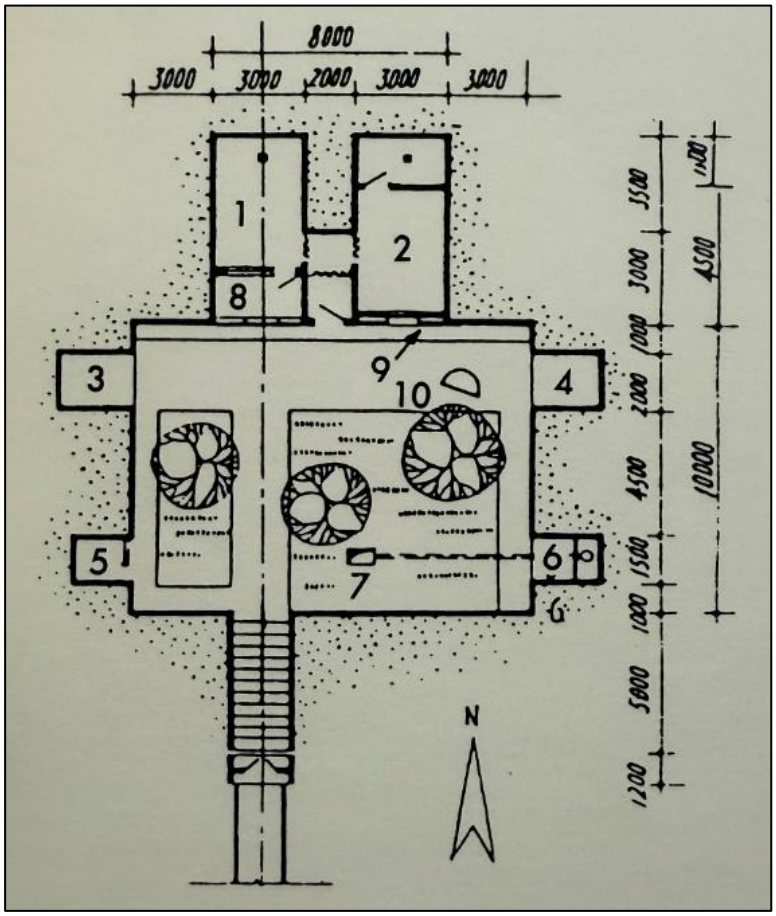


Figure 240 : Plan de la maison solaire creusée expérimentale de Lanzhou. 1 : séjour - 2 : chambre - 3 : cuisine - 4 : cellier – 5 : toilette - 6 : salle de bain - 7 : puits de drainage – 8 : serre - 9 : mur capteur à air - 10 : cuiseur solaire.

Isolation : Elle est améliorée par les dispositions suivantes : double vitrage pour les portes et fenêtres des deux pièces principales ; les parois opaques des murs sud de ces pièces sont en ossature bois, avec un remplissage de laine minérale ; la nuit, de lourds volets de coton occultent les portes et fenêtres ; afin de réduire les entrées d'air extérieur dues aux vents, la porte extérieure distribue un espace tampon, qui assure également une communication des deux pièces sans passer par l'extérieur. On voit ici une amélioration du plan de type traditionnel induite par une réflexion sur la thermique.

Chauffage : Une serre est adossé au séjour associé à des parois internes de forte inertie, un dispositif connue de captation solaire. Dans la serre, le sol et les murs sont colorés d'une couleur sombre pour accroître leur absorptivité. Entre la serre et le séjour, un orifice de ventilation au sommet de la cloison permet d'améliorer la thermocirculation de l'air.
La chambre est chauffée en gain direct de chaleur et par le collecteur d'air constituant tout le mur sud.

Climatisation – ventilation : A Lanzhou, il n'y a pas nécessité de climatiser les maisons l'été, en revanche, la différence de température entre la paroi sud (chaude) et nord (froide) des pièces peut créer un certain inconfort pour les habitants. Les collecteurs d'air sont donc occultés par des stores l'été. En même temps, deux « cheminées solaires » en métal noir (une par pièce) sont disposées à l'arrière des cavités, aspirant vers l'arrière le flux d'air chaud. L'écart de température des parois nord et sud est ainsi réduit, en même temps que l'humidité est combattue.

Etanchéité : Au-dessus des caves, à 1,30 m de la surface du sol, un film plastique assure une étanchéité aux eaux d'infiltrations, rendant ainsi le sol cultivable.

Les relevés de température d'air intérieur et extérieur réalisés en janvier et septembre, sans chauffage auxiliaire, montrent la bonne stabilité thermique de l'habitat trogloytique.
En septembre, sur 10 jours, la fluctuation des températures extérieures se situe dans un écart de 17° et seulement de 4,4° pour la température intérieure. Sur dix jours en janvier, l'écart maximum des variations journalières est de 20° C à l'extérieur et de 3° C seulement à l'intérieur.

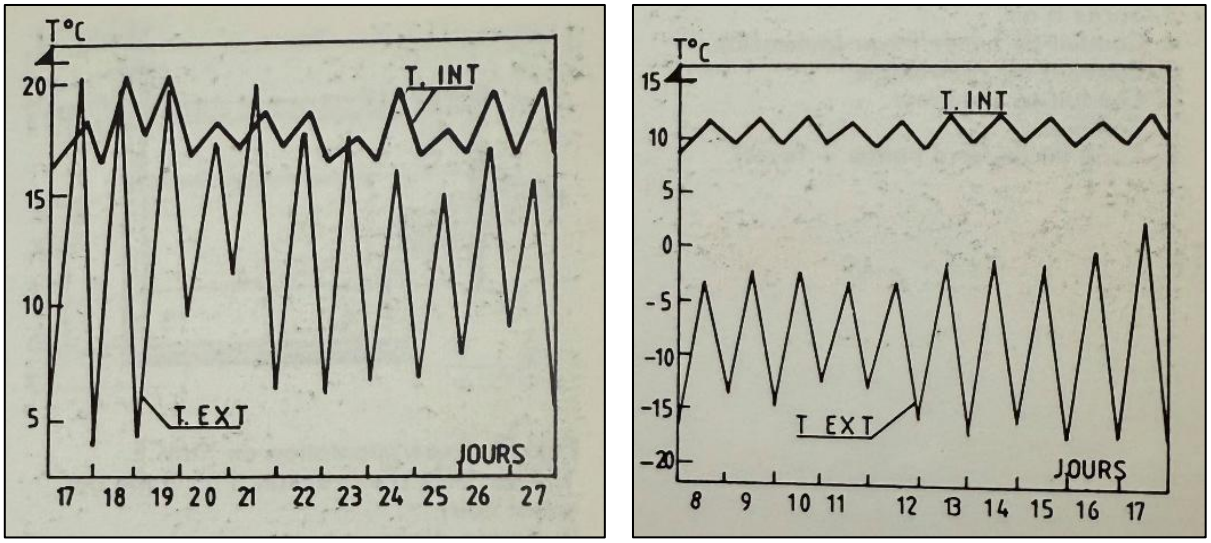


Figure 241 : Deux séquences de mesures de température d'air en septembre (été) et en janvier (hiver) pour l'expérimentation de l'Institut de recherche sur les énergies naturelles de Lanzhou sur un prototype de maison creusée.

• L'expérimentation du laboratoire de physique du bâtiment du Xian Institute of Metallurgy and Construction Engineering :

L'équipe du professeur Xia Yun mène simultanément des recherches sur les améliorations à apporter aux troglodytes traditionnels et sur les développements possibles d'une architecture troglodytique contemporaine. Une habitation troglodytique latérale de la région de Xian (Chine) a permis d'évaluer l'intérêt de plusieurs améliorations.

La coupe montre les principales corrections apportées : augmentation considérable de la surface d'apport direct en façade sud ; « cheminée solaire » reliée à une ventilation intérieure ; étanchéité du toit aux infiltrations pour une futur mise en culture.

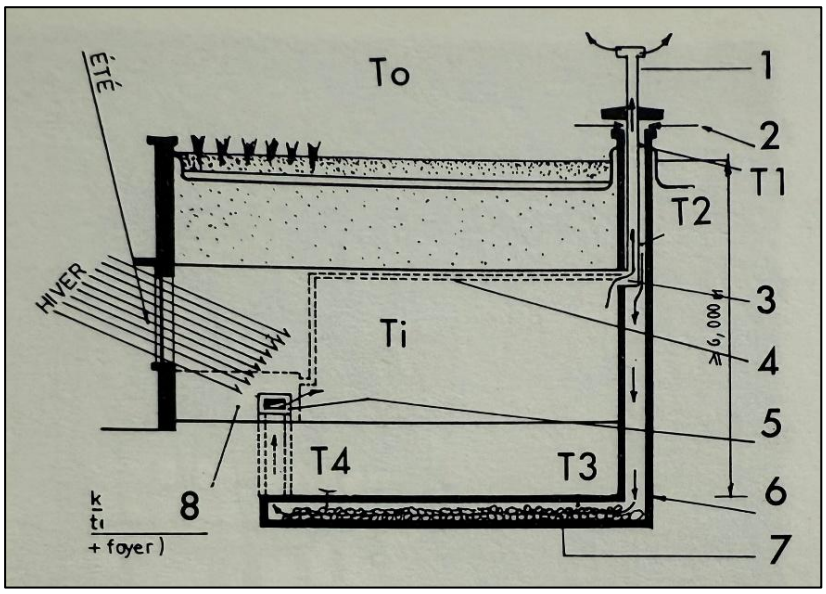


Figure. 242 :
Expérimentation du XIMCE.
1. Cheminée d'extraction d'air (tube de métal noir).
2. Entrée d'air.
3. Sortie d'air.
4. Conduit de fumée (hiver seulement).
5. Entrée d'air contrôlable.
6. Conduit air extérieur.
7. Cailloux.

La figure 6 indique les résultats obtenus par ces améliorations.

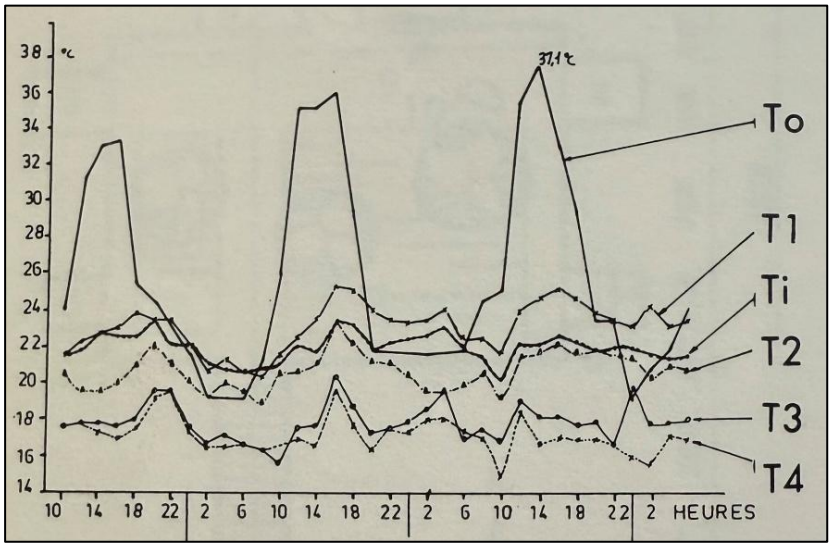


Figure 243 :
Expérimentation du XIMCE.
To : Température extérieure.
Ti : Température intérieure.
T1, T2, T3, T4 : Température d'air en différents points du conduit de ventilation.

Nota : Trois personnes occupaient la maison creusée pour procéder aux relevés de température. Le

Les deux exemples présentés montrent l'intérêt d'une recherche qui ferait évoluer le troglodytisme vers un meilleur confort en optimisant une configuration architecturale déjà performante en corrigeant certain défauts. Les moyens mis en œuvre sont ici essentiellement un travail sur la physique des matériaux et l'approfondissant de la connaissance des transferts d'énergie en jeu dans l'habitation, privilégiant les systèmes passif de captation solaire et de stockage. Mieux qu'une réhabilitation à grand renfort de technologies sophistiquées, c'est par une démarche agissant sur des dispositions constructives et architecturales que la continuité et le développement des troglodytes contemporains sera assurée.

3.2.1 Les technologies modernes mises en place pour le troglodytisme contemporain

3.2.1.1 Les coques enterrées et/ou recouvertes

Les coques réalisées sur place

Une coque présente un ensemble continu murs / toit et résiste ainsi d'un bloc aux différentes pressions d'un terrain. Cette continuité est également une meilleure garantie contre les fissures car elle présente moins de points, d'angles ou de liaisons faibles au sein d'une structure.
Une autre raison de s'intéresser au coques tient à leur économie en matériaux.
La coque apparait donc comme une solution structurelle très intéressante et adaptée pour la construction des habitats enterrés contemporains.

Différents projets prototypes d'architecture contemporaine à partir de coques non préfabriquées ont ainsi vu le jour. C'est le cas du projet « Clark Nelson House » de Michael Mc Guire, conçu en 1972 à River Falls dans le Wiscousin. Dans ce projet, il utilise des voûtes métallique qui définissent deux grands volumes (un espace commun et un espace privé) relié par un bloc sanitaire. L'intérieur de cet ensemble est recouvert de polyuréthane projeté formant l'isolation et la finition des parois de l'habitat troglodyte. C'est une structure très économique en matériaux et en coût.

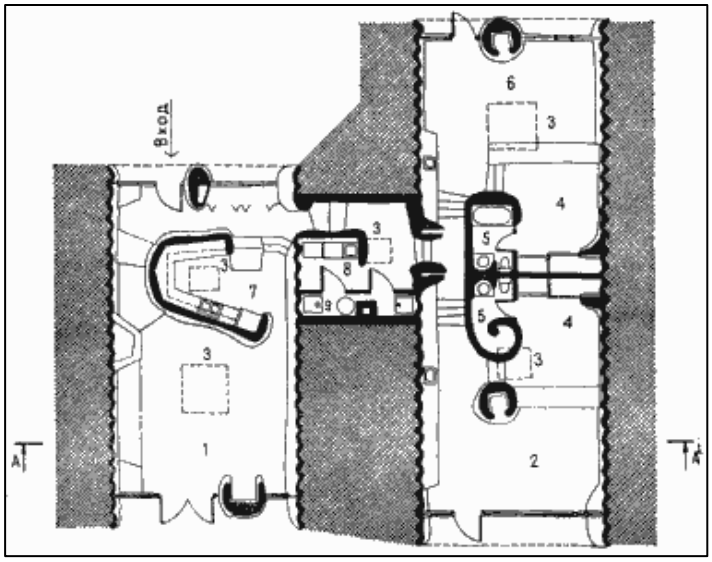
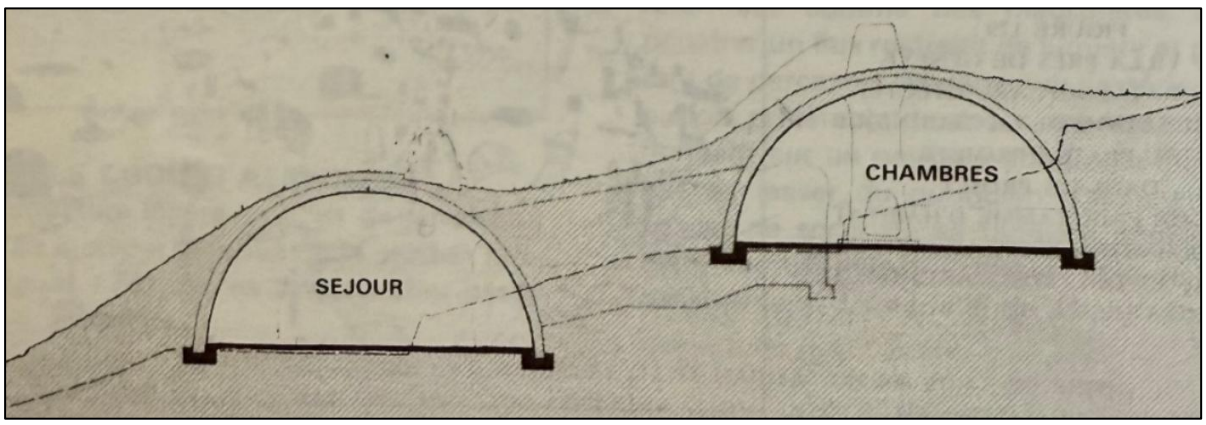


Figure 244 : Clark-Nelson House, River Falls (Wiscousin), Michael Mc Guire, 1972. Plan d'étage et coupe transversal
Source : mensh.ru



Un autre exemple digne d'intérêt de projet utilisant une coque réalisée sur place pour la structure principale d'un habitat enterré est illustré par la « Dune House » de William Morgan, construite en 1975 à Atlantic Beach en Floride dans une dune de sable de 4.92 mètres de hauteur. Cette maison est en réalité deux appartements duplex symétriques constitués d'une coque recouverte de 70 cm de sable et de gazon afin de préserver le caractère naturel de la dune. L'habitat se prolonge par une terrasse dont la vue donne sur l'océan Atlantique.
Le procédé constructif et structurel utilisé dans cet habitat enterré est basé sur la théorie qu'une fine peau courbée, telle qu'une coquille d'œuf, distribue uniformément les charges.

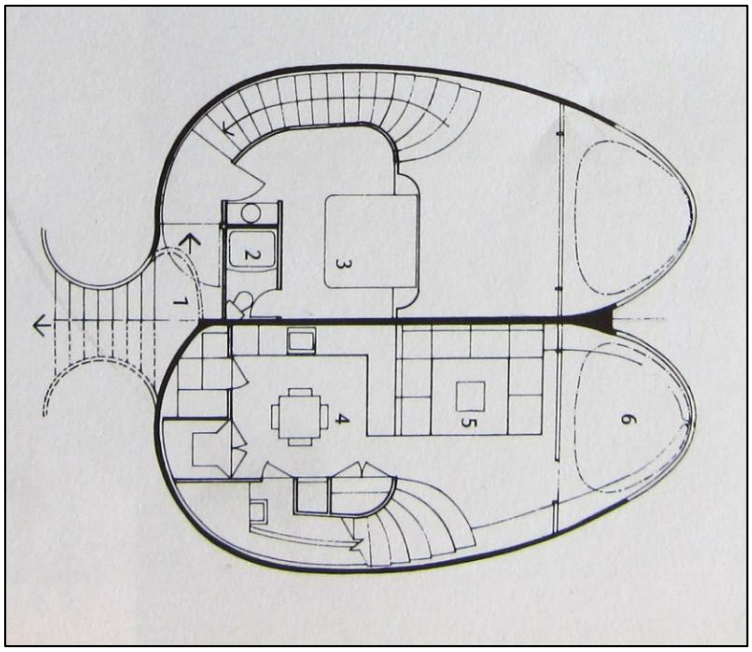
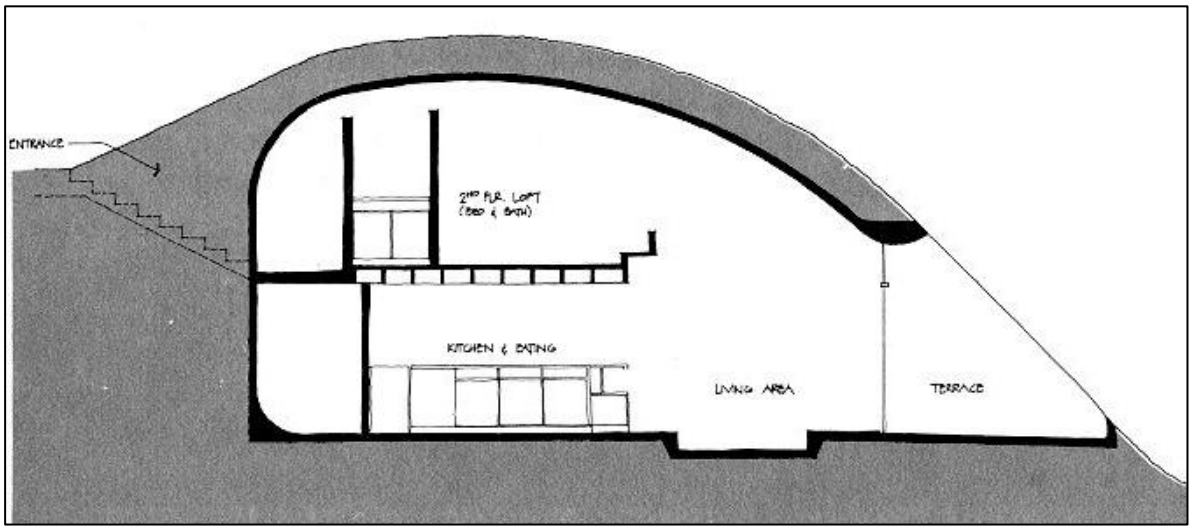


Figure 245 : Dune House, Atlantic Beach (Floride), William Morgan, 1974. Plan d'étage et coupe transversale
Source : habitat-bulles.com



Un dernier projet d'architecture enterrée utilisant une coque non préfabriquée pour sa structure, intéressant a étudié, est interprété par l'un des projets des comités de Malville qui ont décidé de construire un centre d'expérimentation des énergies alternatives.

Dans celui-ci, la coque y est posée sur une fondation classique, percée de deux ouvertures au sud et sud-est protégées par des casquettes. Le chauffage de l'habitat utilise les fenêtres et la serre comme capteurs solaire. La nuit, des volets isolants viennent occulter les surfaces vitrées par l'extérieur. Un épais mur de terre sépare la serre de la pièce principale, autant pour résoudre des problèmes de surchauffe que d'éblouissement. La masse thermique régulant les écarts de température interne, est ainsi fournie par ce mur, la masse de terre au sol (isolée) plus une épaisse couche de tourbe posée sur la coque. Séparée de la terre végétale par un film de plastique armé, elle maintient une teneur en eau qui lui permet de garder en tous temps des qualités isolantes.

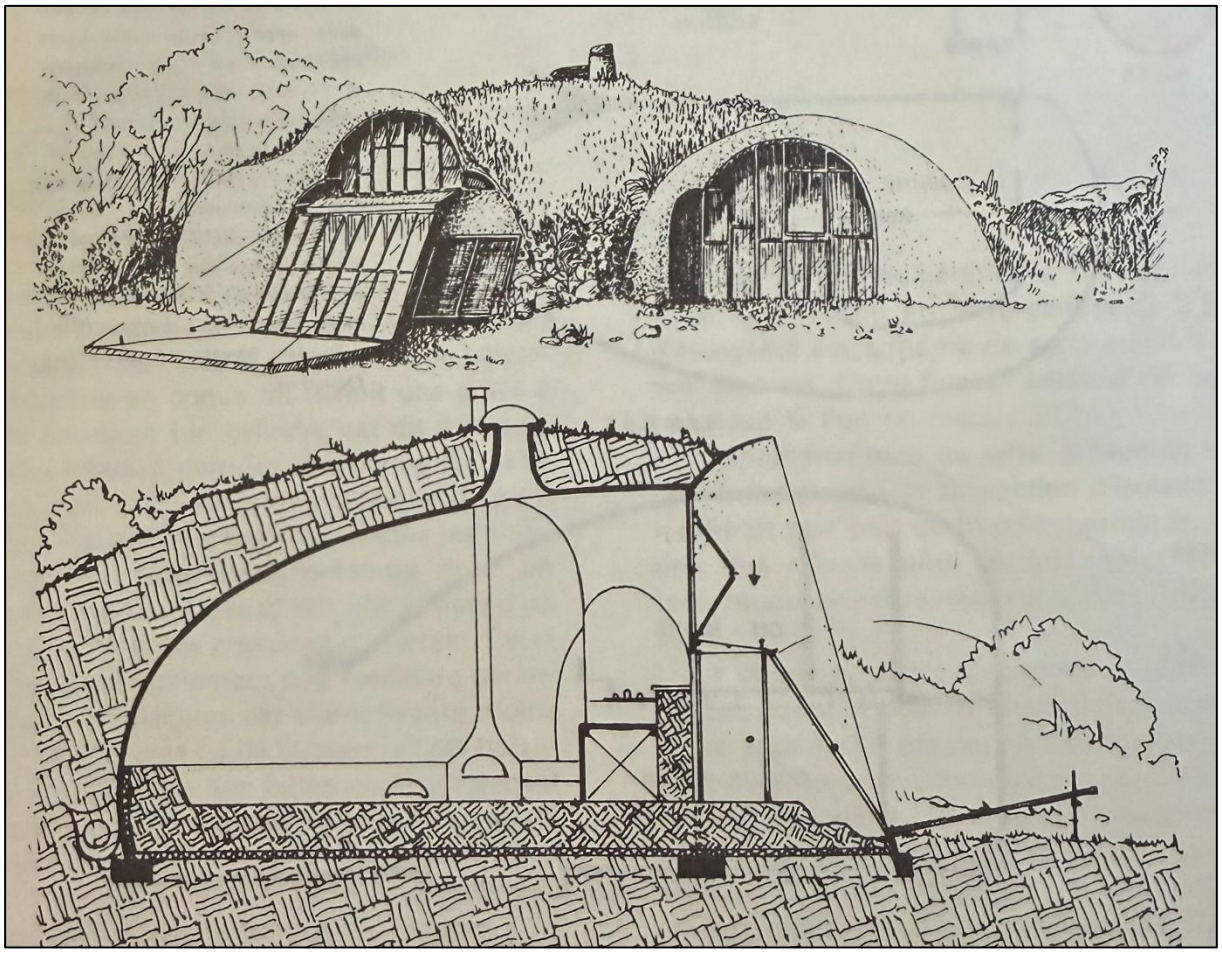


Figure 246 :
Façade sud en axonométrie et coupe transversale d'un projet de coque recouverte de tourbe et de terre à Malville (France).

Les coques préfabriquées montées sur place

Un peu plus tard, d'autres systèmes constructifs sont apparu dans le but d'un perfectionnement du principe de coques structurel pour l'architecture enterré. Certains architectes pionniers ont ainsi mis en avant le système de coques préfabriquées afin de réduire considérablement les délais de construction. Le projet « tortue » de G. Dufayard et G. Vacheret propose un tel système constitué d'éléments métalliques galvanisés. Un flocage intérieur de 3 cm renforce l'isolation thermique et phonique. Un polyane et un feutre d'étanchéité protège également la coque.



Figure 247 : Projet « tortue » de G. Dufayard et G. Vacheret architectes.
Proposition pour un habitat enterré économique adapté au tourisme et utilisant des techniques simples : éléments préfabriqués et terrassement.

Dans le même esprit, J.P. Brisson, J.C.Renaudet, J. Gourvellec et J.P. Luquot proposent, avec leur habitat « tub », des espaces limités par des buses multiplaques. L'inconvénient de ces techniques est la stéréotypie des espaces engendrés. On est loin de l'originalité engendrée par les coques en béton projeté.

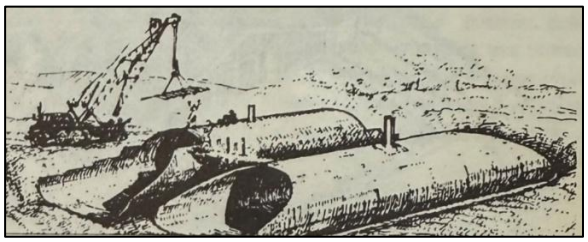




Figure 248 : « Habitat tub » des architectes - J.P. Brisson - J.C. Renaudet - J. Gourvellec - J.P. Luquot.
Volume constitué de buses industrialisées fermées aux extrémités par des baies vitrées éclairant un séjour donnant sur une terrasse. L'espace central est réservé aux chambres et sanitaires.

3.2.1.2 Paramètres pour les habitations enterrées

On s'enterre pour s'isoler thermiquement et phoniquement. On prend un soin minutieux pour choisir l'orientation par rapport aux points cardinaux, au vent et au soleil, car celui-ci combiné avec l'inertie thermique de la terre, peut procurer l'énergie nécessaire à l'ensemble d'un habitat troglodytique et l'économie de cette dernière. C'est pour cela que le choix du terrain pour ce type de construction est très important. Voici ci-dessous des exemples de projets d'habitats enterrés en terrain plat qui apportent des solutions aux défis posés précédemment.

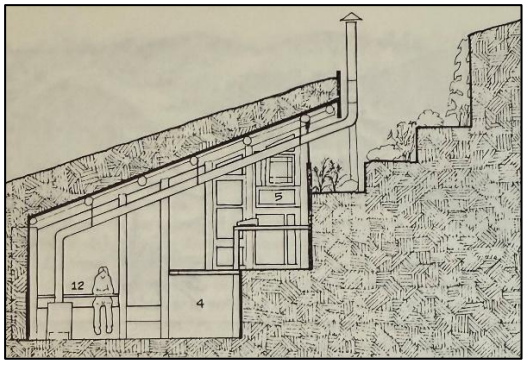


Figure 249 : Coupe de l'habitation «$ 500 House» de Mike Oeller à Bonners Ferry dans l'Idaho (USA).

Schéma type d'habitation semi-enterrée contrairement à la pente naturelle du terrain.

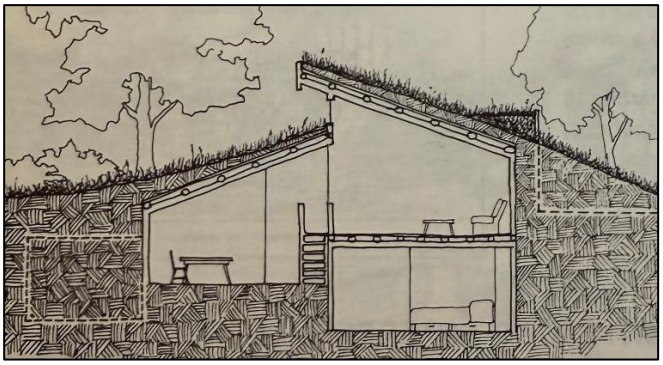


Figure 250 : Coupe d'un projet enterré en terrain plat.

Frank Lloyd Wright définissait lui-même les avantages des talutages de terre. Ceux-ci formant un bon isolant contre les intempéries, permettant la préservation du paysage environnant et une économie par non-traitement des finitions des murs extérieurs sous les appuis des fenêtres hautes. Dans le projet pour une cité coopérative près de Détroit qu'il conçut en 1971, il créa des portes à faux de toiture afin d'éloigner les eaux de pluie des talus, évitant ainsi une pression de l'eau sur les murs. Bien qu'économique et adapté aux hivers rigoureux, ce projet ne fut jamais réalisé.

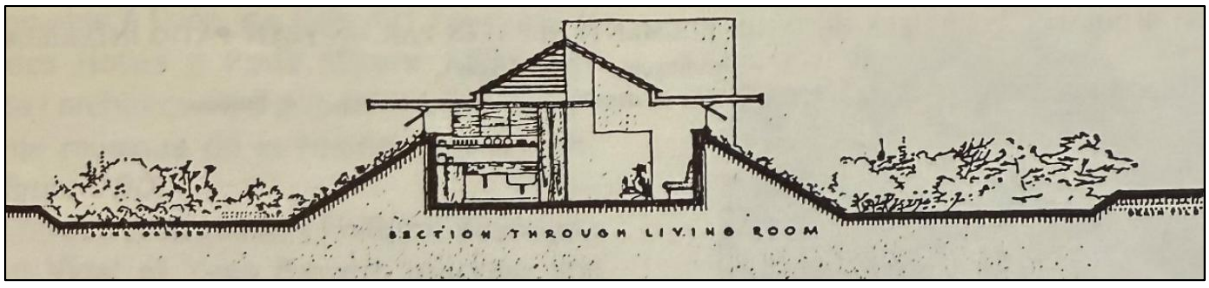


Figure 251 : Coupe transversale du projet Cooperative Homesteads de Frank Lloyd Wright à Détroit, Michigan (USA), 1971.

Un autre projet de Frank Lloyd Wright est intéressant a étudié par rapport à l'intégration d'un habitat dans un talus de terre représenté par « l'Hemicycle Solar House ». Enterrée au nord, cette maison possède deux niveaux. La forme en demi-cercle de son enveloppe constitue une protection latérale aux vents, et détermine une terrasse ensoleillée au sud. La construction est en pierre et bois.

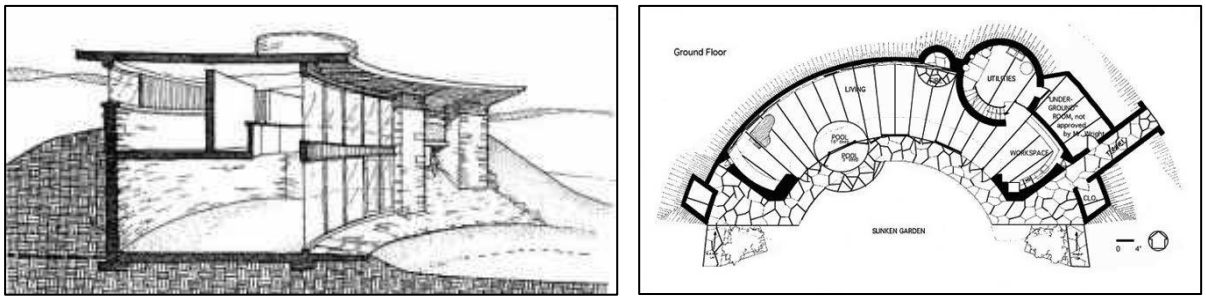


Figure 252 : Hemicycle Solar House de Frank Lloyd Wright à Madison (Wiscousin), 1942.

Le choix de l'implantation d'un habitat troglodyte

Le choix du lieu d'implantation d'un habitat troglodyte est important. Selon Malcolm Wells, le meilleur terrain pour ériger une telle habitation serait constitué par un terrain un peu pentu orienté au sud car les rayons solaires y pénètreraient bien à l'intérieur et le drainage serait facile à effectuer. D'autre part, un terrain vallonné offre différentes possibilités d'implantations et de protection aux vents dominants. Dans cette configuration, l'habitation enterré peut s'élever sans problème sur plusieurs niveaux.

En plaine, ce sont les habitations à un niveau qui sont conseillées afin de minimiser la quantité de terre à extraire car si l'on s'enterre profondément, le problème des évacuations des déblais et des fluides, ne sera pas négligeable. La création de petites cuvettes pour y implanter un niveau bas du projet d'habitat troglodytique est à proscrire car l'air froid y stagne et la taux d'humidité ainsi que les gelées peuvent être augmentés.

L'orientation au sud d'un habitat enterré sera préférable car elle maximisera l'apport solaire gratuit. En effet, ce type d'habitat peut être mis facilement en relation avec un système solaire actif (capteurs solaires), ou passif (masse de l'enveloppe et effet de serre).

La terre offre un excellent bouclier contre les vents dominants. Ainsi, la structure de ces maisons devra être constituée d'une enveloppe renforcée et d'un système de poutres résistantes car la surcharge provenant du poids de la terre est assez considérable.

Les formes structurelle de cette architecture sont variables mais la plus logique est la voûte ou le dôme qui réagissent mieux aux efforts résultant des charge imposées par la terre. Cependant, ces structures peuvent être difficilement transpercées de fenêtres sans risque de voir affaiblir leur résistance.

Ainsi, l'implantation des réalisations troglodytiques contemporaines doit tenir compte de la nature du sous-sol, du type de terrain, de l'orientation, des vents dominants mais également de l'environnement végétal qui l'entoure.

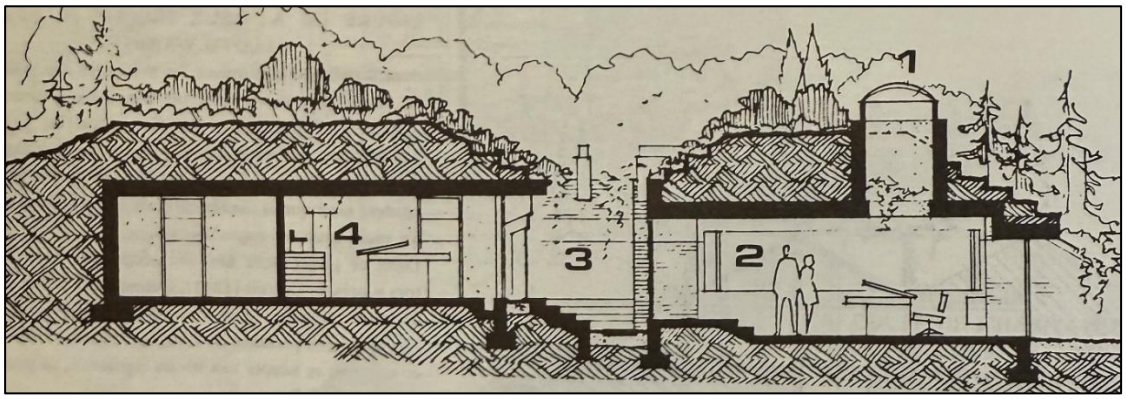


Figure 253 : Exemple de projet d'architecture enterré, ici les bureaux de l'architecte, spécialiste en architecture souterraine, Malcolm Wells. Ses bureaux sont composés de deux éléments séparés par un petit patio intérieur (New Jersey).

1. éclairage zénithal - 2. salle de conférence et dessins - 3. patio intérieur - 4. bureau.

Organisation fonctionnelle en plan

On peut identifier trois schémas de base pour un habitat troglodytique qui se différencient uniquement par la composition de leur enveloppe structurelle ainsi que de la taille et l'orientation de leurs ouvertures. Ainsi, on peut définir le type « mono orientation », la maison « à patio» et le type « multi orientations ».

A) Le type « mono orientation » :

Cette typologie, basé sur un emploi maximal de la couche végétale enveloppant l'habitat et concentrant toutes les ouvertures sur une seule façade ordinairement orientée au sud, engendre une organisation en plan obligeant à laisser en espaces secondaires, non éclairé, les salles d'eau, cellier, placard, etc... mais dont le besoin en lumière n'est pas primordial. Paolo Soleri parle de ce problème de mono-orientation dans son ouvrage intitulé *« Arcologie, la ville à l'image de l'homme » : Le problème essentiel de la vie troglodytique est la forte prégnance de l'orientation définie par l'ouverture de la grotte. Le matin et l'après-midi ont une spécificité plus importante qu'habituellement. En général, il y a une quasi symétrie définie par le midi, qui donne à chaque heure du matin une heure correspondante l'après-midi* [2] *».*

Une circulation interne importante, découle bien souvent de ce type de plan. Afin d'y remédier, il existe au moins deux possibilités : soit il faut répartir l'habitat sur deux niveaux, ou bien alors ne pas cloisonner l'espace interne. Malgré tout, grâce à l'exposition des fenêtres plein sud, et à l'importante enveloppe de la masse thermique de la terre, ce principe permet de réaliser d'importante économies d'énergies. Il est recommandé en pays froids.

B) La maison à patio :

L'idée de base est de répartir l'espace vital autour d'une cour (souvent carrée ou rectangulaire) sur laquelle donnent toutes les ouvertures et dont trois faces du patio sont réservées à l'habitat tandis que la quatrième est réservée à l'accès de l'habitat. Malgré les inconvénients dûs aux problèmes de circulation et à peu de surface habitable développée au sud, on peut associer un espace externe protégé et privé (jardin d'hiver ou d'été) au centre du patio afin de bénéficier d'une vue intérieure agréable sur un espace naturel végétalisé.

2. Extrait de : Paolo Soleri, Arcologie, la ville à l'image de l'homme, Parenthèses, 1980.

Dans cette typologie d'habitat enterré, deux systèmes de circulation peuvent être envisagés : en espace tampon entre jardin d'hiver et habitat (mais les pièces n'ont alors pas de vue directe sur le patio) ou en espace tampon externe, entre l'enveloppe de la terre et l'habitat (d'où une circulation importante). Ces inconvénients peuvent être facilement résolus par une succession de patios ou une répartition de l'habitat sur deux niveaux.

Le patio, jouant le rôle d'un énorme skydome, peut avoir tendance à «piéger » l'air au centre de l'espace qui est alors chauffé par le soleil, réduisant ainsi la perte de chaleur résultant de l'important développé de façade et formant un micro-climat interne confortable.

C) Type « multi-orientations » :

Il n'est recouvert de terre que sur les trois-quarts de sa structure, permettant ainsi la position des fenêtres de différentes tailles en différents endroits autour de l'habitat, et parfois même en toiture (skydôme). Les espaces importants avec de grandes baies vitrées, sont exposés au sud, tandis qu'au nord les espaces secondaires possèdent de petites ouvertures. L'orientation plein sud n'étant pas toujours possible, préférable ou agréable, la solution de type « multi-orientation» peut-être ainsi, une solution alternative pour résoudre certains inconvénients dûs à la topographie d'un site. C'est le cas dans le projet d'habitat enterré de William Morgan avec la fameuse Hilltop House située à Brooksvillle en Floride.

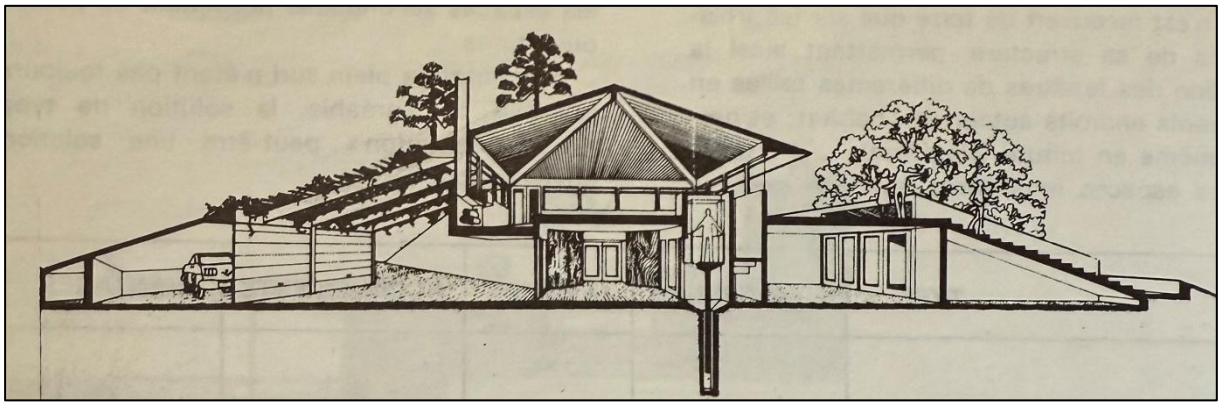




Figure 254 : Hilltop House, Brooksville (Floride), William Morgan, 1978. Source : contemporaryarchitecture.com
Habitation creusée dans la colline et de plan cruciforme.

TYPE	LA TERRE	LES VUES	INCONVENIENTS	AVANTAGES
Mono-orientation	Recouvre 3 faces	Concentrées sur 1 façade + zénithal	Circulation interne importante et peu fonctionnelle	Très économe en énergies
A patio central	Recouvre toute l'habitation	Disposées autour du patio	Circulation interne importante et peu fonctionnelle	Espace interne protégé
Multi-orientations	Recouvre les ¾ de l'habitation	Eclairage latéral et zénithal	Entraîne des déperditions thermiques	Permet l'éclairage de l'espace secondaire

Figure 126 : Tableau des typologique de base pour l'organisation fonctionnelle du plan d'un habitat troglodytique.

Typologie en fonction de la nature du sol

La typologie d'un habitat troglodyte s'adapte en fonction des climats (se protéger ou se cacher du soleil) et des sols (nature des sols et proximité de la nappe phréatique). La relation construction/environnement peut être de différentes natures, selon qu'il s'agisse de privilégier les vues ou la végétation. L'habitation enterré se définie ainsi suivant trois types de base :

1) A deux niveaux, un aérien et un souterrain
2) Semi-enterrée
3) Entièrement enterrée

Il faudra ensuite choisir le schéma directeur d'implantation logique à la morphologie du terrain. Dans tous les cas, l'éclairage sera zénithal et/ou latéral.

La combinaison du degré de pénétration des habitats dans le sol et du type de terrain rencontré entrainera le choix d'un habitat mono-orienté, à patio central ou à multi-orientation.
La structure correspondante peut aussi bien être réalisée en béton projeté (coque, structure légère) ou en béton armé (structure lourde), alliant les formes orthogonales aux formes souples.

En terrain plat :
L'habitation se conçoit plus facilement lorsqu'elle est à deux niveaux ou semi-enterrée (A et B), l'association d'une multi-orientation avec un patio, pour la partie enterrée, permet une libre organisation en plan. Néanmoins, l'habitation entièrement enterrée, desservie par un patio, entraîne une discrimination des espaces par rapport à l'orientation et aux vues principales.

En terrain incliné :
Deux cas se rencontrent : la pente du terrain est en corrélation avec l'orientation préférentielle (sud) ou en opposition à celle-ci. Dans tous les cas, il est souhaitable de positionner l'habitat enterré sur la ligne de la plus grande pente mais il y a une possibilité d'édification sur une pente contraire par l'intermédiaire d'un patio. Il existe tout de même quelques restrictions pour le troglo total qui se prive de cette liberté tout en gagnant des bénéfices sur la l'efficacité thermique du logement.

Dans une paroi verticale :
Le patio disparait de toutes réalisations et l'orientation se trouve ici très importante.
Au sein des schémas A et B, quelques dispositifs architecturaux pourraient éventuellement capter latéralement les rayons solaires est ou ouest dans le cas d'une orientation au nord, mais la partie enterrée serait alors reléguée aux petites dépendances. En C, la mono-orientation ne peut être évitée et le choix du site se trouve alors prioritaire sur tout autre critère.

Dans un monticule : Il y a possiblité de double ou multi-orientation.

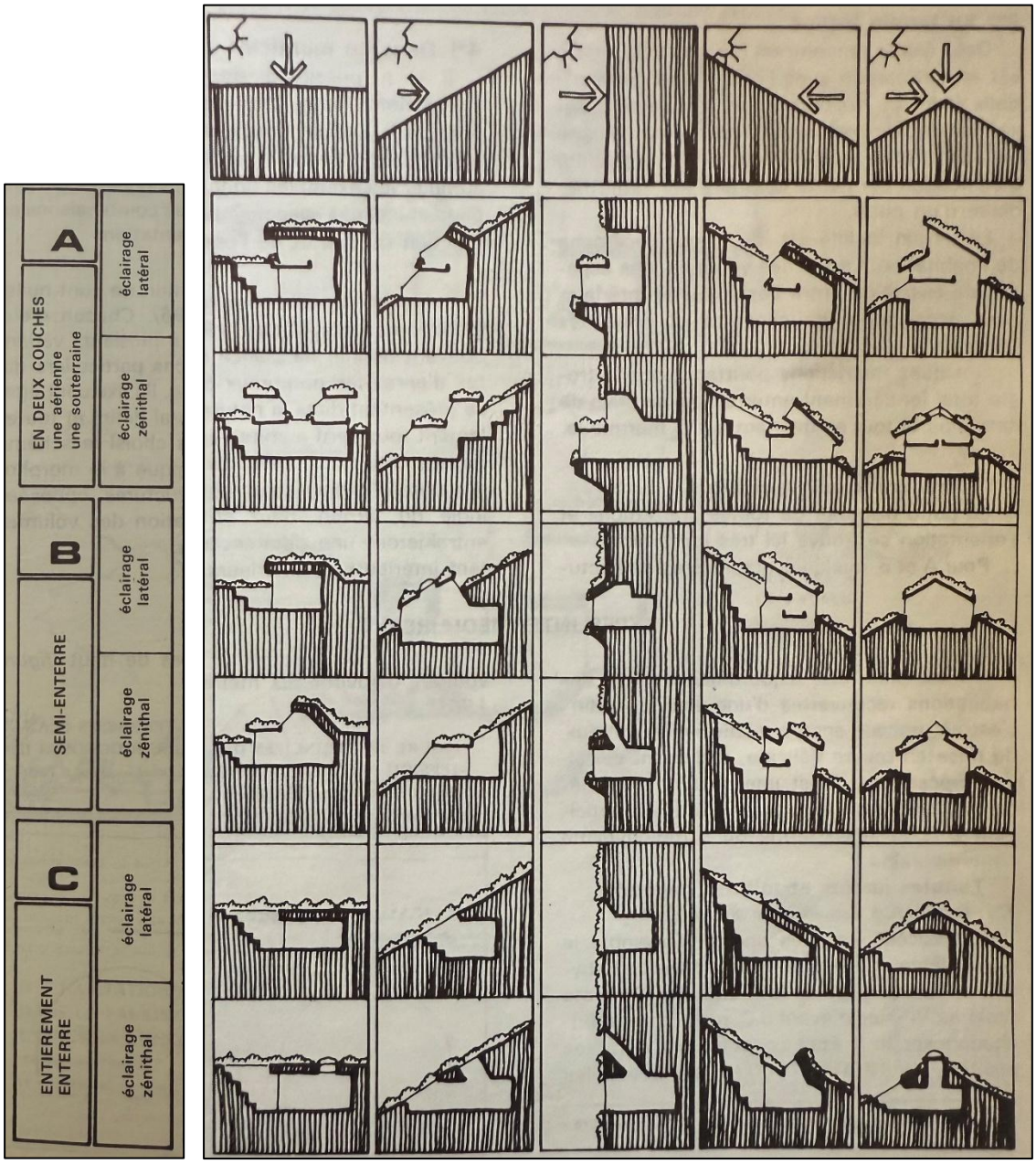


Figure 255 : Coupes schématiques d'implantation d'habitats troglodytiques en fonction du terrain et de la nature du sol

Voici quelques schémas qui permettent de bien analyser et comprendre les enjeux des différentes typologies d'organisation spatiale d'un habitat bioclimatique semi-enterré selon l'orientation des vues, la topographie du site ainsi que la nature des sols.

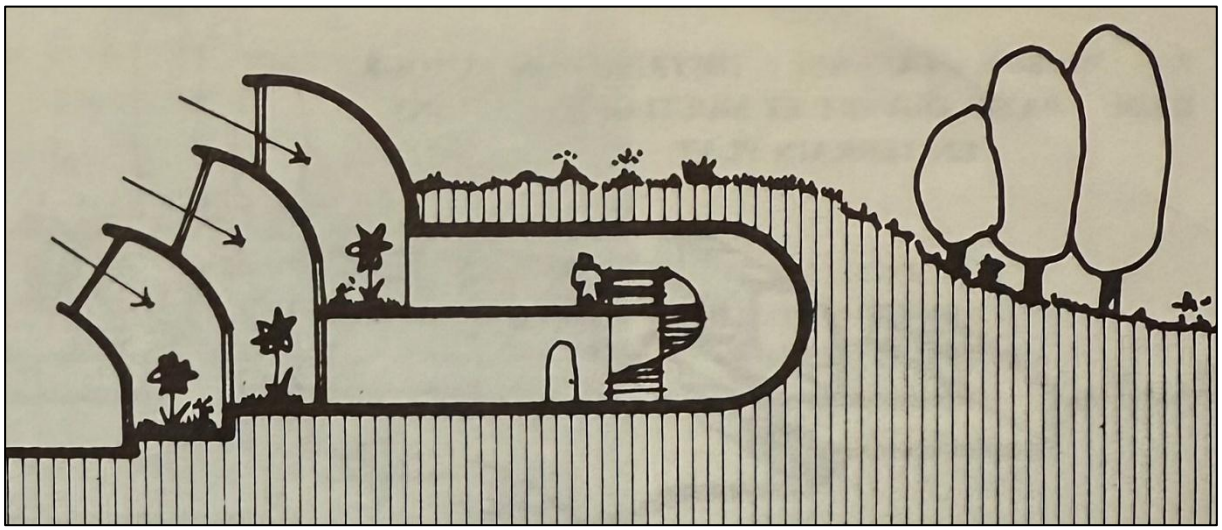


Figure 256 : Maison-fleur héliotrope (Mono-orientation, entièrement enterrée)

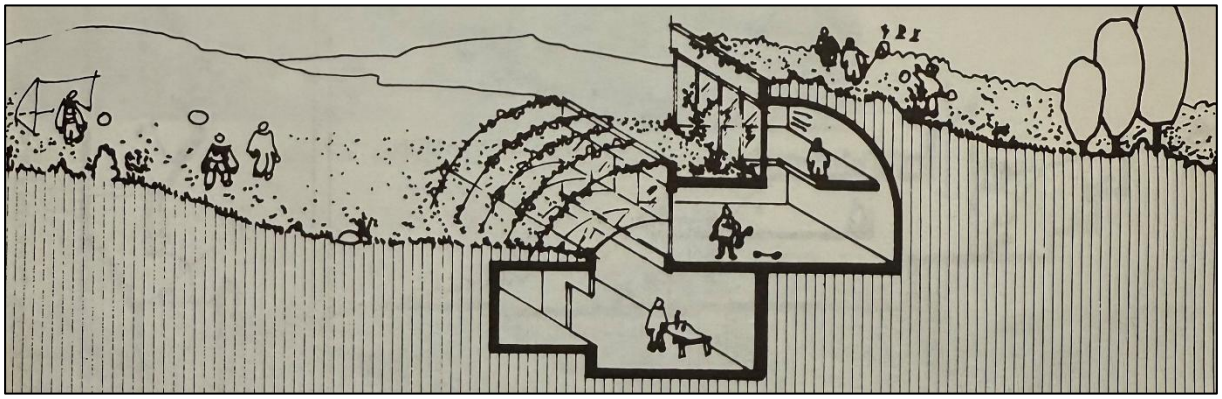


Figure 257 : Structure mixte mono-orientée et semi-enterrée à support végétal.

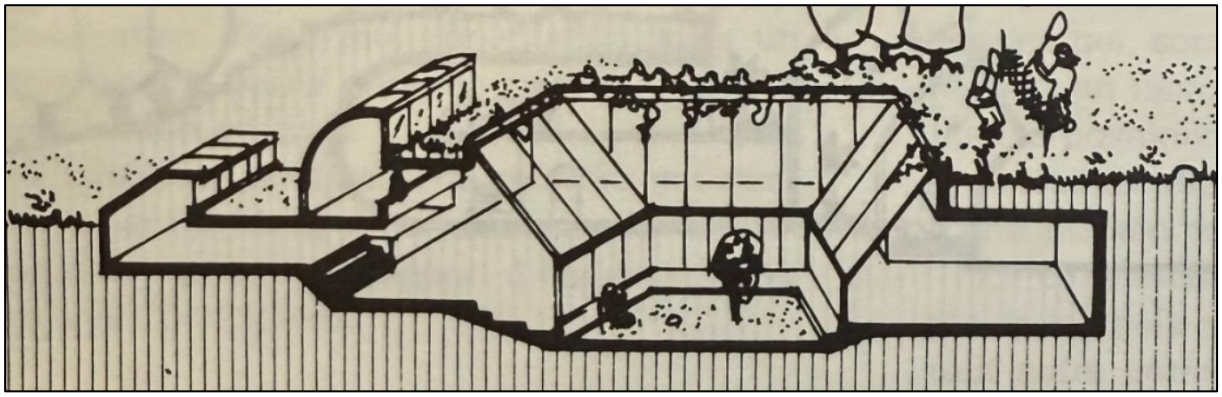


Figure 258 : Maison « Tafanel ». Distribution autour d'un patio ouvert et multi-orientations en terrain plat.

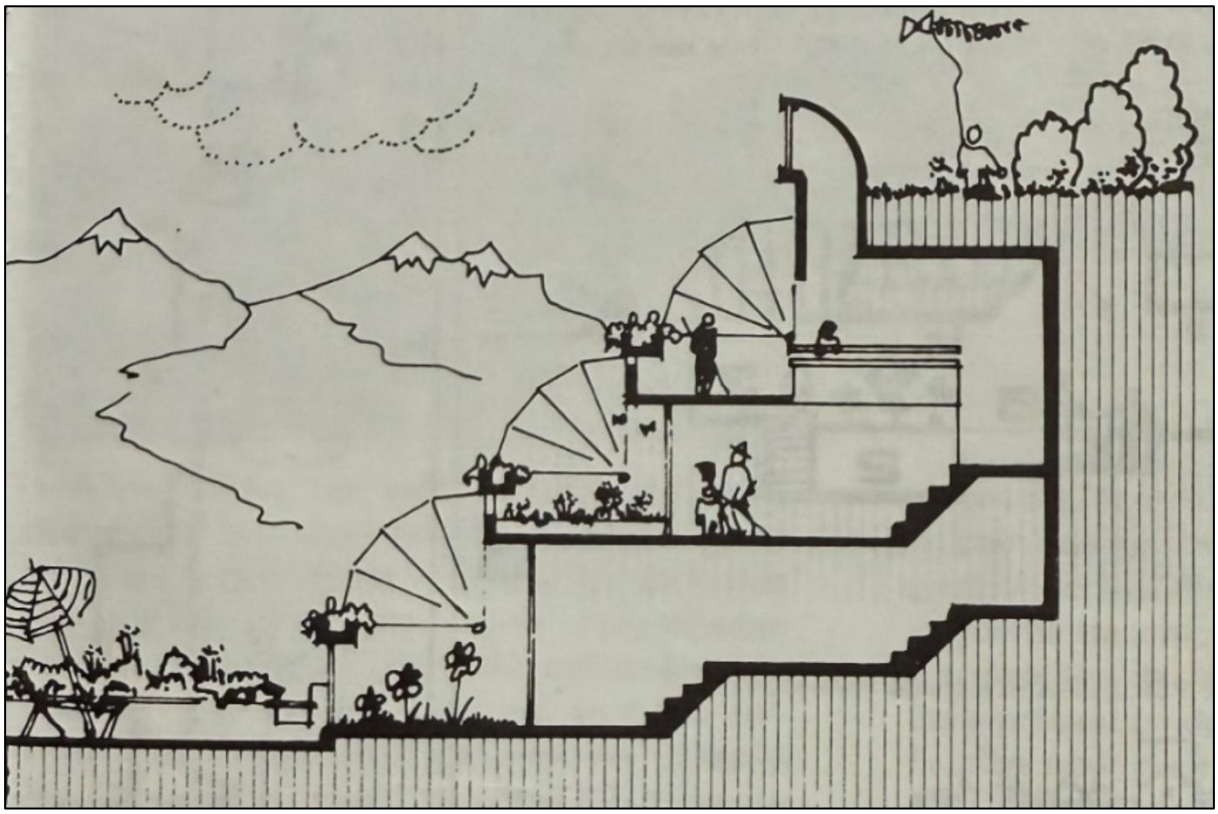


Figure 259 : Habitation troglodytique a mono-orientation accolée à la falaise (utilisation de mini serres démontables).

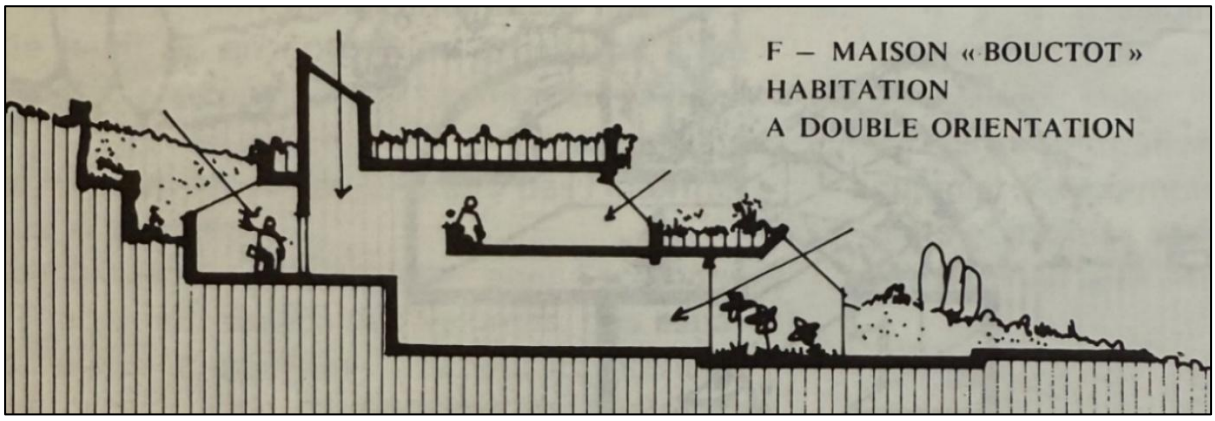


Figure 260 : Maison « Bouctot ». Habitation à double orientation.

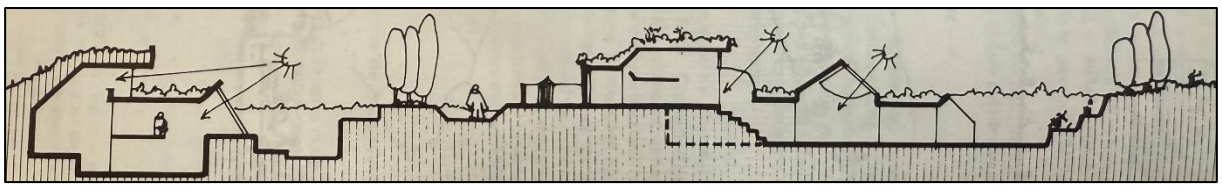


Figure 261 : Succession d'habitats semi-enterrés en terrain plat.

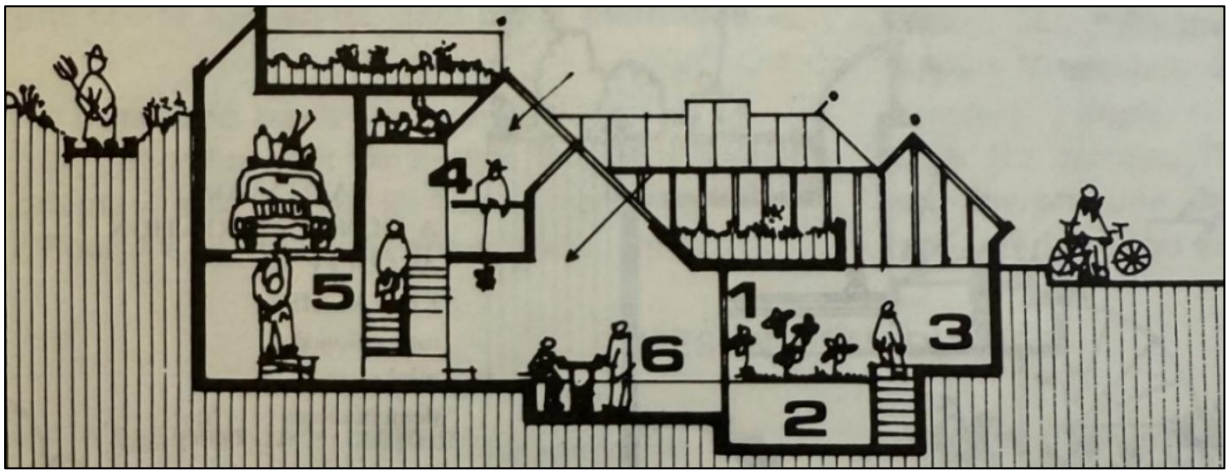


Figure 262 : Maison « Castel Ver Luisant », coupe longitudinale. Terrain en pente vers le sud et multi-orientations.

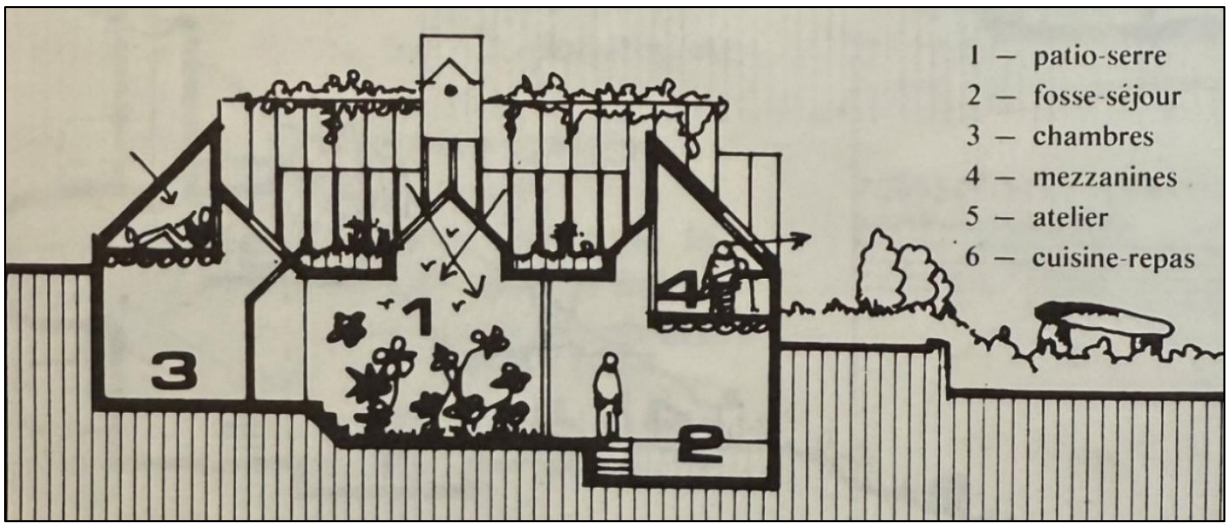


Figure 263 : Maison « Castel Ver Luisant », coupe transversale.

Pour conclure, l'habitat semi-enterré ou enterré avec patio, peut être une alternative souhaitable à envisager sérieusement en certains cas tels que :
- l'intégration dans un paysage contraint notamment des terrains déclarés comme inconstructibles ;
- des problèmes de densité urbaine ;
- des problèmes climatiques (pays tropicaux et arctiq*ues) ;*
- des nuisances diverses (nuisances sonores comme avec la proximité d'un aéroport par exemple).

3.2.2 Etude de projets innovants d'architecture troglodyte contemporaine face aux climats extrêmes

3.2.2.1 Projets construits :

3.2.2.1.1 Geier House à Cincinnati (Ohio)

Architecte : Philip Johnson, Cincinnati, 1965

La Geier House a été réalisée sur les rives d'un plan d'eau nommé Geier Pond. Johnson y étudie une architecture partiellement enterrée. En effet, la maison est intégrée dans le paysage, dans des monticules de terre avec un toit-terrasse végétalisé et des façades vitrées donnant sur le plan d'eau permettant de maximiser la relation intérieur-extérieur. La maison dispose également d'un niveau de plancher proche de la surface de l'eau, ce qui renforce le lien avec l'élément aquatique. Les volumes de la maison sont bas et le toit, se situant presque au niveau du sol, permettant de marcher dessus fait qu'on perçoit la maison comme un élément du paysage. La maison s'organisant sur un plan linéaire s'installe « dans » la terre plutôt que simplement « sur » le terrain.

Ce type d'habitat pose des questions techniques sur l'étanchéité, la gestion de lumière, la ventilation et l'humidité et est emblématique d'une période où l'efficacité énergétique et l'intégration au paysage commençaient à avoir une importance conséquente dans la réflexion architecturale.



Figure 264 : Geier House, (Cincinnati), Philip Johnson, 1965.
Source : blogspot.com

3.2.2.1.2 Maison Clark-Nelson à River Falls (Wiscousin)

Architecte : Michael Mc Guire, 1972

La « maison Clark-Nelson » est un logement enterré conçu pour deux professeurs de l'Université du Wisconsin–River Falls dans le contexte rural du Wisconsin… C'est une expérimentation résidentielle inspirée par la crise énergétique des années 1970. L'idée et le but de cet habitat était de réduire les besoins en chauffage en profitant de l'inertie thermique du sol et d'une enveloppe très compacte.

Sur le plan formel, la maison se caractérise par des voûtes et une coque en béton apparent, une toiture en partie recouverte de terre (bermée) et de larges ouvertures dirigées vers le sud pour capter la lumière. L'intérieur présente des volumes courbes, des puits de lumière ronds et des niches intégrées qui lui donnent son aspect « organique ». Un système d'arches en acier fréquemment utilisé dans les maisons semi-enterrées comme supports principaux ou comme coffrages temporaires en béton permet de stabiliser la structure de la maison et supporter le poids de la couverture du logement enterré. La superficie de la maison est d'environ 208 m^2, avec deux chambres et deux salles de bains.

Techniquement, le projet illustre les approches d'époque pour l'« earth-sheltered housing » : murs/voûtes en béton pour la masse thermique, terre en remblai comme isolation naturelle, et une orientation / menuiseries étudiées pour maximiser l'apport solaire passif. Selon des récits locaux, le propriétaire disait maintenir une température constante et confortable sans avoir besoin de chauffer l'habitat.

La maison a régulièrement attiré l'attention médiatique ces dernières années comme exemple précoce d'habitat économe en énergie. En tout cas, pour qui s'intéresse à l'architecture expérimentale des années 70, elle est un cas d'école : mélange d'idées écologiques, d'esthétique futuriste et de solutions constructives.

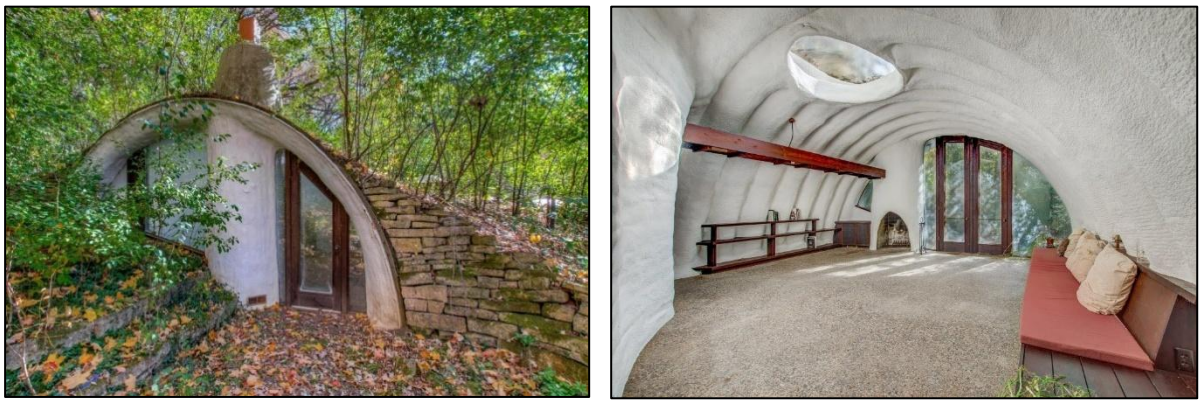


Figure 265 : Clark-Nelson House, River Falls (Wiscousin), Michael Mc Guire, 1972.
Source : https://www.homecrux.com/

3.2.2.1.3 Residenziale ovest à Ivrea (Italie)

Architecte : Roberto Gabetti & Aimaro Isola, 1973

Le bâtiment, s'insérant dans une pente, présente un plan semi-circulaire, d'un rayon de 70 mètres, et est entièrement enterré à l'exception de l'unique façade du bâtiment qui n'est visible que depuis l'intérieur d'une cour.

Le toit pavé du bâtiment, accessible depuis la route, se présente comme une place-terrasse surplombant la cour intérieure située en contrebas, occupée par un talus. Les logements sont donc recouverts par une rue piétonne. La façade-rideau en verre du bâtiment se fond avec le garde-corps en verre de la terrasse supérieure.

Le projet de construction de ce bâtiment, basé sur la coupe, s'inscrit dans le cadre d'une recherche sur l'intégration de la circulation dans l'architecture et la relation entre l'architecture et le paysage. Le complexe, réparti sur deux niveaux, comprend 13 duplex de 120 mètres carrés et 72 simplex de plain-pied de 80 mètres carrés, desservis par une rue couverte.







Figure 266 : Residenziale ovest, Ivrea, vue depuis la cour intérieure et le talus, Roberto Gabetti & Aimaro Isola, 1973.
Source : https://www.mamivrea.it/

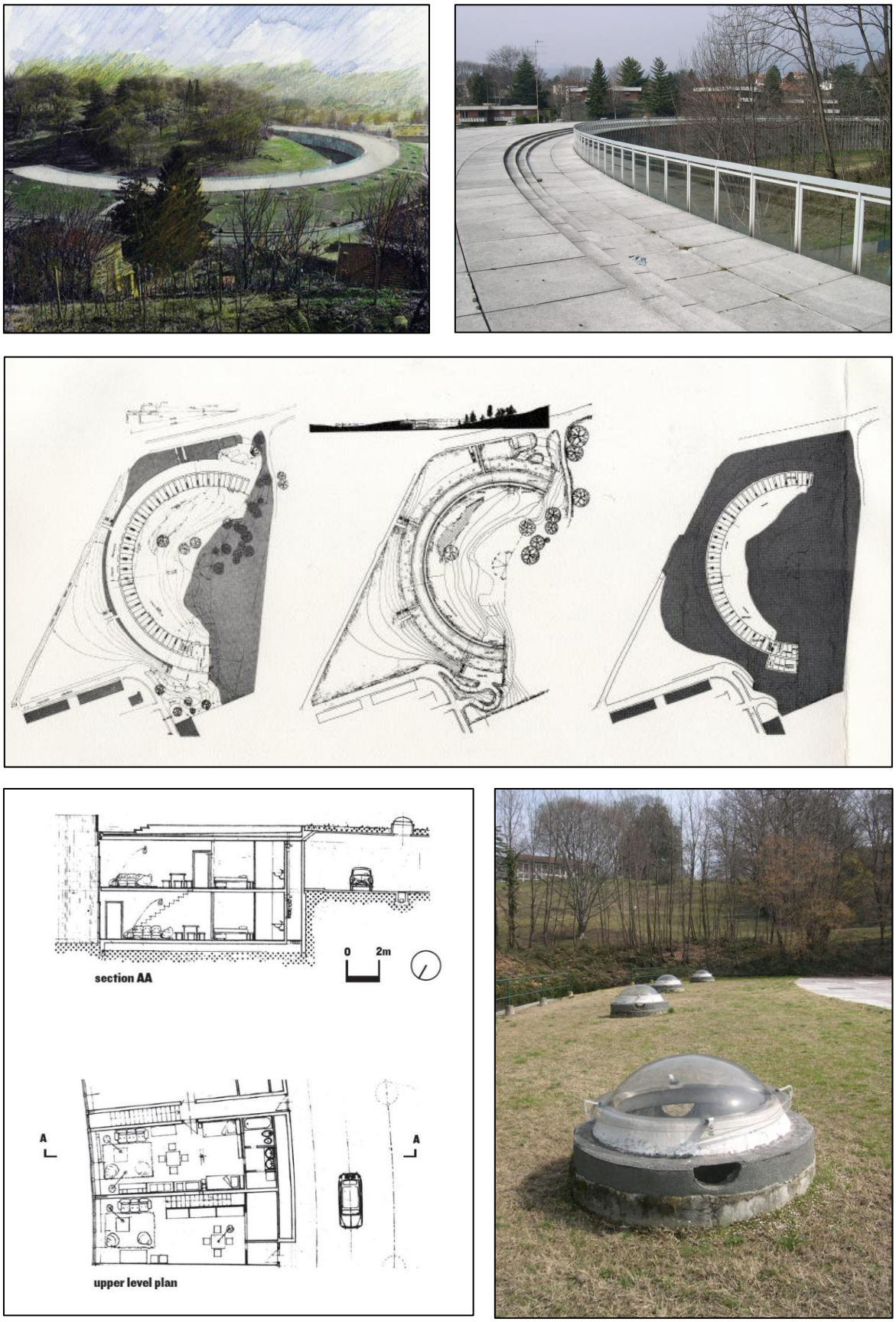


Figure 267 : Residenziale ovest, Ivrea, Roberto Gabetti & Aimaro Isola, 1973.
Source : https://www.ivreacittaindustriale.it/

3.2.2.1.4 Dune House à Atlantic Beach (Floride)

Architecte : William Morgan, 1974

Cet habitat expérimental s'inscrit dans une recherche de fusion entre construction et environnement naturel, tout en répondant aux contraintes climatiques d'un littoral exposé aux vents des tempêtes côtières et au soleil. Construite dans une dune naturelle recouverte d'herbe, la maison disparaît dans le terrain, elle est à peine visible depuis la rue. William Morgan conçoit ici, un projet où la topographie devient le bâtiment lui-même. Cette intégration paysagère intelligente offre une isolation thermique naturelle et permet à la maison de détourner les vents violents tout en assurant une température stable à l'intérieur, ce qui réduit considérablement les besoins en chauffage et en climatisation.

Cette petite maison semi-enterrée se composant de deux masses triangulaires aux formes courbes est en réalité un duplex reliés par des escaliers courts qui se compose de deux unités jumelles, chacune de 70 m^2. William Morgan vivait juste à côté, il ne voulait pas que cette nouvelle maison obstrue sa vue sur l'océan et a préféré conserver le paysage naturel en choisissant d'enfouir la maison dans une dune de sable existante. Deux grandes ouvertures arrondies encadrant les deux patios sont orientées vers l'océan Atlantique. Les façades en verre et bois s'ouvrent ainsi vers l'océan, offrant une lumière naturelle abondante et des vues spectaculaire aux espaces intérieurs.

La structure des deux maisons repose sur une coquille de béton protégée par une couverture végétale. Ce choix structurel confère à la maison une grande résistance face aux conditions climatiques côtières. Le toit végétalisé participe aussi à la gestion des eaux pluviales, limitant leur ruissellement et contribuant à la conservation des dunes environnantes.

D'une superficie de 167 m^2, le plan intérieur en gradins est à la fois spacieux et confortable, grâce au haut plafond de la grande salle. Les intérieurs de la maison paraissent modernes avec des murs et escalier aux courbes douces. Chaque unité possède son entrée principale à l'étage supérieur, qui comprend une salle de bains et une mezzanine, en équilibre avec la cuisine et la cheminée, qui accueille la suite de la chambre principale et le bureau de l'architecte.



Figure 268 : Dune House, Atlantic Beach (Floride), William Morgan, 1974.
Source : maison-monde.com

Les chambres d'enfants, dotées de leurs propres salles de bains et de terrasses privées, ont été situées à l'étage inférieur, afin de les séparer visuellement et acoustiquement.
Au rez-de-chaussée se trouvent une cuisine dînatoire et un coin salon spacieux en contrebas.
La paroi vitrée séparant le salon du patio semi-fermé offre une vue sur l'océan et apporte des quantités généreuses de lumière à l'intérieur du logement.

William Morgan s'est inspiré de l'habitat troglodyte et des traditions constructives anciennes pour concevoir la maison dune comme une réponse aux défis environnementaux. Aujourd'hui, la maison dune de William Morgan incarne une approche où la fonction, le site et les matériaux sont pensés ensemble pour produire un habitat discret, durable et en harmonie avec le lieu.
En s'intégrant au relief d'Atlantic Beach, la Dune House rappelle qu'il est possible de construire en limitant l'artificialisation visible des sols, tout en offrant aux habitants un cadre de vie lumineux, chaleureux et protégé des aléas climatiques, grâce à une conception et à un choix pertinent des matériaux.

Ainsi, cette maison invite à repenser notre rapport au paysage et à envisager l'habitat comme un prolongement de la nature, et non comme une rupture. En effet, la Dune House reflète l'idée que l'habitat peut participer à la régénération des écosystèmes côtiers, notamment grâce à l'intégration d'une couverture végétale adaptée aux conditions locales, favorisant la biodiversité dans un environnement souvent fragilisé par l'urbanisation des littoraux.

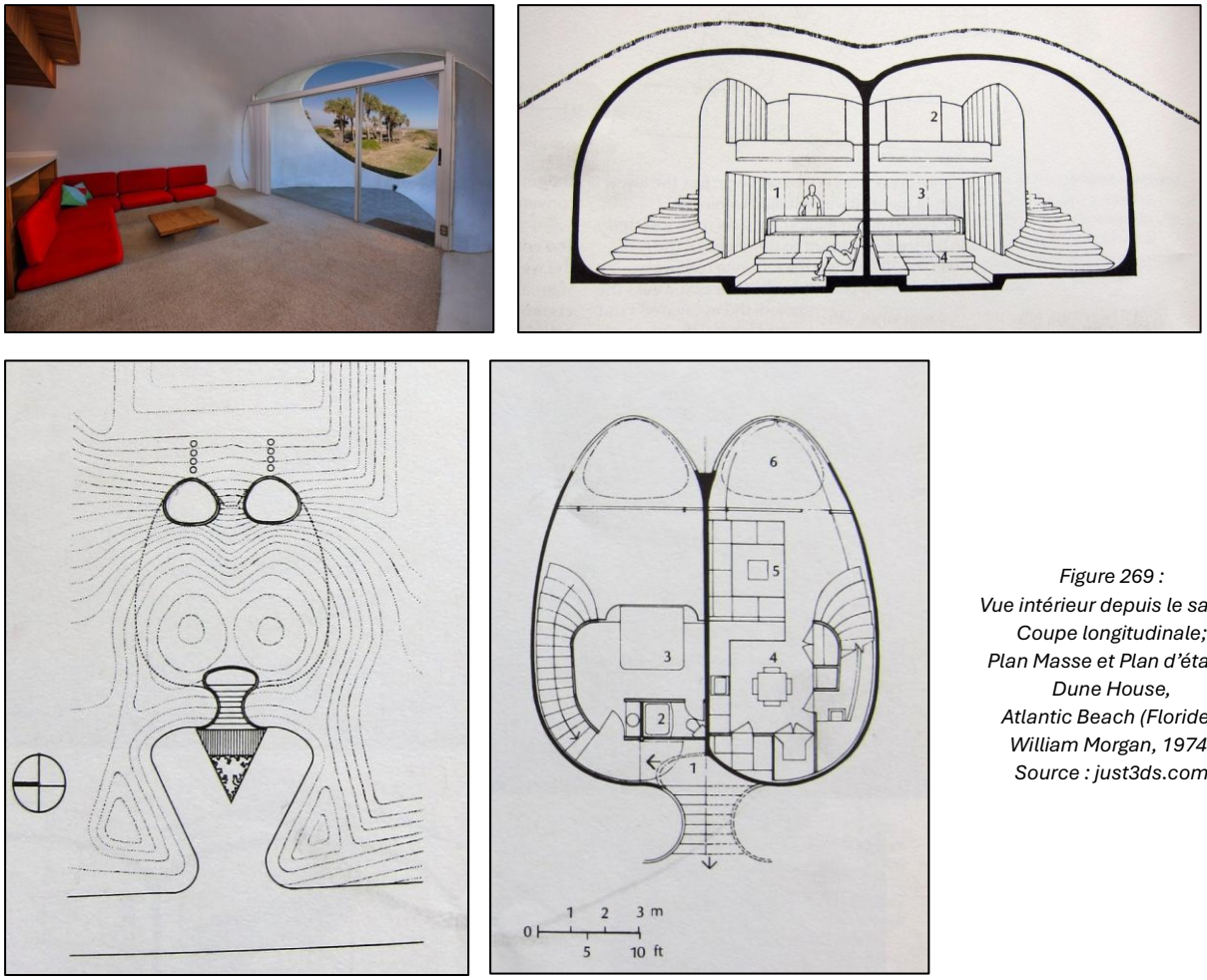


Figure 269 :
Vue intérieur depuis le salon;
Coupe longitudinale;
Plan Masse et Plan d'étage,
Dune House,
Atlantic Beach (Floride),
William Morgan, 1974.
Source : just3ds.com

3.2.2.1.5 Hilltop House à Brooksville (Floride)

Architecte : William Morgan, 1978

Cette résidence unique à la fois dans et au-dessus de la terre, offre une vue sur le paysage environnant. Le site est une colline de 610 mètres de diamètre et de 21 mètres de haut.

La conception de la maison reflète l'engagement de Morgan à harmoniser l'habitat avec son environnement naturel par des lignes épurées, de grandes fenêtres et une mise en valeur de la lumière naturelle. Dans ce projet, Morgan conçoit une maison qui s'intègre avec la topographie du terrain : construire avec la terre plutôt que sur elle.

Vue de loin, la maison paraît à la fois naturelle et artificielle, archaïque et moderne.
A partir d'un plan presque carré, la maison est incluse dans un remblai taluté en pyramide, orientée aux quatre points cardinaux, avec des murs de soutènement en terre et où chaque pièces de la maison s'ouvrent sur le paysage précédées de terrasses protégées et creusées dans la pente du talus, permettant une ventilation traversante efficace, un élément indispensable pour une maison construite dans une région au climat chaud et humide.
Les grandes fenêtres offrent non seulement une vue imprenable sur la campagne mais permettent également une abondance de lumière naturelle à l'intérieur du logement, améliorant ainsi l'efficacité énergétique de la maison et réduisant le besoin d'éclairage artificiel.
Le niveau supérieur est une pièce centrale surélevée sous un toit pyramidal en bois offrant une vue panoramique sur le paysage. Inspirée par l'architecture préhistorique en terre, cette maison offre à ses occupants une connexion spirituelle intense avec la terre.

Le bâtiment utilise un noyau en béton coulé en place pour les murs principaux et les structures enterrées afin d'exploiter la masse thermique du terrain. Le toit pyramidal, légèrement surélevé, repose souvent sur des poutres bois lamellées contrastant ainsi avec la masse minérale du soubassement. Le talus est utilisé comme paroi ou couverture de l'habitat. Cette stratégie permet d'intégrer visuellement la maison dans le paysage tout en assurant son isolation et sa protection thermique. L'orientation aux quatre vents, l'ouverture sur toutes les façades, et les terrasses protégées confèrent à l'ensemble un équilibre entre intimité, lien au paysage et confort climatique.

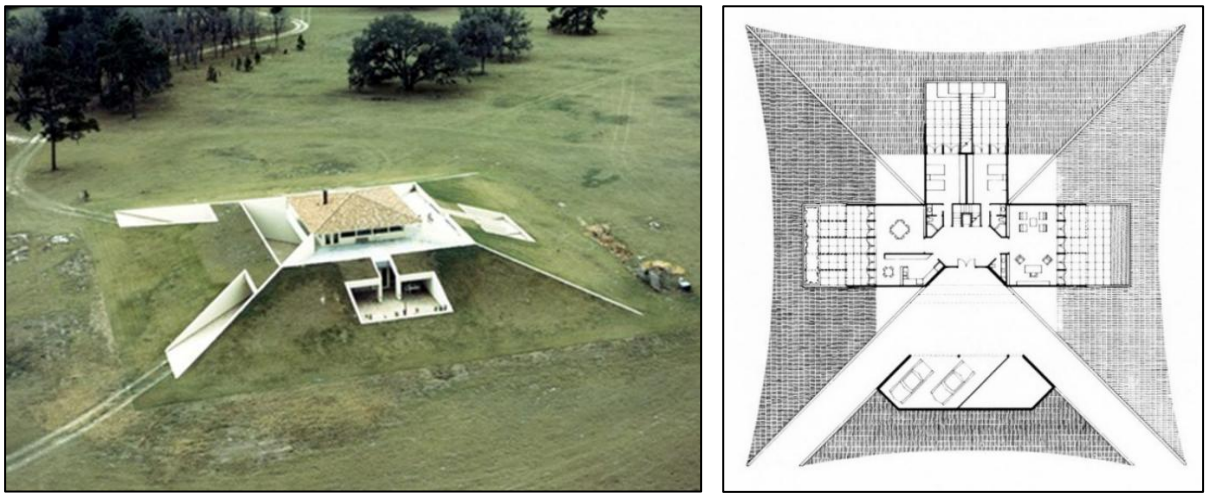


Figure 270 : Vue d'ensemble et plan d'étage, Hilltop House, Brooksville (Floride), William Morgan, 1978.
Source : hiddenarchitecture.net

L'intérieur de Hilltop House se caractérise par un plan ouvert et un design qui intègre des matériaux naturels et présente une esthétique minimaliste, créant ainsi une atmosphère paisible et accueillante. La couleur blanche souligne les parties visibles de maçonnerie, permettant de « lire » la partie construite, sur l'ensemble minéral et végétal qui l'englobe.

Bien que n'étant que partiellement enterrée, cette réalisation constitue un exemple remarquable d'architecture-paysage où la liaison entre le terrain d'implantation et l'habitation elle-même est particulièrement réussie.



Figure 271 : Façade nord-ouest et coupe perspective, Hilltop House, Brooksville (Floride), William Morgan, 1978.
Source : hiddenarchitecture.net

3.2.2.2 Utopies architecturales

3.2.2.2.1 Cooperative Homesteads à Détroit (Michigan)

Architecte : Frank Lloyd Wright, 1942

En 1941, un groupe d'enseignants et d'ouvriers automobile décidèrent d'acheter une ferme de 65 hectares prévoyant d'y construire une communauté de retour à la terre.

Le projet consistait en de petites maisons de la taille d'un cottage disposant de larges avant-toits qui seraient recouverts d'herbes et de mousse, protégeant les talus et tout en laissant entrer la lumière du jour dans les habitations par de grandes fenêtres en verre. Une section centrale du plan des maisons retient le talus derrière des masses de murs en gradins afin que des portes vitrées pleine hauteur puissent donner accès au rez-de-chaussée. Les murs devaient être traités avec du plâtre sur les surfaces intérieures, les talus extérieurs eux étant plantés d'herbes et de mousses.

Le site devait comporter 79 maisons, chacune avec deux chambres et un abri voiture couvert, ainsi qu'un atelier et un espace de stockage pour les produits secs et les légumes. Le projet a également été créée dans le but d'une autosuffisance. En effet, il y avait une volonté que les ouvriers cultivent la majeure partie de leur nourriture sur leur propre parcelle de terrain. Ce projet fut, en 1942, le pionnier de la construction semi-enterré dans un talus.

3.2.2.2.2 Ecopolis à Baou de Saint-Jeannet (Alpes-Maritimes)

Architecte : Guy Rottier

Dans son utopie d'urbanisme troglodytique, la conquête du milieu souterrain est rendue possible par l'invention du Lumiduc. Ce tube conducteur de lumière concentrée amène la lumière dans n'importe quel lieu souterrain (jardins publics, cultures, habitat, zones de vie collective) permettant à l'habitat troglodytique de ne plus être conditionné par l'orientation géographique. Le Lumiduc conduit la lumière solaire, après concentration obtenue par deux miroirs paraboliques de même foyer mais de longueurs focales différentes. Si les parois du tube dans lequel est introduit le faisceau sont réflectrices et si sa section est constante, le cheminement de la lumière se fait avec peu de perte sur une longue distance. Les lumiducs, peuvent être aussi simultanément utilisés comme conduits de ventilation.

Ecopolis se développe de manière à ce que la partie externe de la colline urbanisée accueille les habitat troglodytiques et les zones de végétation. L'intérieur du massif recevra les lieux de travail et les services. De ce fait, l'homme d'Ecopolis vivra les deux tiers de son temps dans les zones d'ensoleillement direct. Le troisième tiers de sa journée consacré au travail se passe dans les lieux d'activités éclairés artificiellement ou par lumiduc. Ces dispositions urbaines devraient pouvoir également résoudre le problème des temps de liaison habitat-travail, en supprimant les distances de trajets puisque zones d'habitation et d'activités sont toujours proches.

Dans son projet, Guy Rottier parle des économies faites sur le coût de conception de tel habitats troglodytes par rapport aux maisons traditionnelles.

« En effet, creuser revient moins cher que l'achat d'un terrain, et si en plus on ne dégrade pas le paysage?... Donc, au lieu de construire au pied du rocher, on le creuse, tel un gruyère, et on y installe une cité troglodyte, dont l'entrée se situerait au pied. Les services communs, magasins, salles de réunions, cinémas, se trouveraient au centre éclairé partiellement par lumiducs et les logements se situeraient à la périphérie de la colline, éclairés naturellement par des ouvertures qui seraient les seules orifices visibles depuis l'extérieur ».

Néanmoins, l'urbanisme d'Ecopolis suppose la création de mégastructures lourdes, et si l'utopie prétend à une écologie urbaine privilégiant le maintien des espaces verts (photosynthèses productrice d'oxygène nécessaire à la vie), la réalisation de cette ville enterrée mettra en œuvre une industrie et des technologies voraces en énergie et en matériaux.

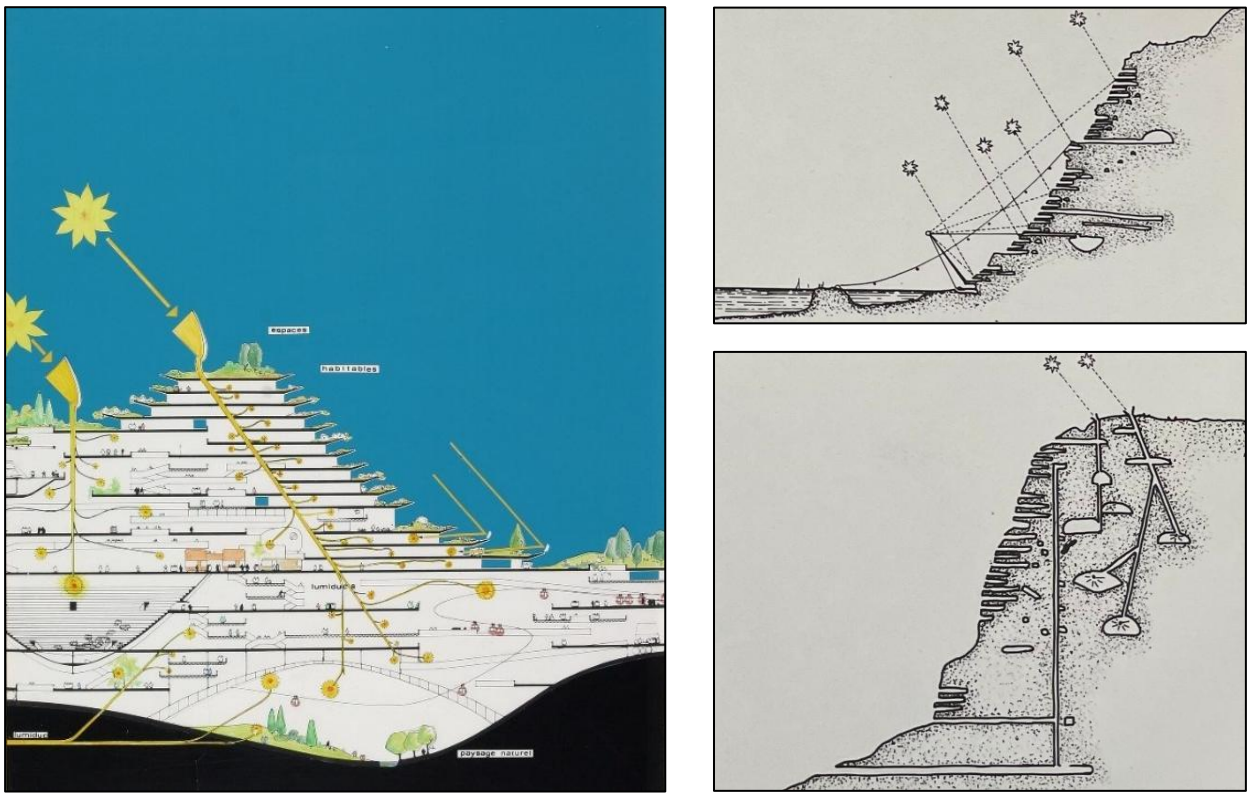


Figure 272 : GUY ROTTIER & ECOPOLIS, Village rocher de Guy Rottier, Baou de Saint-Jeannet, Alpes-Maritimes, 1976.
Source : https://www.reddit.com/

3.2.2.2.3 Arcologie en Arizona

Architecte : Paolo Soleri

Paolo Soleri imagine de gigantesques projets de cités troglodytiques exploitant des sites de carrière ou de falaises creusées de grottes. Son nom est surtout associé au projet Arcoindian qu'il met en œuvre en Arizona, une ville dans la falaise rappelant les grands abris sous roche de Mesa Verde. Son projet présente les habitats troglodytiques comme étant la solution contemporaine pour la résilience climatique dans les régions soumise à des contraintes climatiques extrêmes. Il présente également les avantages de ce type d'architecture et montre les bénéfices qu'on pourrait en tirer d'un point de vue urbanistique en les combinant à des systèmes de transport, production et des technologies modernes.

« L'habitat troglodytique est aussi ancien que l'histoire de l'homme. L'immuabilité du vent, de la pluie, du froid et de la chaleur souligne, aujourd'hui encore l'avantage d'un habitat troglodytique pour un groupe spécifique d'hommes. La combinaison de l'habitat troglodytique et de la sophistication métropolitaine pourrait être la solution future pour un habitat durable et écologique. Ici, la fonction d'abri, un toit pour la communauté entière est assurée par une cavité béante à flanc de falaise. Une telle topographie nous offre par le plafond de la demi-grotte, un mécanisme de contrôle de température pour une orientation optimale. Orientée vers le Sud, la grotte est un capteur de soleil en hiver, un parasol en été et un procédé de contrôle de vent et d'aération [...] La combinaison d'une bonne d'une ouverture de préférence tournée vers le sud, d'une bonne utilisation de la lumière naturelle et artificielle, de bon systèmes de chauffages convectifs, peut faire d'une grotte un endroit tout à fait agréable pour habiter et travailler. A partir du plateau, un certain nombre de puits serviraient à l'accès et au contrôle de la lumière et de l'air, puits qui plongeraient jusqu'au fond de la vallée reliant la ville aux jardins, aux parcs ou aux étendues d'eau ».[1]

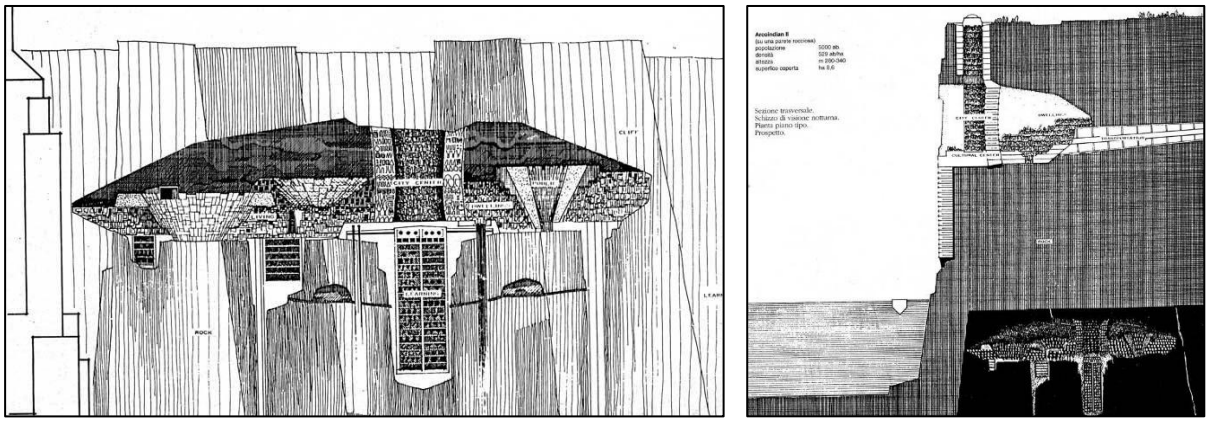


Figure 273 : Arcologie – la grotte écologique, Arcoindian II, Ville troglodyte semi-souterraine, Paolo Soleri, 1969.
Source : megaestructuras.tumblr.com

1. Paolo Soleri, Arcologie la ville à l'image de l'homme, 1980.

3.2.3 Processus de construction et recommandations pour les habitats troglodytiques contemporains

3.2.3.1 Réflexions

Comme nous venons de le voir précédemment, de nombreux architectes modernistes ont travaillé et défendu la cause de l'habitat souterrain dont Malcom Wells était l'un des pionniers. Ils défendaient le fait que les habitats souterrains pourraient devenir un modèle d'urbanisme intéressant à développer dans les prochaines décennies surtout d'un point de vue financier pour les ménages à revenu médian.

En effet, Malcom Wells, s'exprimait dans un recueil : « *En ce moment, mon travail de rêve est cette série de petites communautés sur les pentes inférieures de ces mesas dans une immense étendue occidentale dont 95 % seront laissés à l'état sauvage. Les voitures seront pratiquement interdites, la nourriture sera cultivée sur certaines plaines inondables et toute autre énergie sera captée du soleil et du vent. Le plus agréable, c'est que, comme le zonage conventionnel sera remplacé ici par un zonage écologique, de nombreuses unités peuvent être construites suffisamment petites pour que leurs coûts soient à la portée de l'acheteur moyen à revenu faible ou moyen*[1] ».

Toutefois, d'autres architectes réalistes rappellent que les maisons troglodytiques ont des coûts de constructions supérieurs aux maisons traditionnelles, les bénéfices à en tirer se trouvent davantage dans les économies en termes de dépenses énergétiques du bâtiment.

En effet, durant un entretien avec l'architecte Donald Metz, l'architecte Stu Campbell le questionne : « *Pourriez-vous concevoir une maison souterraine de 140 m²* [2] *(environ la taille d'une maison neuve moyenne mise en chantier aux États-Unis en 1979) pour un coût inférieur de 10 % à celui d'une maison comparable hors sol ? Et pourrait-elle fonctionner avec la moitié de l'énergie d'une maison conventionnelle ? Sa réponse fut rapide. « Non. Une maison souterraine correctement construite, coûterait probablement 10 % de plus. Mais les économies d'énergie devraient dépasser 50 %, voire 75 %, les coûts de construction supplémentaires seraient alors amortis très rapidement* [2] ».

1.Malcolm Wells, *To Build Without Destroying the Earth*, p 212
2. Stu Campbell, *The Underground House Book*, 1980, p7

Attitudes

« Mais n'est-ce pas froid et sombre ? Les maisons souterraines ne sont-elles pas humides ? Qu'en est-il de la condensation ? Comment sort-on si elle s'effondre ? L'air n'est pas vicié ? » Des questions comme celles-ci sont fréquentes. Elles reflètent l'avis de la majorité des gens face à la vie souterraine. Beaucoup sont hostiles à l'idée de futur plan d'urbanisme souterrain. *« Pas question ! » disent-ils. « Je ne suis pas une taupe ! »*. D'autres expriment une inquiétude pour des problèmes d'étanchéité, de ventilation, de structure de toit et d'éclairage naturel. Il existe bien sûr des réponses architecturales et mécaniques tout à fait satisfaisantes, voire agréables, à chacune de ces questions.

L' opinion négatif à propos de l'habitat souterrain est avant tout culturelle. En effet, par exemple, dans la religion, le paradis est toujours en haut, l'enfer est en bas ou encore les récits d'horribles accidents miniers où des supports artificiels ont cédé nous captivent devant les bulletins d'information télévisés. Nos avis sur l'espace souterrain sont également basées sur des expériences passées dans des caves qui fuient, des vides sanitaires moisis, des égouts nauséabonds et des stations de métro mal éclairées, repaires de rats, de voleurs...

Aujourd'hui, les architectes défendant la cause troglodytique évitent judicieusement le mot « souterrain » avec toutes ses connotations négatives et désignent plutôt leurs structures souterraines par les termes de « géotechniques » ou « maisons en terre ». L'euphémisme le plus populaire étant « logements semi-enterrés ».

Malgré le surpeuplement de nombreuses régions du monde, malgré les preuves archéologiques de peuples anciens qui se sont « installés » sous terre dans des habitations confortables qui restaient fraîches en été tout en bénéficiant de l'inertie thermique de la roche en hiver, malgré l'existence de prototype troglodytique tel que la librairie souterraine de l'Université du Minnesota, si économe en énergie que ses lumières et ses occupants génèrent suffisamment de chaleur pour maintenir une température intérieure de 21 °C même lorsque la température extérieure descend jusqu'à -29 °C (moment où le système de chauffage solaire actif se met en marche), et malgré l'intention de nos habitations contemporaines hors sol de se battre contre les pertes de chaleur et la surconsommation de combustibles fossiles, nous continuons à construire de la même manière sans changements drastique. De ce fait, il est grand temps désormais de commencer à prendre en considération les solutions apportées par l'habitat troglodytique en commençant peut être par appliquer et réaliser des plans d'urbanisme troglodytiques dans les régions soumises à des conditions de climats extrêmes.

Le problème, c'est que notre raisonnement a été très unilatéral. La Terre offrant une surface habitable si vaste, une abondance de terres fertiles et d'énergie, l'homme n'a, jusqu'à récemment, pas eu besoin de s'installer dans des régions plus hostiles où il aurait dû creuser. Aujourd'hui, les populations du monde entier sont confrontées à la problématique de devoir construire et utiliser l'espace sans détruire le paysage. Dans un premier temps, lorsque la densité de population est devenue un problème, la solution évidente a été de construire en hauteur à l'image de la skyline de Manhattan. Désormais sans options alternatives, nous devons plus que jamais nous pencher sur les solutions d'urbanismes que peuvent nous apporter le troglodytisme.

Abri antiatomique

A partir des années 50, l'idée de se réfugier sous terre a émergé afin de se protéger contre les retombées atomiques après une attaque nucléaire. Ainsi, au début des années 60, Jay Swayze, un entrepreneur et designer texan pensa et construisit un abri souterrain qui ne devait pas être un endroit sinistre et inhumain mais au contraire un lieu à destinations multiples, élaboré et qu'on pouvait agencer de façon attrayante. Il souhaitait en faire une véritable maison souterraine constituée d'un éclairage qui changeait tout au long de la journée, dotée d'une ventilation mécanique et de vues artificielles. L'idée plu et le prototype qu'il réalisa fut très médiatisé, soulignant l'intérêt de cette nouvelle architecture qui permet de résoudre d'un coup tous les problèmes posés par le monde moderne, qu'il s'agisse du péril atomique, de la tension nerveuse provoquée par le bruit, de l'empoisonnement atmosphérique, de la surpopulation ou du vol.

Arguments

En ce monde pollué et marqué par les nombreuses pénuries énergétiques, les arguments en faveur de l'utilisation de l'espace souterrain sont nombreux. Ils portent principalement sur la préservation de l'espace de surface, l'intimité, une insonorisation améliorée et surtout une faible consommation d'énergie.

Ce n'est pas un hasard si une grande partie des recherches sérieuses et du discours persuasif en faveur des bâtiments semi-enterrés proviennent du Centre de l'espace souterrain de l'Université du Minnesota. Pour le directeur Ray Sterling et les autres personnes qui y travaillent, la construction souterraine est une question de nécessité économique urgente. En effet, un pourcentage moyen alarmant de 33,3 % de toute l'énergie utilisée à des fins domestiques dans cet État du Nord des Etats Unis sert directement au chauffage des espaces de vie.
En collaboration avec l'American Underground Space Association, ils essayent de plus en plus de promouvoir les apports bénéfiques des habitats troglodytiques et d'inciter les gens à choisir le troglodytisme dans les régions soumises à des conditions climatiques extrêmes en organisant des conférences publiques intitulées « Vivre sous terre pour rester au sommet ».

Architectes

Ken Labs, un jeune architecte du cabinet Undercurrents à New Haven, dans le Connecticut, est un porte-parole énergique du mouvement souterrain. L'architecture souterraine, dit-il, permet deux choses : l'efficacité énergétique et la préservation de la qualité de l'environnement.

L'affirmation de Labs concernant l'efficacité énergétique est renforcée à maintes reprises par des données statistiques solides provenant d'ingénieurs du Minnesota, de Géorgie, du Texas et du MIT qui ont surveillé plusieurs maisons expérimentales.

Frank Lloyd Wright :

Frank Lloyd Wright affirme que l'architecture doit perturber l'environnement le moins possible ; qu'un bâtiment doit se fondre dans le paysage et presque disparaître dans son environnement.

Ainsi en 1943, il conçu une maison souterraine à Madison dans le Wiscousin.
Inquiets concernant les vents froids de l'hiver, les propriétaires ont été rassuré par Wright qui leur montra la forme semi-circulaire de la maison, qui faisait face à un demi-cercle de jardin en contrebas de 1,20 mètre sous le niveau du sol. Face au jardin en contrebas, derrière une étroite terrasse, une bande de verre et de fenêtres de 14,6 mètres de long s'élevait à 4,25 mètres jusqu'au toit en surplomb. Derrière la maison, au nord de la structure, une pente de terre atteignait presque la bande étroite de fenêtres, d'environ 30 centimètres de haut, qui encerclait toute la façade arrière de la maison. Avec les grandes fenêtres à l'avant, le soleil bas de l'hiver entrait profondément dans la maison et contribuait à la réchauffer, mais le soleil haut de l'été était bloqué par le débord de toit. L'autre caractéristique pour contrer le froid était la création d'un profil aérodynamique : *« Il est nécessaire d'accumuler la longue pente de terre contre le mur arrière pour que le vent souffle au-dessus de la maison plutôt que contre elle. Avec peu de vent soufflant contre elle et la masse de terre à l'arrière, vos coûts de chauffage seront très bas, a déclaré Wright*[3] *».*

Dans la conception de cette maison, Wright a utilisé le concept de chauffage solaire passif avec des plans comprenant des bermes et des avant-toits prenant en compte l’angle des rayons du soleil.

Malcolm Wells :

Malcolm Wells estime que de nombreux terrains indésirables à la construction peuvent être à nouveau attractifs grâce à l’enfouissement dans le sol. Il le démontre au sein de sa célèbre conception, Solaria, près de Philadelphie, achevée en 1976. Chaque hiver, les propriétaires n’avaient pas besoin d’utiliser le chauffage d'appoint. En effet, la chaleur solaire et la couverture de terre forment une combinaison puissante face aux conditions climatiques extrêmes.

La construction souterraine ne requiert généralement pas de compétences particulières.
Tout constructeur compétent devrait être capable de faire un travail adéquat, avec des matériaux facilement disponibles. Cependant, comme la maison doit s'intégrer étroitement à son site, consulter un architecte qualifié devrait être une priorité absolue. En effet, chaque site de construction a son propre ensemble de problèmes différents.

3. Herbert et Katherine Jacobs, *Building with Frank Lloyd Wright*, p 83.

3.2.3.2 Choix du terrain et de l'emplacement de l'habitat troglodytique

Planification du site

Bien souvent, lorsqu'une maison ne s'adapte pas à un site, nous changeons le site, rarement la maison elle-même. La configuration du terrain doit être étudiée de près avant de décider quel type de logement semi-enterré convient le mieux à un terrain particulier. Les urbanistes pour la culture underground prévoient que les sites bien aménagés peuvent accueillir jusqu'à sept unités semi-enterrées sur un acre, en offrant de l'intimité à chacun et en laissant 85 % du terrain ouvert pour le jardinage et la végétation naturelle.

Expositions

Les emplacements idéaux pour les maisons souterraines sont ensoleillés la majeure partie de la journée, de sorte que la maison peut être chauffée par le soleil en hiver. En été, le chauffage solaire devra être réduit, peut-être par un toit en porte-à-faux qui surplombe et ombrage les fenêtres exposées au sud. Certaines des meilleures conceptions actuelles permettent un chauffage solaire « passif », où la chaleur est stockée dans la maçonnerie ou dans des réservoirs d'eau scellés pour être libérée la nuit lorsqu'il n'y a plus d'apport solaire. Les systèmes solaires « actifs », qui comprennent des capteurs brillants, des mécanismes de transfert de chaleur et des éléments de stockage, peuvent également être envisagés.

Lorsque la maison est réellement orientée sur le site, son côté vitré devrait être orienté près du sud géographique. L'orientation idéale pour une fenêtre destinée à capter le rayonnement solaire est de 15 degrés à l'ouest du sud géographique.

Recherchez des montagnes ou des collines qui bloquent les rayons du soleil bas pendant l'hiver. Les conifères, qui conservent leur feuillage même pendant la saison froide, peuvent également obstruer le rayonnement solaire et doivent parfois être sacrifiés. Les arbres à feuilles caduques, eux, laissent passer la lumière du soleil une fois qu'ils ont perdu leurs feuilles en automne.

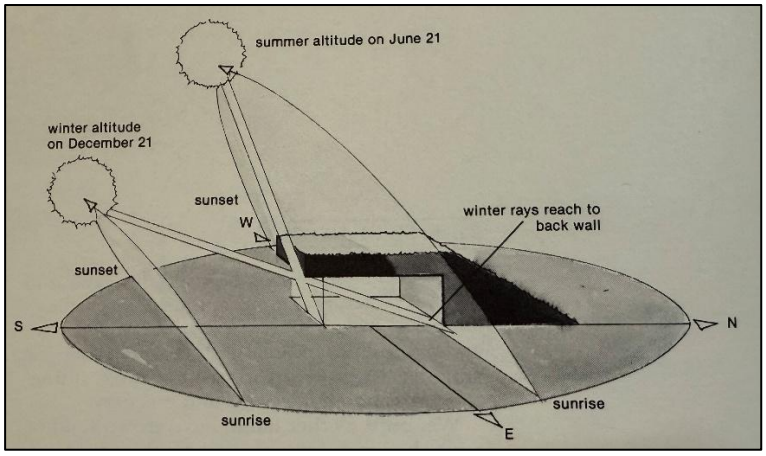


Figure 274 : La conception pour le chauffage solaire passif implique une sélection minutieuse du site, une compréhension des altitudes solaires et une orientation correcte sur le terrain.

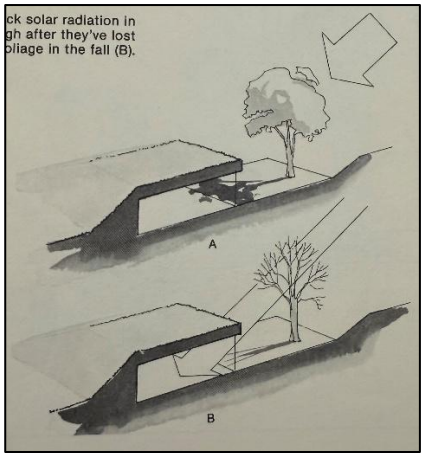


Figure 275 : Les arbres à feuilles caduques peuvent bloquer le rayonnement solaire en été (A), mais le laissent passer après avoir perdu leurs feuilles en automne (B).

Il est également important de savoir exactement jusqu'où le soleil d'hiver pénétrera dans le logement enterré. En effet, cela aura un impact sur le choix du revêtement de sol car la maçonnerie libérera de la chaleur en cas d'une panne de courant qui arrête le chauffage du logement en période hivernale.

Topographie

La topographie d'un terrain influe sur des facteurs tels que le ruissellement des eaux de surface, les régimes de vent, la végétation et l'ombrage. En hiver, les vents dominants soufflent et arrivent du nord-ouest. Ce côté de la maison nécessite donc une protection contre le flanc de la colline (s'il y en a une) ou d'un monticule de terre artificiel (appelé « berme »), et éventuellement d'un brise-vent composé d'arbres ou arbustes.

Ainsi, l'emplacement de construction optimal pour un habitat troglodytique seront en pente douce et le plus possible orientés au sud afin de ne pas subir les vents violents hivernaux. Toutes les fenêtres situées au nord de la maison entraîneront des pertes de chaleur. Cependant, de petites fenêtres peuvent être nécessaires pour la ventilation croisée du logement pendant les saisons chaudes et pour le contrôle de l'humidité.

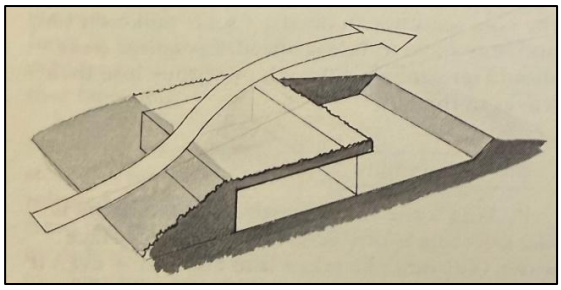


Figure 276 : Une maison enterrée située dos au vent dispose d'une protection thermique efficace face aux vents violents qui sont déviés et passent au-dessus de la couverture tellurique de l'habitat.

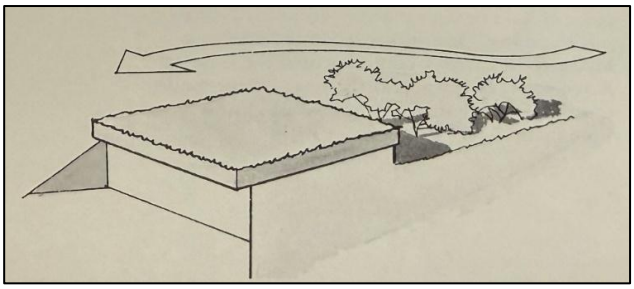


Figure 277 : Des plantations judicieusement choisies sur les côtés nord et/ou exposés au vent d'une maison peuvent servir de brise-vent et contribuer à assurer l'intimité.

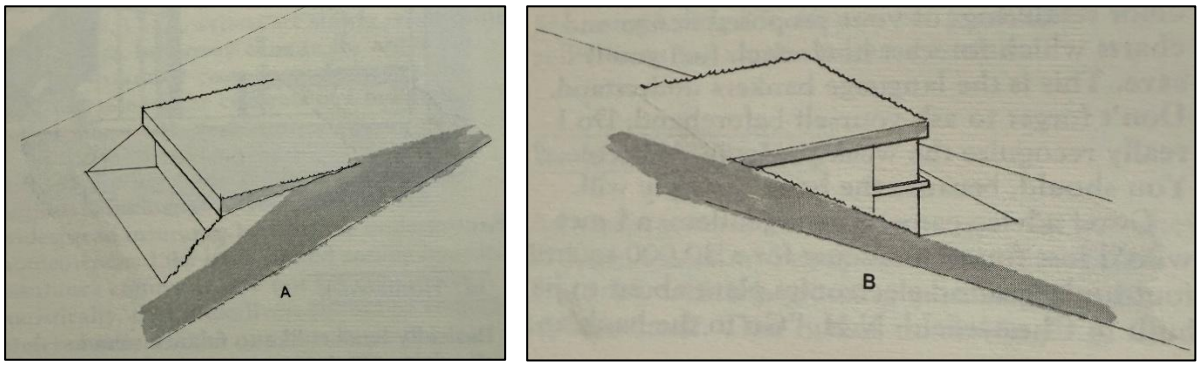


Figure 278 : Un terrain en pente peut convenir à une maison de plain-pied ou à une maison à plusieurs niveaux.



Figure 279 : Solar Hemicycle House, Frank Lloyd Wright. Source : fity.club

L'accès à la maison se fait par le talus.
Frank Lloyd Wright, avait placé de petites fenêtres le long de la façade nord de la maison afin de limiter les déperditions de chaleur.

Etude de sol

Les marais et les zones de pergélisol sont à proscrire comme emplacements potentiels pour la construction souterraine. Il en va de même pour les failles géologiques et les zones sismiques, bien qu'une maison semi-enterrée soit plus sûre qu'un bâtiment en surface dans les régions ayant des antécédents d'activité sismique. En effet, les secousses sismiques mineures ont peu d'effet sur une structure souterraine.

Le type de sol du terrain influe non seulement sur la stabilité de la maison et sur les systèmes de drainage, mais aussi sur la pression exercée sur les murs. D'autre part, une nappe phréatique élevée, où le sol saturé se trouve près de la surface, peut provoquer des problèmes d'humidité et d'étanchéité importants au sein de l'habitat troglodytique. Ainsi, la capacité de rétention d'eau du sol doit être examinée de près à l'emplacement de construction choisi pour un habitat troglodytique. Ainsi, le site idéal d'un habitat troglodytique sera situé dans une zone non sismique avec une nappe phréatique basse.

Voisins & Intimité

Une maison souterraine projette peu ou pas d'ombre sur la surface du sol. A l'inverse, les maisons traditionnelles peuvent interférer avec l'ensoleillement d'une maison troglodyte si celle-ci se situe trop près de l'habitation traditionnelle de ses voisins. En effet, dans ce cas, l'habitat troglodytique sera gêné par l'ombre générée par la silhouette de la maison traditionnelle. L'entrée de la lumière naturelle au sein du logement sera donc compromise par l'ombre des bâtiments situés hors-sol. Construire un habitat troglodytique trop proche d'un voisin potentiel est donc une mauvaise idée sachant que d'autre part, l'intimité au sein du logement troglodytique pourrait être affectée car les voisins auraient potentiellement des vues plongeantes sur la parcelle de l'habitat enterré.

De ce fait, une maison semi-enterrée s'intégrerait mal dans une zone résidentielle densément peuplée composée de maisons construites en hauteur. En effet, il y aurait des problèmes d'ombrage et de visibilité. Cependant, si on pensait à créer un quartier composé uniquement de maisons souterraines, ces problèmes n'existeraient plus. Il serait donc judicieux dans l'aménagement urbain des villes, de penser à construire des quartiers exclusivement troglodytique afin d'assurer le bon fonctionnement des avantages et des caractéristiques des habitats troglodytiques.

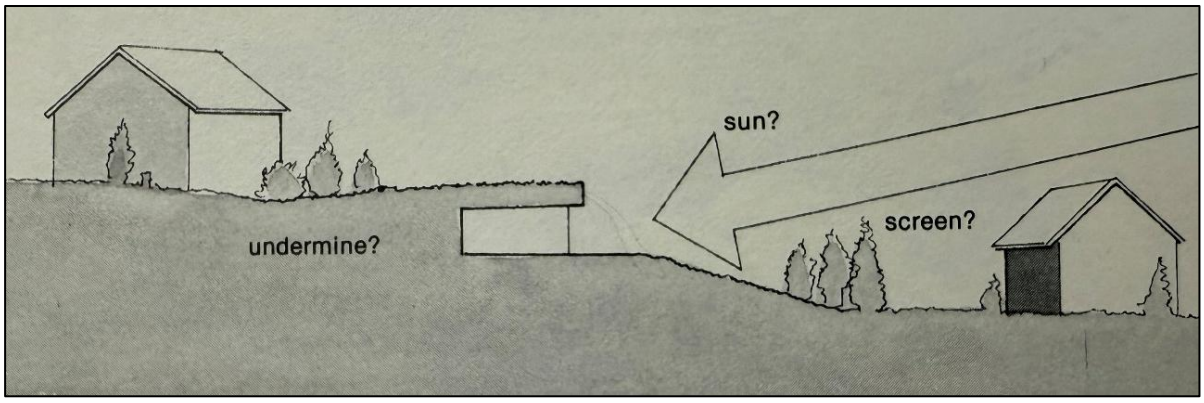


Figure 280 : Un bâtiment voisin risque-t-il de vous obstruer l'ensoleillement ? Aurez-vous besoin d'un écran de végétation pour empêcher vos voisins de vous observer par vos ouvertures vitrées ?

Drainage su sol

Un terrain destiné à la construction souterraine doit impérativement être correctement drainé, qu'il repose sur un affleurement rocheux, une couche imperméable, de l'argile ou tout autre type de sol. Une humidité excessive du sol augmente les risques d'humidité dans l'espace de vie souterrain et provoque une accumulation de pressions hydrostatiques inutiles contre les murs. Un sol bien drainé contribue à une meilleure dissipation de la chaleur par rapport aux parois de la maison.

Code du bâtiment et zonage

La construction souterraine est encore un concept relativement nouveau aux yeux des rédacteurs des codes du bâtiment et des règlements d'urbanisme. Les lois locales qui définissent précisément comment et où une habitation peut être construite ne sont pas encore bien défini. En effet, il existe encore peu de restrictions quant à l'utilisation des espaces souterrains peu profond.

Néanmoins, il existe certaines normes qui stipulent que chaque pièce habitable doit avoir une voie d'évacuation en cas d'incendie et un éclairage naturel. Des réponses architecturales existent pour ce type de contraintes. Le problème des issues de secours pour les habitats souterrains peut être résolu avec des échelles de corde passant par des puits de lumière qui permettraient également de résoudre la problématique de l'éclairage naturel au sein des logements enterrés.

D’autre part des questions légitimes se posent quant à l’emplacement qu’occupera un habitat troglodytique sur une parcelle. En effet, une maison souterraine doit-elle être soumise aux règles de recul habituelles d’une maison traditionnelle ? ou alors[...] Les travaux d'excavation d’un habitat troglodytique risquent-ils de fragiliser les fondations d'une propriété voisine si jamais celui-ci viendrait être construit à proximité de ce dernier ? Autant de questions auxquelles il faudra trouver rapidement des réponses si l’on veut réussir à organiser et structurer un urbanisme troglodytique qui fonctionne et sans problématiques et polémiques juridiques.

3.2.3.3 Coûts et budget global détaillé pour un habitat troglodytique

Entretien

Une maison souterraine est à l'abri des intempéries et la plupart de ses éléments sont protégés des variations de température, de la dilatation et de la contraction que subissent les matériaux hors sol lors des changements climatiques qui entraînent leur usure et une détérioration rapide. Il en va de même pour les variations d'humidité rapides et extrêmes, qui n'existent pas dans le sol, mais dans l'atmosphère. Ainsi, l'enterrement des éléments d'une maison réduit les risques de gel de la plomberie et permet d'éviter des coûts d'entretien majeurs liés à des travaux de réparation si les canalisations venaient à geler et éclater.

Cette protection contre les risques de gel-dégel, ainsi que les mesures spécifiques mises en place pour maintenir l'espace de vie parfaitement sec, expliquent en partie pourquoi une maison semi-enterrée peut coûter 10 % de plus qu'une maison hors sol. Néanmoins, une bonne étanchéité et un renforcement en acier du béton de la structure du troglodyte contribuent à réduire les coûts d'entretien du logement.

D'autre part, un toit d'un habitat enterré doit pouvoir supporter 60 cm de terre ou plus.
La nécessité de renforcer la charpente explique donc, en partie, l'augmentation de 10 % du coût de la construction souterraine.

Grâce à une construction qui exclut les matériaux périssables ou qui prend des mesures considérables pour les protéger, la maison troglodytique est à l'abri de la pourriture et des termites. Ainsi, si il est entretenu de temps en temps, l'habitat troglodytique dispose d'une durée de vie illimitée et est exonéré d'entretiens importants. D'autre part, un habitat troglodytique n'a pas besoin d'être repeint ni réisolé. Il n'y a pas besoin également de refaire sa toiture car le toit, recouvert d'herbe et/ou d'arbustes, se régénère naturellement.

Coûts initiaux

Les spécialistes du Centre spatial souterrain du Minnesota estiment tous que la construction d'habitats troglodytiques coûte en moyenne 10 % de plus que pour les maisons traditionnelles. Toutefois, ils prévoient une réduction des coûts d'exploitation d'énergies et d'entretien de plus de 30 % chaque année sur les maisons enterrées par rapport aux maisons hors-sol.

En effet, John Williams, de Hanscomb Associates & Georgia Tech déclare après une étude menée sur près de vingt bâtiments enterrés et hors-sol existants aux USA et en Suède :
« Pour chacune des six configurations de coûts de construction analysées, la structure semi-enterrée a engendré un coût total plus élevé que celui d'une maison hors-sol .
Cependant, après les premières années de vie du bâtiment, l'habitat enterré devenait une option économiquement avantageuse car il permettait de faire de grande économies à propos du cycle de vie du logement[1] ».

1. John Williams, « Coûts comparatifs du cycle de vie », L'utilisation des bâtiments recouverts de terre, p. 55.

Coûts du cycle de vie de l'habitat

Le Centre spatial souterrain de Minneapolis a lui aussi calculé les coûts énergétiques à long terme des maisons souterraines.

Ainsi, les coûts de chauffage de l'espace de vie d'une maison individuelle hors-sol, nouvellement construite, de 167m^2, (appelé Maison A) s'élèvent à 440 $ par an au Minnesota, en se basant sur les prix du combustible tels qu'ils étaient en 1978. Ce prix de 440 $ a été comparé aux factures de chauffage de trois maisons souterraines « typiques » appelés B-1, B-2 et B-3. Pour chacune d'elles, le coût de construction par rapport à la maison A a été supérieur à 10 %.

De nombreux observateurs affirment que les maisons souterraines permettent des économies d'énergie allant jusqu'à 80 % pour le CVC (chauffage, ventilation et climatisation). La maison B-1 n'est cependant pas si efficace. Elle consomme 40 % de l'énergie de la maison A, pour un coût de 176 $. La maison B-2 ne consomme que 20 % de l'énergie CVC de la maison A, pour un coût de 88 $ par an. La troisième maison théorique, B-3, peut fonctionner avec seulement 10 % de l'énergie de la maison A, ce qui représente 44 $ par an, au lieu de 440 $.

En supposant que le coût des combustibles fossiles augmente de 12 % par an, ce qui est probablement inférieur à l'augmentation réelle, et en supposant un taux d'inflation irréaliste de 6 %, voici à quoi ressembleront les dépenses énergétiques de chaque ménages après vingt ans :

- Les propriétaires de la maison A auront dépensé 3 790 $ pour le chauffage.

- Ceux de la maison B-1 auront dépensé 1 516 $.

- La B-2, 758 $.

- La B-3, 379 $.

À ce rythme-là, la maison B-1 amortira son dépassement de coûts de construction de 10 % grâce aux seules économies d'énergie après seize ans. La maison B-2 atteindra le seuil de rentabilité après douze ans et la maison B-3 après seulement dix ans.

L'énergie solaire est la principale source de chaleur des habitats souterrains.
Le chauffage au bois est également une alternative relativement peu coûteuse.
Son prix augmentera certainement au cours des dix prochaines années, mais dans de nombreuses zones rurales, il est probable qu'il ne progressera pas aussi rapidement que celui des énergies fossiles.

De ce fait, les prix des maisons souterraines sont très attractifs par rapport aux maisons traditionnelles si on parle essentiellement des qualités énergétiques respectives des habitats.

Enfin, il est important de préciser que pour maintenir les coûts d'un habitat troglodytique à un niveau raisonnable, la simplicité de la forme doit être suivie d'une simplicité de fonction dans toutes les parties de la maison.

3.2.3.4 Etude géotechnique et caractéristiques de la terre

Sol

Avant d'enterrer un habitat, il faut procéder à une étude géotechnique. Le triangle de Feret est un graphique présentant la classification de trois types de sols : le sable, le limon et l'argile en fonction de leur pourcentage de composition. Cet outil peut être utile dans le cadre de la construction souterraine pour déterminer sur quel type de sol va reposer la structure de l'habitat enterré. L'étude du degré de plasticité des sols (capacité d'un sol à se déformer sans se fissurer, principalement due à l'absorption d'eau par les particules argileuses) peut également être utile dans le cadre de travaux d'excavation.

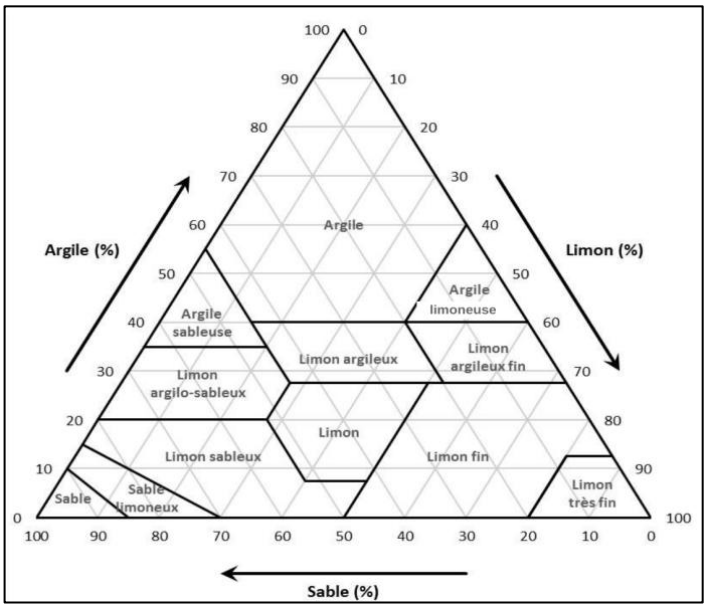


Figure 281 : Triangle de Feret
Source : wiki.tripleperformance.fr

Type de sol	Cohésivité du sol	Degré de plasticité	Indice de plasticité	Limite de liquidité	Limite de plasticité
Sable	Non cohésif	Non plastique	0	20	20
Limon	Partiellement cohésif	Peu plastique	<7	25	20
Argile limoneux	Cohésif	Moyennement plastique	>7	40	25
Limon argileux	Cohésif	Moyennement plastique	<17	40	25
Argile	Cohésif	Très plastique	>17	70	40

Figure 282 : Tableau de classification des sols par degré de plasticité

Conductivité thermique

Le type de sol a peu d'influence sur sa capacité à conduire la chaleur, le facteur important est la teneur en humidité d'un sol. La conductivité thermique est la tendance du sol à transporter la chaleur d'un endroit à l'autre. Elle peut varier jusqu'à dix fois en fonction des variations de la teneur en humidité. En effet, plus le sol est humide, meilleur il conduit la chaleur.

L'importance de connaître la capacité de rétention d'eau du sol d'un site est donc primordial. Il est encore plus important de s'assurer que le sol adjacent aux murs en béton est suffisamment poreux pour bien drainer car la terre végétale humide accumulée contre un mur en béton, même au-dessus d'un remblai poreux, peut devenir une importante source de déperdition de chaleur. Les meilleurs sols pour un drainage efficace sont le sable ou le gravier. Ainsi, plus le système de drainage est performant, moins la chaleur sera absorbée par la maison. La glace pose davantage de problèmes aux constructions enterrées car elle est un conducteur de chaleur encore meilleur que le sol humide.

La température du sol varie en fonction de plusieurs autres facteurs, notamment la latitude, les conditions météorologiques et la nature des particules du sol. Toutefois, en dessous de 45 à 50 cm sous la surface de la terre, le sol présente très peu de fluctuations de température d'un jour à l'autre, quelle que soit la température à l'extérieur. Plus profondément, les variations de température sont encore plus faibles et surtout plus lentes. En effet, chaque 30 cm de sol en profondeur signifie un décalage de sept jours dans la variation de température. À 2,4 m, il faut compter deux à trois mois avant que les particules du sol ne montrent une transition de la chaleur estivale à la fraîcheur hivernale. En dessous de 3,6 m, les températures extrêmes n'existent pas. Ainsi, la profondeur du sol est un excellent stabilisateur de chaleur.
Les températures normales du sol bien en dessous de la température de surface de la plupart des régions du globe sont en moyenne d'environ 13°C toute l'année.

Tout cela réduit le nombre de degrés-jours de chauffage nécessaires pour augmenter la température dans un espace de vie souterrain. Les maisons semi-enterrées sont donc mieux adaptées aux régions où le climat varie d'une saison à l'autre, aux endroits où les gens dépensent beaucoup d'argent en isolation et en énergie, que ce soit pour se chauffer ou se rafraîchir.

Pressions et stabilité des pentes

La densité du sol est modifié par la chaleur, par l'humidité, par les innombrables organismes qui y vivent, ainsi que sa profondeur. La façon dont un sol repose naturellement en place est son « angle de talus naturel ». L'angle de talus naturel, son angle de stabilité maximal, dépend de la façon dont les particules de sol reposent les unes sur les autres. Vingt-six degrés représentent environ la pente la plus raide pour la plupart des sols. Si la terre doit être empilée plus raide que cela, un mur de soutènement sera nécessaire pour la maintenir en place. Il faut savoir d'autre part que les sols trop meubles présentent des problèmes inhérents de stabilité des pentes, ils sont souvent difficiles à excaver.

Sol de toiture et profondeur

Le troglodytisme c'est aussi la rare possibilité de posséder deux jardins, l'un devant sa maison l'autre sur le toit. Le sol sur un toit, comme le sol près d'un mur, doit bien drainer. Ceci est généralement réalisé en étalant de la terre végétale sur une couche de sable ou de gravier.

Une question revient fréquemment : quelle quantité de terre faut-il sur le toit d'une maison semi-enterrée ? La réponse standard est de 30 à 90 cm. Trop de terre et la charge devient extrêmement lourde, ce qui exerce une pression excessive sur le toit, moins de 30 cm de terre ne sont pas suffisant pour offrir une masse thermique au toit afin de protéger l'habitat troglodyte et limitent la croissance de végétation sur celui-ci.

Ainsi, la profondeur du sol sur le toit d'un habitat troglodytique aura un impact sur la façon dont il conserve sa chaleur et sur ce qui peut y pousser. Selon Thomas Wirth, consultant auprès de l'Underground Space Center : 30 à 45 cm permettront aux graminées et aux couvre-sols de pousser, 60 à 75 cm seront nécessaires pour les petits arbustes tandis que les grands arbustes et les petits arbres auront besoin d'une profondeur de sol de plus de 1,5 m pour survivre.

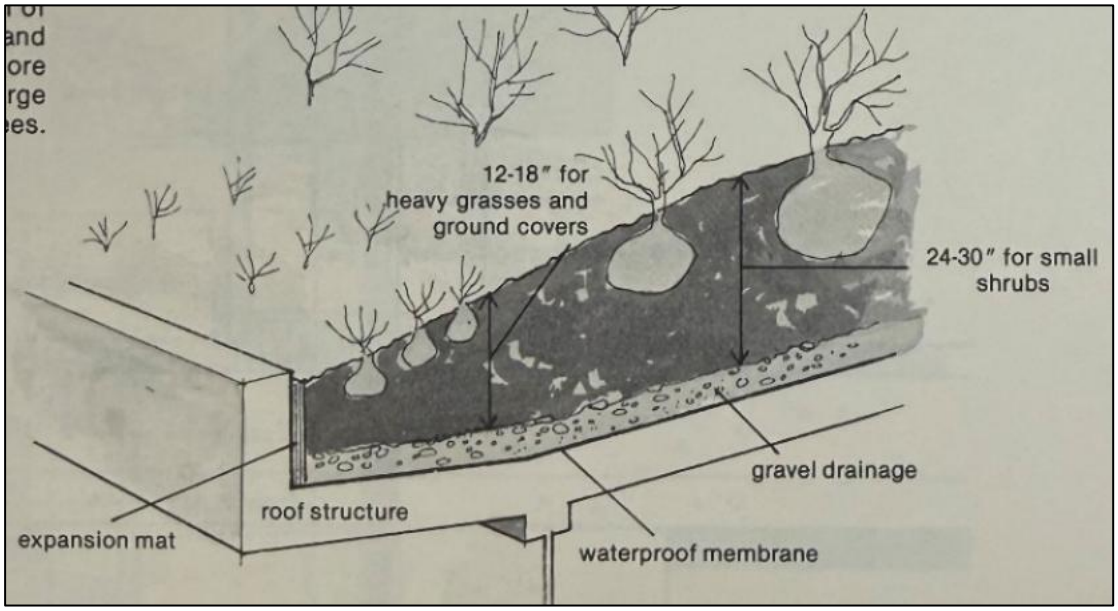


Figure 283 : Coupe sur une toiture végétalisé pour comprendre sa composition et la dimension de chacun de ses éléments. Ce qui est planté sur un toit dépend en grande partie de la profondeur du sol.

Végétation et aménagement de toiture

La terre d'un toit retient une certaine quantité de chaleur générée à l'intérieur de la maison. D'autre part, la température du sol du toit est affectée par la nature de sa végétation de couverture. Dans certaines maisons semi-enterrées, le toit en surplomb destiné à protéger les fenêtres exposées au sud d'un excès de soleil prend la forme d'un treillis. Les plantes grimpantes qui descendent du treillis ombragent encore un peu plus les fenêtres et les murs exposés. Le lierre d'Ingelmann par exemple, qui est souvent recommandé, arbore de grandes feuilles en été, perd son feuillage en automne, juste à temps pour laisser passer à nouveau le rayonnement solaire vers les baies vitrées. Enfin, l'entretien de la couverture végétale et l'aération convenable de l'habitat troglodyte permettent d'éviter les désagréments occasionnés parfois par les champignons et les mousses.

3.2.3.5 Eaux de surface et eaux souterraines

Une pente de 1 à 5 degrés est suffisante pour évacuer l'eau de surface par gravité.

En hiver, après que le sol de surface gèle et ne permet plus à l'eau de s'infiltrer dans les couches inférieures de la terre, la chaleur aura tendance à rester à l'intérieur d'un habitat troglodytique car en séchant, le sol devient un conducteur de chaleur moins efficace.

En été, cet effet de séchage n'est pas présent car une partie de l'humidité peut s'infiltrer dans le sol près de la maison. La chaleur est alors transférée à travers l'humidité vers le sol le plus frais situé à proximité, abaissant ainsi la température à l'intérieur des murs, ce qui apporte une climatisation naturelle.

3.2.3.6 Design

Considérations

Un sol en béton et carrelage est plus qu'une simple base plane pour un espace de vie.
C'est un bouclier contre les forces de l'eau souterraine. De plus, il peut servir de capteur et de zone de stockage solaire. Les murs d'un habitat troglodyte, eux, contiennent les pressions exercées sur sa structure, soutiennent la toiture et jouent un rôle de réserve de chaleur.

Types architecturaux de base

Il existe trois possibilités de conception fondamentales pour une maison semi-enterrée :

Le concept « en élévation », qui implique un bâtiment semi-encastré adossé à un terrain en pente. Les fenêtres apparaissent uniquement sur les façades exposées, de préférence au sud ; éventuellement à l'est ou à l'ouest. Les côtés nord et est sont recouverts de terre, tout comme le toit. Une structure en façade est instantanément compatible avec un chauffage solaire passif. Les plans d'une maison surélevée doivent être soigneusement élaborés si chaque pièce de la maison doit avoir une vue sur l'extérieur à travers une fenêtre verticale. Les espaces profonds à l'intérieur de la maison peuvent être éclairés par des puits de lumière.

La conception « en atrium » qui se développe à partir d'un terrain plat dans lequel une maison autour d'une ouverture centrale, d'une cour ou entièrement en retrait peut être construite.
La longueur, la largeur et la profondeur de l'atrium ont un impact sur l'éclairage, la ventilation et les possibilités de chauffage solaire d'un habitat souterrain. En effet, de par cette disposition, toutes les pièces habitables peuvent recevoir de la lumière naturelle depuis la cour centrale.

Dans une conception « en pénétration », la lumière naturelle et l'air frais pénètrent dans l'espace de vie par des ouvertures laissées ouvertes ou creusées dans le sol autour du périmètre de l'habitat. Cependant, ces pénétrations d'air réduisent l'efficacité du revêtement de terre.
Une maison souterraine comme celle-ci nécessitera aussi plus de murs de soutènement qu'une maison de type atrium qui peut n'en nécessiter aucun.

D'autre part, il est intéressant de savoir qu'une maison à deux niveaux sera plus avantageuse sur un graphique d'économie de coûts de construction et d'efficacité énergétique.

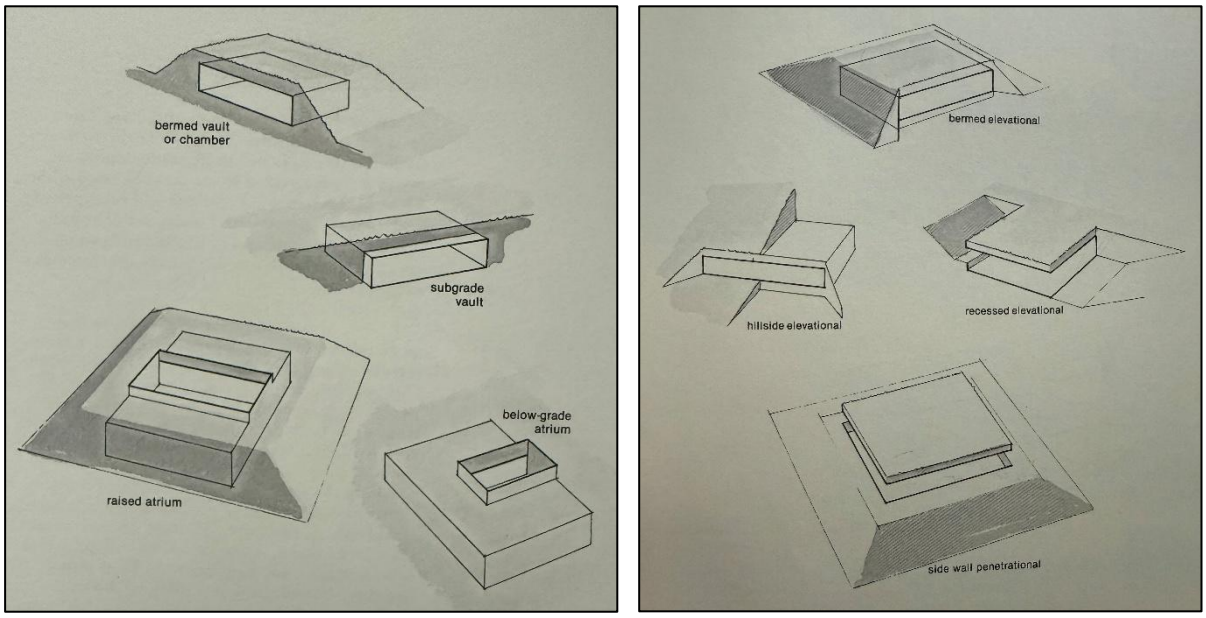


Figure 284 : Types de conceptions souterraines de base d'après Ken Labs.



Figure 285 : BALDTOP DUGOUT, Lyme (New Hampshire).
La Baldtop Dugout de Donald Metz est un exemple d'habitat souterrain à deux niveaux réussie.
Source : mensh.ru

Plans d'étages

Le besoin de lumière naturelle dans chaque pièce d'un habitat troglodytique impose presque systématiquement un schéma étroit et peu profond, avec des pièces alignées et un long couloir s'étendant d'est en ouest derrière elles.

Une solution différente est apporté par Donald Metz dans sa maison conceptuelle Earthtech 5 où il élargit les possibilités d'éclairage et d'aménagement des pièces en laissant les murs sud et ouest exposés. Les chambres se trouvent aux deux extrémités du plan, tandis que le salon, la cuisine, la salle à manger et la buanderie se situent au centre et ont des sols revêtues de carreaux de terre cuite ou de pierres de carrière destinés à collecter et stocker la chaleur solaire. Au centre, on trouve également le poêle à bois, principale source de chaleur de la maison.

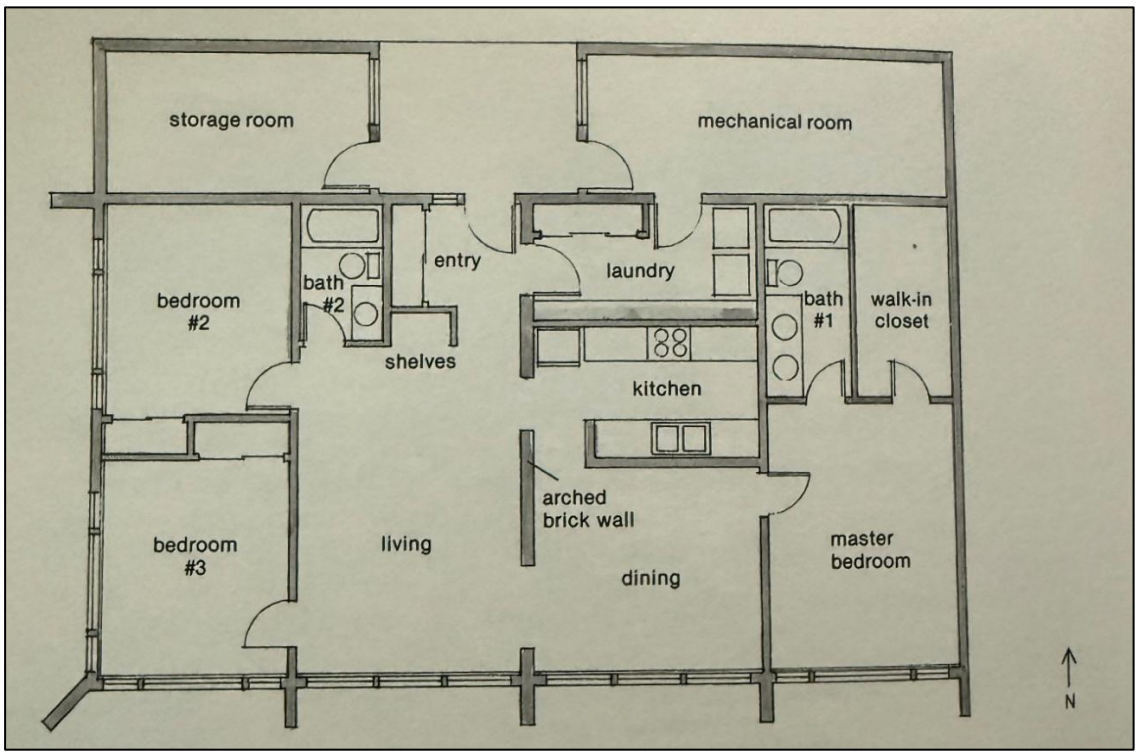


Figure 286 : Plan d'étage de la maison Earthtech 5, Donald Metz.

Une serre est également un élément important à prendre en compte dans le plan d'aménagement d'une maison troglodytique. En effet, elle remplit plusieurs fonctions : accueillir, chauffer, ventiler et nourrir ses occupants tout au long de l'année.

Auvents

Une maison semi-enterrée bien conçue est en même temps un cadran solaire et un élément de captage et stockage de la chaleur naturelle.

Une chose importante à calculer est la longueur du débord de toit au-dessus des fenêtres orientées au sud et à l'ouest. Pendant les semaines chaudes suivant le 21 juin, ces fenêtres doivent être protégées du soleil par un porte-à-faux, ou une extension de toit. A l'inverse, à partir du 21 décembre, jour où le soleil est à son point le plus bas sur l'horizon, l'entièreté des baies vitrées devront recevoir un rayonnement solaire important à midi. Si la profondeur de la maison est coordonnée avec le débord de toit, la lumière du soleil hivernale peut s'étendre sur toute la longueur du sol jusqu'au mur du fond de l'habitat enterré. Le facteur déterminant, outre la hauteur de la fenêtre, est bien sûr la latitude du site de la maison.

Béton et ruptures thermiques

Le plus grand défaut du béton est sa faible conductivité thermique.
Un mur enterré suffisamment long pour atteindre l'air libre peut « agir comme une mèche », attirant la chaleur de l'intérieur de la maison sur toute sa longueur vers l'extérieur froid.
Du polystyrène ou un autre isolant en mousse placé dans un mur en béton à une zone de transition critique peut créer une « rupture thermique » afin de bloquer ce flux de chaleur.
Malheureusement, les ruptures thermiques peuvent présenter des problèmes de conception en particulier par rapport à la continuité structurelle du mur qui est généralement détruite.
La solution la plus simple à ce problème est de construire des murs de soutènement et des extensions de toit non contigus avec un matériau autre que le béton.

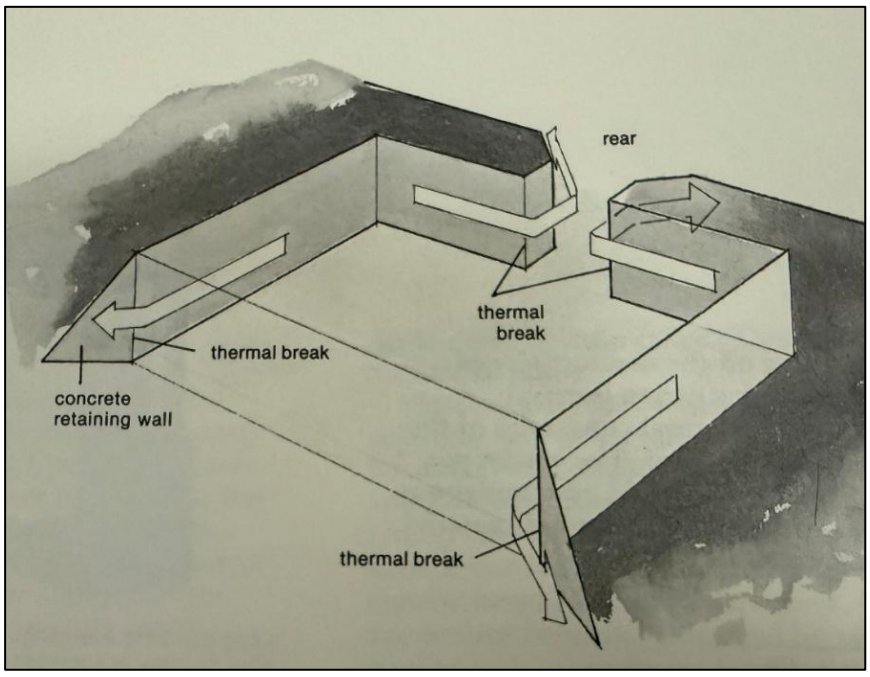


Figure 287 : La chaleur de l'intérieur d'une maison peut se propager le long d'un mur en béton et s'échapper vers l'extérieur. Une rupture thermique, sous la forme d'un morceau d'isolant en mousse intégré au béton, peut empêcher cette perte de chaleur.
Une rupture thermique isole les structures en béton extérieures.

Toits

Andy Davis suggère de construire une serre sur le toit afin de profiter de la chaleur montante du conduit de cheminée. Cette idée a été poussée plus loin par John Barnard, le concepteur de l'Ecology House à Stow, dans le Massachusetts. Dans celle-ci, Barnard a entouré l'atrium central d'une couverture semblable à une serre, qui agit comme un capteur solaire passif. Les propriétaires peuvent également cultiver des légumes à l'extérieur, sur le toit de l'habitat enterré et des plantes d'intérieur au niveau de l'atrium vitré.





Figure 288 : Ecology House, John Barnard, Stow (Massachusetts). Source : digitalcommonwealth.org et businessinsider.com

Cette maison de Stow, dans le Massachusetts, conçue par John Barnard, possède un atrium et une façade sud exposée. Dans ce cas précis, l'atrium est recouvert d'une serre.

La lumière pénètre dans chaque pièce entourant la cour de l'Ecology House, même si chacune est entièrement recouverte de terre. Le dessous des dalles de toiture en béton préfabriqué sert de plafond esthétique.

3.2.3.7 Inertie thermique

Masse thermique

En tant qu'isolant, le sol est environ vingt-cinq fois moins efficace que les meilleurs matériaux isolants actuels. Ce n'est pas la qualité isolante de la terre, mais son immense masse qui est attrayante pour une maison souterraine. Plus il y en a, plus la quantité de chaleur ou de refroidissement nécessaire pour ajuster sa température d'un seul degré sera important. Une grande masse thermique stabilise donc les températures.

Tout au long de l'été, la chaleur du soleil réchauffe lentement la surface de la terre, aidée par l'eau qui s'infiltre dans les couches inférieures du sol. Lorsque les saisons changent et que le climat se refroidit, la chaleur est retenue plus longtemps dans le sol que dans l'atmosphère. La surface du sol finit par geler, se recouvrant d'une couche de neige isolante, interrompant tout écoulement d'eau froide vers les profondeurs de la terre. La chaleur contenue dans le sol ne peut alors s'échapper que très lentement. En effet, l'eau, stocke mieux la chaleur que l'air, la terre, le béton ou tout autre matériau, à l'exception de quelques sels rares.

La masse thermique d'un habitat troglodytique peut donc également être augmentée en construisant des conteneurs d'eau fermés, des barils étanches, des tubes ou des ponceaux dans les structures de maçonnerie à l'intérieur de la maison. En cas de chaleur excessive, ces conteneurs, ainsi que la terre environnante, absorbent la chaleur, refroidissant ainsi l'espace de vie. Ces cellules de stockage restituent ensuite, dans un second temps la chaleur à l'espace de vie dès qu'elles ne sont plus chargées.

Systèmes de chauffage et solaire passif

Les ingénieurs énergétiques Thomas Bligh et Richard Hamburger ont déclaré publiquement au Underground Space Center de Minneapolis : *« Aucune isolation sur un bâtiment hors sol peut rivaliser avec les structures souterraines du point de vue de la conservation de l'énergie ».*

L'inertie thermique d'un habitat troglodytique neutralise les déséquilibres thermiques.
En effet, une maison souterraine peut maintenir des températures constantes suffisamment confortables pour que l'eau chaude sanitaire représente un besoin de chauffage plus important que le chauffage des locaux, même dans une région au climat froid.

Dans presque toutes les régions du nord, à l'exception des plus nuageuses, un système solaire passif dans lequel aucun équipement mécanique n'est utilisé pour collecter ou stocker la chaleur peut devenir une source de chaleur principale plutôt que secondaire pour une maison enterrée. Plus le rapport entre la surface vitrée orientée au sud et le volume de l'espace habitable est important, plus il est facile de chauffer l'ensemble de l'habitat souterrain.
En effet, des fenêtres bien conçues orientées sud-est, sud et sud-ouest peuvent représenter jusqu'à 60 à 70 % du gain de chaleur direct d'une maison.

D'autre part, les fenêtres et les puits de lumière considérés comme capteurs solaires actifs peuvent être utilisés comme source de chaleur pour l'eau chaude sanitaire et l'espace de vie pendant l'hiver, à condition qu'il existe un moyen d'empêcher les pertes de chaleur lorsqu'il n'y a pas de soleil.

Cependant, trop de surfaces vitrées entraîne également une perte de chaleur lorsque le soleil ne se montre pas. Par exemple, une serre, reliée à la structure principale d'un habitat souterrain peut être un dispositif solaire passif très efficace car elle offre une grande surface vitrée au soleil, mais elle doit pouvoir être fermée la nuit lorsqu'il fait plus sombre et plus froid et pendant les jours sans soleil afin de ne pas produire l'effet inverse de sa conception.

Systèmes d'appoints

Comme on ne peut pas compter sur le soleil pour fournir de la chaleur avec une régularité systématique, un ou plusieurs systèmes d'appoints pour chauffer un habitat enterré seront nécessaires. Toutefois, le consensus, confirmé par les données disponibles, est que la consommation générale d'énergie est considérablement réduite sous terre, même sans apport solaire. D'autre part, les experts s'accordent à dire que l'installation de plusieurs systèmes d'appoints au sein d'un habitat troglodytique sera dans les intérêts économique des propriétaires car les différents sources et disponibilités d'énergies fluctueront.

En l'état actuel des choses, une combinaison de chauffage solaire et au bois chauffe les maisons troglodytiques dans la plupart des régions où celles-ci sont implantées.
Les cheminées, qui sont souvent considérées comme des sources de gaspillage d'énergie dans les bâtiments situés en surface, sont plus efficaces sous terre. Les poêles à bois métalliques et les brûleurs à charbon sont évidemment encore de meilleures solutions pour le chauffage d'un habitat souterrain.

Isolation

La chaleur peut facilement être conduite hors des parties de la maison qui ne sont pas enterrées, en particulier à travers le béton, la maçonnerie et le métal. Pour empêcher ces veines de chaleur de laisser échapper le flux de chaleur de l'enveloppe de l'habitat enterré, des ruptures thermiques doivent être installées partout où les prolongements des murs intérieurs entrent en contact avec l'air extérieur. Ainsi, l'isolation doit envelopper tout le bâtiment, y compris le toit, le plancher, les murs et, si nécessaire, le débord de toit. La chaleur monte, par sa densité, il est donc préférable d'isoler un plafond plutôt qu'un plancher pour éviter des pertes de chaleur à l'intérieur d'un habitat troglodytique.

Une isolation supplémentaire doit être placée sur un mur adossé à une paroi en pierre afin que celle-ci ne puisse pas absorber la chaleur de la maison par conduction. L'isolation souterraine est plus efficace lorsqu'elle est placée à l'extérieur de la structure plutôt qu'à l'intérieur, cela permet aussi d'éliminer les problèmes de condensation.

Volets

Le vitrage est de loin la plus grande source de perte de chaleur de la plupart des maisons.
En effet, lorsqu'il n'y a pas de soleil, les fenêtres destinées à capter l'énergie solaire se transforment en larges ouvertures pour la chaleur qui s'échappe. Dans ces moments-là, le verre doit être recouvert d'un matériau isolant. Les volets intérieurs retiennent bien la chaleur, mais les volets extérieurs qui s'ajustent parfaitement au verre offrent un avantage. En effet, ils permettent au verre de rester à température ambiante. Tant que le vitrage reste chaud, il ne peut pas accumuler de condensation, qui peut se transformer en givre obstruant le flux de rayonnement solaire lorsque le soleil réapparaît.

Ventilation

Les sceptiques s'inquiètent de l'air vicié, des odeurs de cuisine et des odeurs de salle de bain dans une maison souterraine. Craintes infondées car celles-ci sont éliminées par des ventilateurs d'extraction et des conduits de cheminée, comme dans n'importe quelle autre maison. En effet, au sein d'un habitat souterrain, les portes s'ouvrent, les fenêtres s'ouvrent et les puits de lumière peuvent aussi s'ouvrir.

Les puits de lumière dans le toit d'un habitat troglodytique peuvent être situés au niveau du point le plus haut du bâtiment. L'air chaud, montant le long de cette voie d'évacuation, aspirera l'air plus frais dans la maison par le bas même en l'absence de brise.

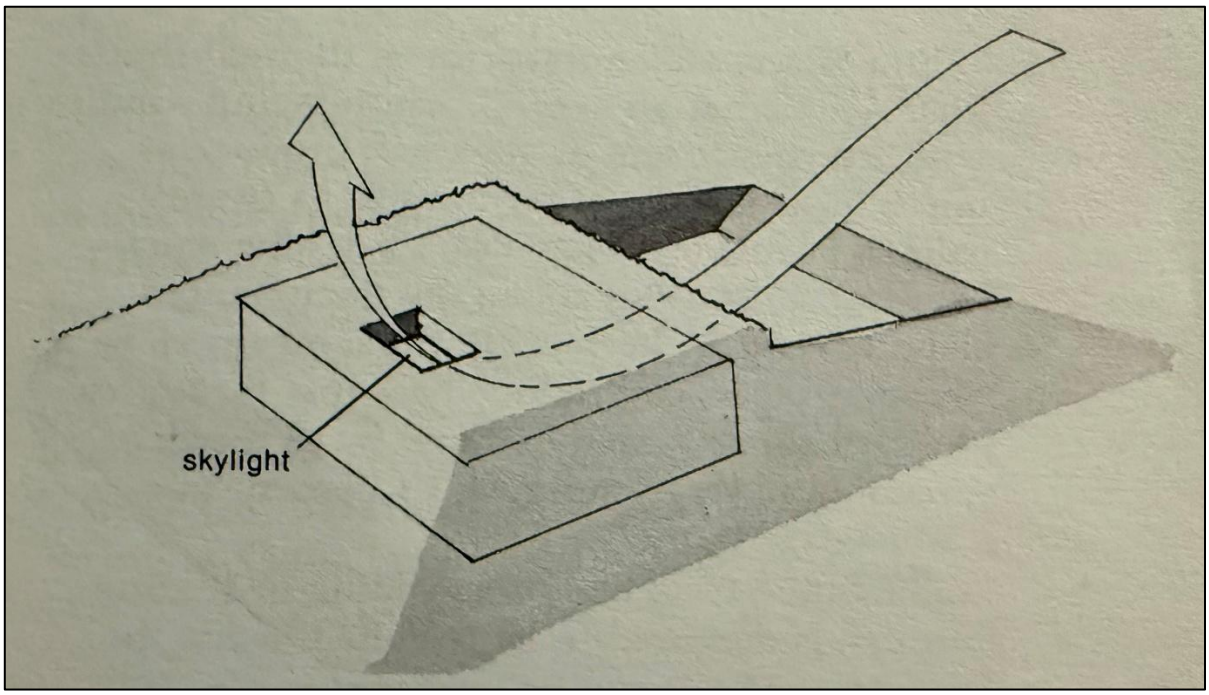


Figure 289 : En été, les puits de lumière ouverts aspire l'air frais dans la maison au niveau de la façade avant tandis que l'air chaud monte et est amené à l'extérieur de la structure par ces conduits.

D'autre part, les futurs maisons enterrées contemporaines seront équipées de « tuyaux géothermiques », un labyrinthe de tubes souterrains dans le sol près de la maison qui stockeront l'air frais pour l'été et l'air chaud pour réchauffer les personnes durant l'hiver.

Condensation et contrôle de l'humidité

Des gouttes d'eau peuvent se former sur toute surface plus froide que l'air humide adjacent. En été, les parois souterraines froides peuvent réduire le volume d'air adjacent, provoquant de la condensation. En hiver, un film humide de condensation se formera et gèlera à l'intérieur des vitrages mal isolés.

La condensation peut devenir un problème si une maison est maintenue exceptionnellement fraîche pendant une période de forte chaleur, puis soudainement ouverte à un courant d'air chaud et humide. Une ventilation réfléchie devrait empêcher ce type d'humidification et tous les dommages qui en résultent.

L'humidité résiduelle dans les murs, une mauvaise étanchéité à l'eau et à la vapeur, le lavage, la transformation des aliments, la cuisine, le nettoyage, la transpiration, les plantes qui transpirent, l'eau stagnante et même la respiration normale augmentent le taux d'humidité dans une maison souterraine. Lorsque cela se produit en été, les gens ont plus chaud que d'habitude, même s'il n'y a pas d'augmentation de température.

3.2.3.8 Intérieurs

Facteurs psychologiques

Les quelques études réalisées sur l'impact psychique de la vie souterraine au milieu des années 1970 ont donné des résultats mitigés. Le psychologue Paul Paulus, de l'Université du Texas, remarque : « *Les occupants peuvent avoir des sentiments positifs quant à l'unicité et à la qualité esthétique de leur environnement, ainsi qu'aux économies d'énergie. En revanche, il est possible que les individus aient des réactions négatives ou phobiques au fait de se trouver dans des bâtiments souterrains. Des entretiens informels menés par Sommer en 1974 suggèrent que la plupart des individus réagissent négativement au travail dans des environnements souterrains. Ils se plaignent souvent de se sentir enterrés. Cela peut être dû en grande partie à l'absence de fenêtres...*[1] ».

Stimulation visuelle et décorations

Le psychologue Paulus poursuit en disant : « Les personnes vivant dans des environnements sans fenêtres se plaignent souvent d'ennui en raison du manque de stimulation visuelle ».
De ce fait, toute conception souterraine doit comprendre des ouvertures offrant à la fois de la lumière et une vue sur le monde extérieur. En effet, vivre dans un espace qui ne s'ouvre que d'une seule extrémité peut devenir déconcertant et angoissant après seulement quelques jours.

D.Metz, à titre d'exemple, dans la maison Winston, a réussi à faire pénétrer la lumière par tout le mur sud et par les portes aux extrémités est et ouest. La salle à manger, la pièce la plus enfouie à l'intérieur de l'habitat enterré, se trouve directement sous un puits de lumière, représenté par une coupole en verre qui permet d'illuminer la pièce à toute heure de la journée.

D'autres réponses sont apportées par D.Metz à ce problème de stimulation visuelle.
Baldtop Dugout, niché confortablement au sommet de sa colline avec une vue à près de 360 degrés, reçoit la lumière de tous les côtés. Earthtech 5, ouvert sur deux murs, possède une source de lumière supplémentaire au-dessus de son entrée arrière, côté nord.

Frank Lloyd Wright a reconnu que le côté ensoleillé d'une maison partiellement enterrée pouvait bénéficier de vastes surfaces vitrées pour compléter son énorme masse thermique.
Les murs en pierre et les sols en béton étant chargés de chaleur par le rayonnement solaire pendant la journée, la nuit, les rideaux pouvaient être tirés afin de bloquer et restituer la chaleur l'intérieur de l'espace de vie.

Enfin, l'intérieur d'une maison semi-enterrée doit être sec, de couleur vive et bien ventilé.
En effet, les murs clairs réfléchissent et amplifient la lumière, tandis que les murs foncés l'absorbent.

1. Paul Paulus, « Sur la psychologie des bâtiments recouverts de terre », L'utilisation des bâtiments recouverts de terre, p. 66

Fenêtres

De manière générale, les fenêtres orientées au nord produisent presque toujours un flux de chaleur négatif s'éloignant de la maison, tandis que les fenêtres orientées au sud sont des capteurs de chaleur. En fait, une fenêtre située au nord d'un bâtiment peut perdre près de 20 à 35 fois plus de chaleur qu'une section isolée de mur souterrain de même taille. Les fenêtres orientées à l'est et à l'ouest, lorsqu'il n'y a pas de soleil, perdront environ dix fois plus de chaleur que le mur. Cela semble une raison suffisante pour installer de grandes fenêtres au sud et de très petites fenêtres au nord.

Comme toutes les maisons chauffées à l'énergie solaire, la conception souterraine doit tenir compte du soleil à différents moments de la journée et de sa hauteur au-dessus de l'horizon à tout moment de l'année. Cela aura un impact important sur la position, la hauteur des fenêtres et la longueur du débord de toit.

Une maison à deux étages avec un atrium aura besoin d'environ deux fois plus d'espace de cour et presque doubler la surface vitrée si l'on veut que suffisamment de lumière naturelle pénètre dans la maison. Un toit en pente sur une maison surélevée permet à la lumière basse d'hiver de pénétrer plus profondément dans ses pièces.

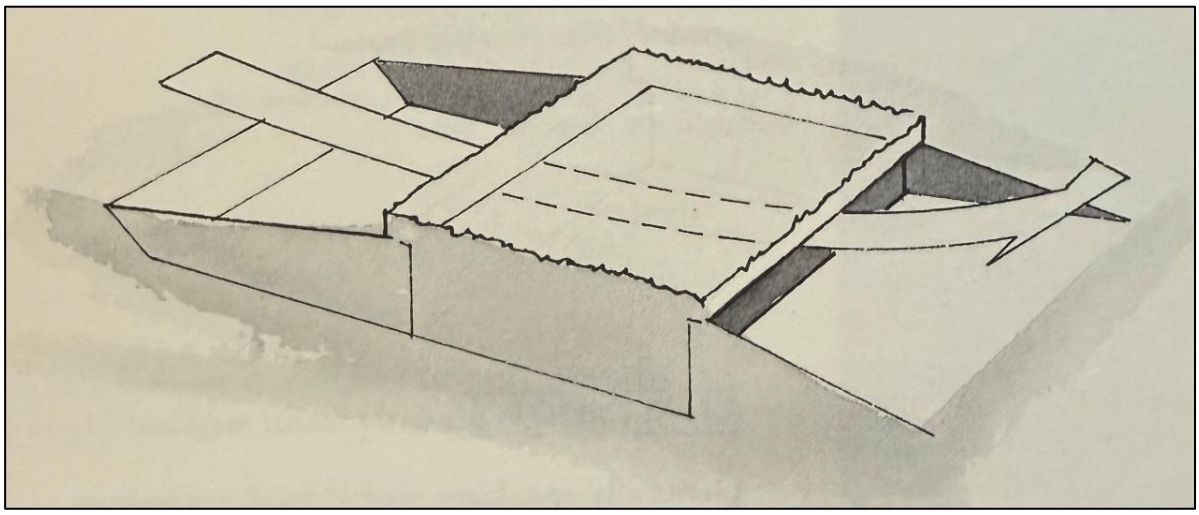


Figure 290 : Les petites fenêtres sur le côté nord d'une maison laisseront passer un peu de chaleur, mais elles apporteront une belle luminosité et garantiront une ventilation croisée.

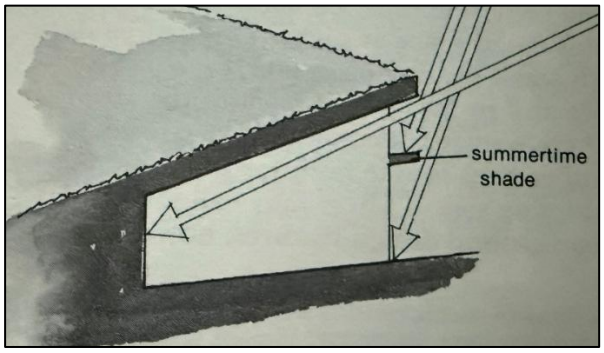


Figure 291 : Un toit en pente permet une forte pénétration solaire en hiver. Cependant, un dispositif d'ombrage supplémentaire peut être nécessaire dans ce cas.

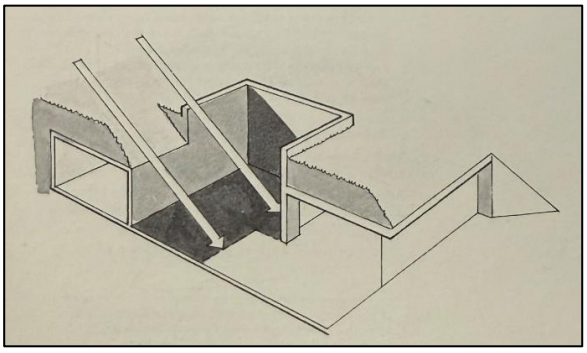


Figure 292 : L'éclairage naturel est limité par la hauteur et la configuration de la cour.

Puits de lumière

Les puits de lumière offrent une solution aux exigences du code du bâtiment qui insistent sur le fait que chaque pièce habitable doit être éclairée naturellement. Cependant, il faut comprendre que le puits de lumière est une solution, mais pas toujours la meilleure. En effet, dans certains cas, il représente un point faible dans la capacité de rétention de chaleur de la maison.
Un atrium vitré, comme celui de John Barnard dans l'Ecology House crée toutefois un solarium au cœur même de l'espace de vie.

Lorsqu'ils sont placés au-dessus d'une partie chauffée d'une maison souterraine, les puits de lumière doivent être massivement isolés, soigneusement étanchéifiés et imperméabilisés. D'autre part, un puits de lumière situé dans les coins reculés d'une maison souterraine doit être obligatoirement de type « ouvrant », c'est-à-dire qu'il peut être ouvert pour la ventilation naturelle de l'habitat ou servir d'issue de secours en cas d'incendie.

Les puits de lumière « directionnels », orientés au sud, à l'est ou à l'ouest, utilisent un vitrage vertical plutôt qu'horizontal afin de conserver au mieux la chaleur à l'intérieur de l'habitat.
Les fenêtres en forme de périscope sont plus faciles à isoler. Elles peuvent être des sources de chauffage efficace en hiver et peuvent être ombragées par un avant-toit pour ne fonctionner que comme des aérations et des sources de lumière pendant l'été.

Les « puits de lumière » de la maison Winston par exemple, sont des puits de lumière directionnel orienté à l'est et à l'ouest, placés dos à dos. À l'exception des cheminées et du puits de lumière, le toit de la maison Winston est impossible à distinguer du champ à flanc de colline sur lequel elle se trouve.

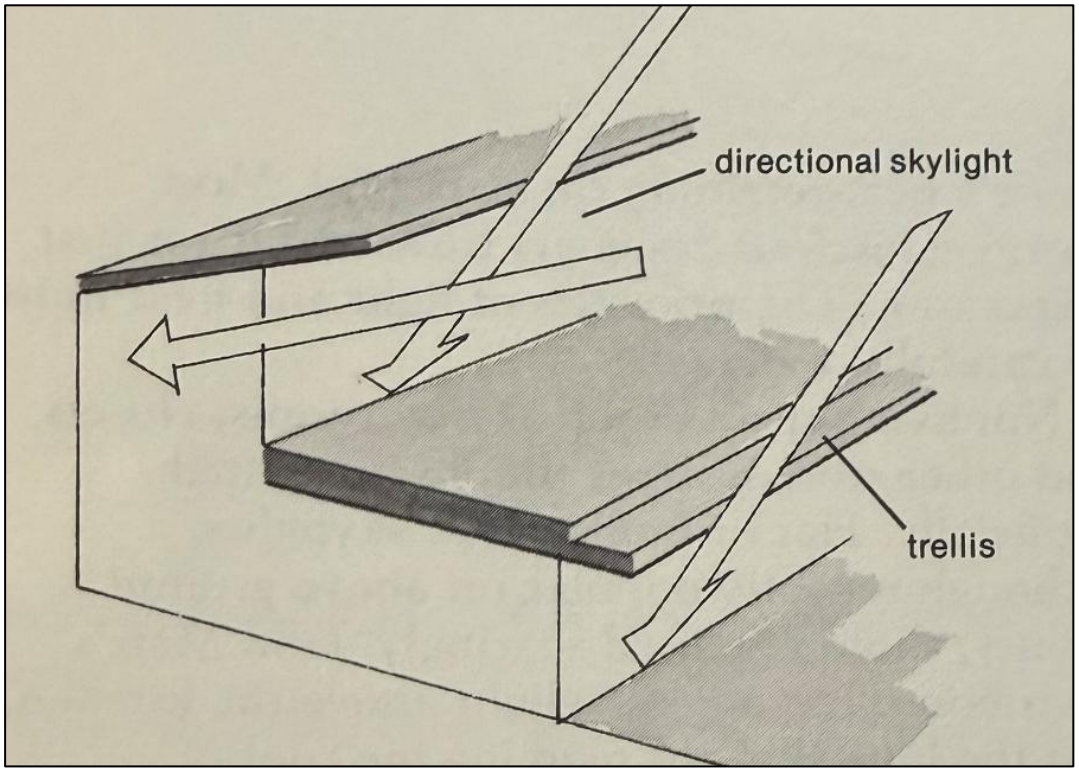


Figure 293 : Un treillis ne fait de l'ombre aux espaces intérieurs qu'en été. Les puits de lumière directionnels perdent moins de chaleur que les puits de lumière horizontaux.

3.2.3.9 Références d'architectes pionniers de la construction souterraine

Andy Davis

La grotte Davis possède des murs et un toit coulés sur place, deux grandes fenêtres rondes orientées à l'ouest. Les différentes roches et pierres incrustées dans les murs accentuent non seulement le décor primitif, mais augmentent également la masse thermique de l'habitation.

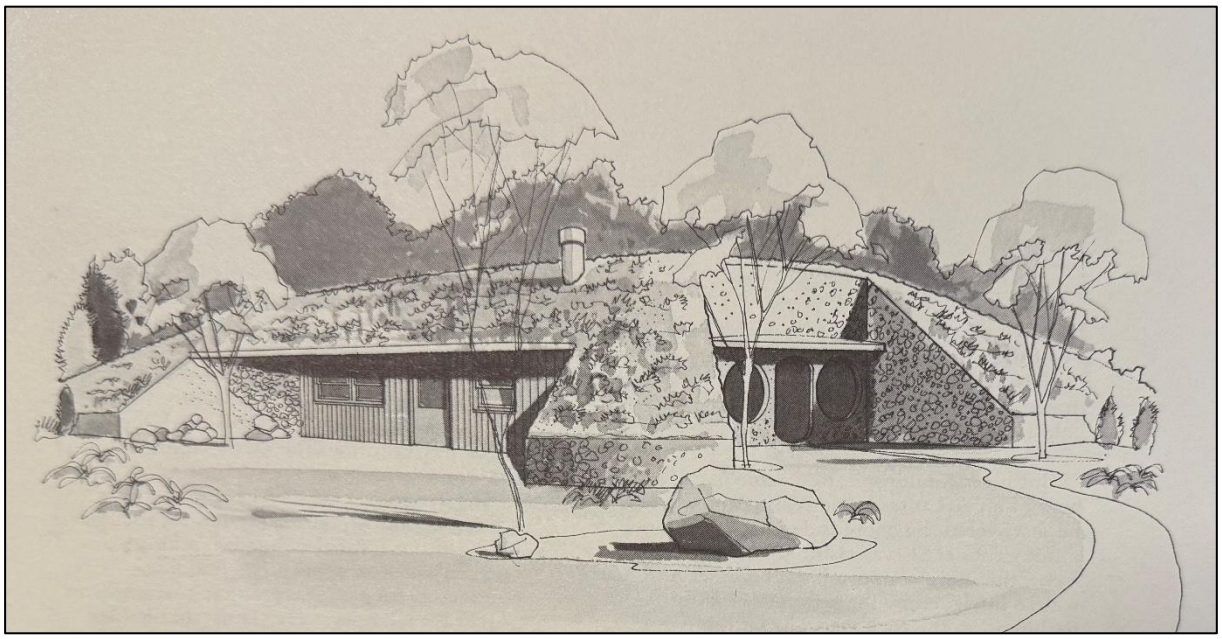


Figure 294 : Grotte Davis, Armington (Illinois), Andy Davis.

En parlant d'un épisode de pénurie de bois de chauffage lors d'une période de grand froid, Andy Davis raconte son expérience de vie au sein d'un habitat troglodytique : *« Nous n'avons perdu que 2 degrés par jour. Il faisait environ -30 degrés dehors, mais en quatre jours sans feu, la température à l'intérieur n'a baissé que de 21°C à 17°C* [1] ».

Andy Davis souligne que la différence de température entre la terre (généralement 13°C) et la température ambiante à l'intérieur de l'habitat troglodytique (21°C) est bien inférieure à la différence entre la température ambiante à l'intérieur de l'habitat troglodytique et celle de l'air extérieur, qui peut descendre bien en dessous de zéro.

Il témoigne également : « Les trois années que ma famille et moi avons passées dans notre habitat souterrain ont été les plus heureuses de ma vie. » Ainsi, Andy Davis encourage tout le monde à choisir ce qu'il appelle le « mode de vie » troglodyte.

1. Underground Space Center, Earth Sheltered Housing Design, p223.

Rob Roy

Les Roy sont indépendants et vivent dans l'habitat troglodytique de Log-End, creusée à flanc de colline à Murtagh Hill dans une communauté près de West Chazy, dans l'État de New York. A Murtagh Hill, il n'y a pas d'électricité, sauf celle produite par le vent.

La grotte Log-End comprend environ 85 m^2 d'espace habitable et a été entièrement construite pour moins de 8 000 $, en partie à partir de matériaux récupérés et recyclés.

D'imposants murs de soutènement en pierre et de lourdes poutres en bois caractérisent la structure. La façade sud de la maison, orientée par rapport à l'étoile polaire, est faite de vitrages intégrés dans un mur de style Tudor en maçonnerie de « bois de chauffage ».

Le chauffage solaire passif, le stockage de chaleur dans les murs et un « puits » de chaleur en maçonnerie au centre de l'espace de vie, permet au grand poêle de cuisine de la maison, sa seule source de chaleur principale, à alimenter l'ensemble de l'habitat enterré avec moins de 4 cordes de bois de chauffage par hiver. C'est ainsi que les Roy font d'énormes économies sur les dépenses d'énergies de leur habitat.

Les demandes de clients pour d'autres Log-End Caves affluent à Murtagh Hill, berceau d'un mode de vie souterrain axé sur le retour à la terre.



Figure 295 : Grotte Log-End, Murtagh Hill, West Chazy (New York), Rob Roy .
Source : motherearthnews.com

Malcolm Wells

Sa célèbre maison Solaria, construite à Indian Mills, dans le New Jersey ressemble, en coupe transversale, à un coin enfoncé dans la terre. La pointe arrière de la forme triangulaire est coupée, permettant la création d'un court mur nord avec de petites fenêtres pour l'éclairage naturel et la ventilation transversale.Les murs courts à l'avant et à l'arrière, comme ceux aux extrémités, sont en blocs de béton enduits de ciment imperméable. Le mur avant de cette conception semi-enterré comporte des fenêtres à battants pour la chaleur solaire passive, mais il sert également de support pour des capteurs solaires actifs. À l'intérieur de ces capteurs solaires de type collecteurs, l'eau ruisselle sur des plaques de métal noirci enfermées dans du verre. Une fois chauffée au contact du métal, l'eau est ensuite transportée vers d'autres parties de la maison. Ceci, combiné aux 60 cm de paillis de gazon sur le toit, a fait de Solaria un prototype pour toute une génération de maisons semi-enterrées chauffées par le soleil.

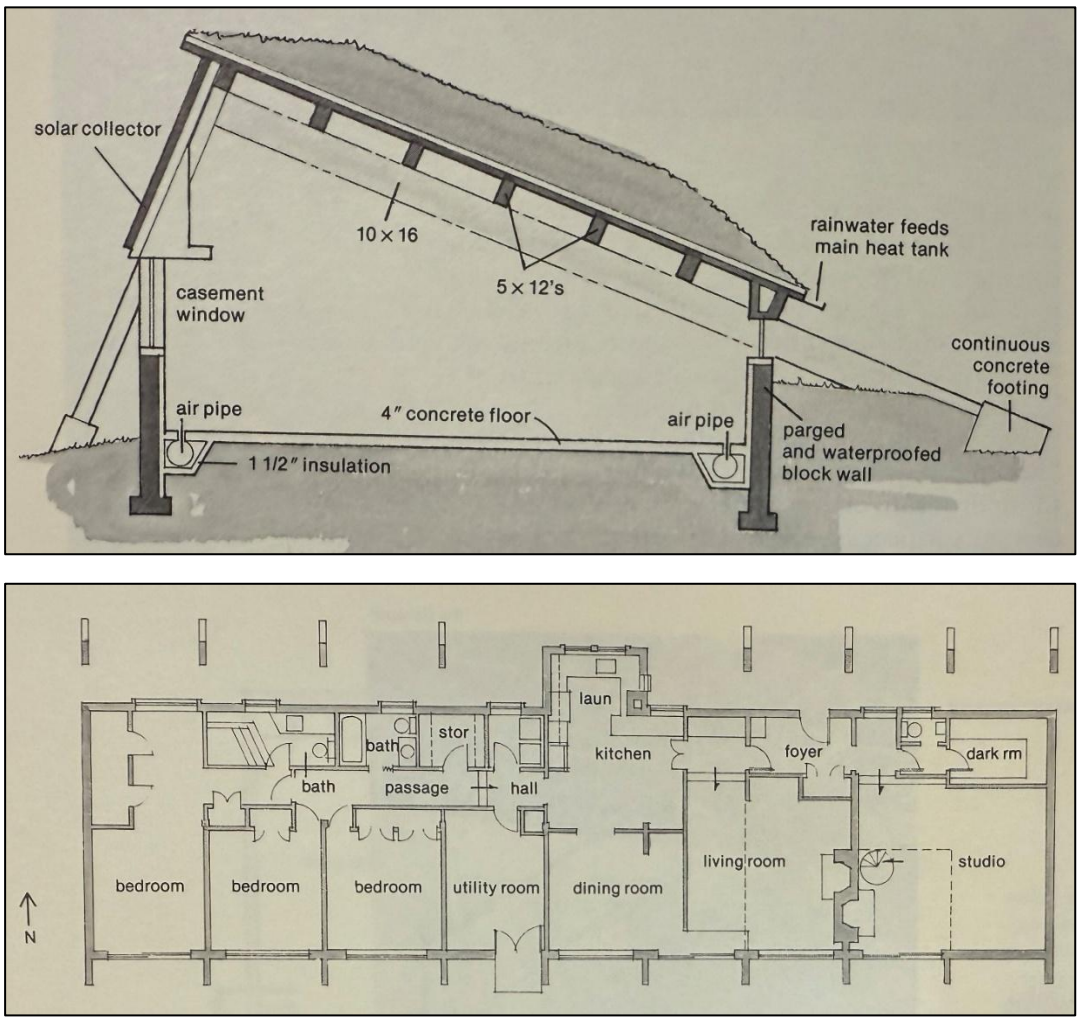


Figure 296 : Solaria House, Malcolm Wells, Coupe transversale et plan d'étage

L'intérieur est ouvert, lumineux et décoré sous des poutres de toit en bois teinté. Néanmoins, le plan d'étage de 260 m^2 succombe au pragmatisme des pièces alignées généralement associé aux conceptions de façades. La monotonie de l'aile des chambres est rompue par une variation de niveau de sol dans le couloir. Le salon et le studio à l'extrémité opposée de la maison sont également en contrebas du niveau du hall d'entrée.

John Barnard Jr

Le nom de John Barnard est généralement associé à des conceptions de type cour ouverte et atrium adaptées aux terrains plats. Il assimile la construction souterraine à une utilisation plus intelligente des terres. La série de maisons Ecology House est née de la propre maison de vacances de l'architecte, d'une superficie de 111 mètres carrés, construite en 1973.

L'Ecology House est recouverte de 25 à 40 cm de terre. Barnard y inclut la climatisation.
La première Ecology House comportait également un capteur solaire actif monté au sol comme système d'appoint pour une chaudière à air chaud pulsé. Toutes les cheminées, les conduits et les aérations passent par les murs latéraux au lieu du toit, ceci afin d'empêcher l'eau de s'infiltrer et l'air chaud de s'échapper à l'extérieur de la structure de la maison.

L'affirmation bien connue de John Barnard selon laquelle ses maisons souterraines permettent au propriétaire d'économiser 25 % sur les coûts de construction, 75 % sur les coûts énergétiques et près de 100 % sur les frais d'entretien, a longtemps été utilisée comme argument par ceux qui défendent l'habitat souterrain.

Toutefois, la cour centrale, à moins qu'elle ne soit couverte peut avoir des problèmes avec les vents tourbillonnants et la neige. L'atrium peut également causer de sérieux problèmes d'humidité, surtout si la maison est creusée sur un site où la percolation du sol est faible.

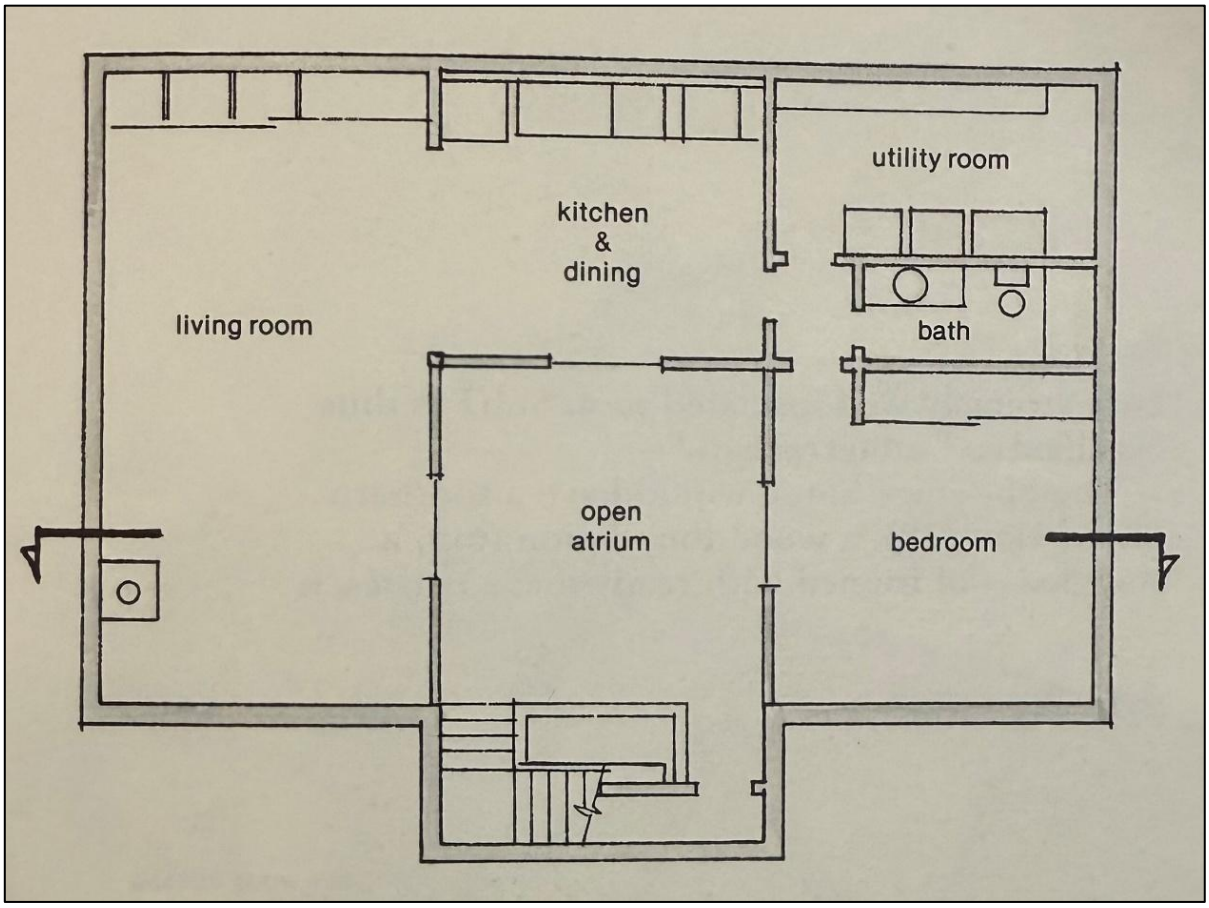


Figure 297 : Ecology House, John Barnard, Plan d'étage.

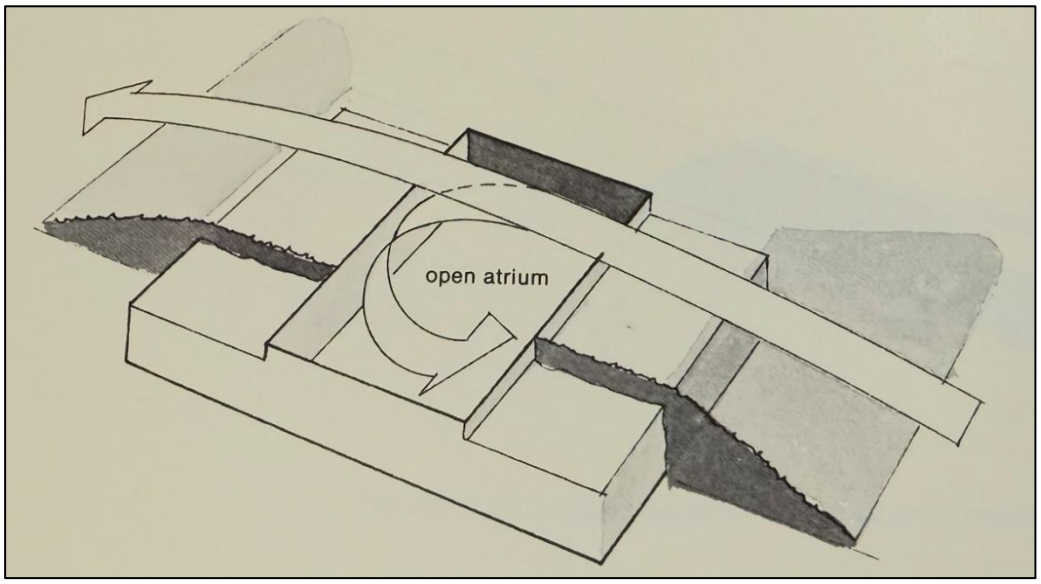


Figure 298 : Une cour ouverte est comme une immense verrière. Parfois, c'est la seule source de lumière naturelle et de ventilation de la maison. À d'autres moments, elle peut être une source de turbulences dues au vent.

Jeff Sikora

Jeff Sikora est concepteur en chef chez HRB (Housing Research and Building). Ses conceptions de petites maisons semi-enterrées, peu coûteuses, utilisent intelligemment l'espace.

Jeff Sikora prédit que de nombreuses maisons souterraines solaires du futur seront équipées d'un poêle à bois en céramique au centre de la maison avec un chauffage d'appoint électrique. Il affirme également que les logements souterrains seront les logements idéals pour les familles à revenus modeste : intimité garantie, économies d'énergie et possibilité d'utilisation de terrains constructibles peu attrayants sont les principaux arguments de vente.

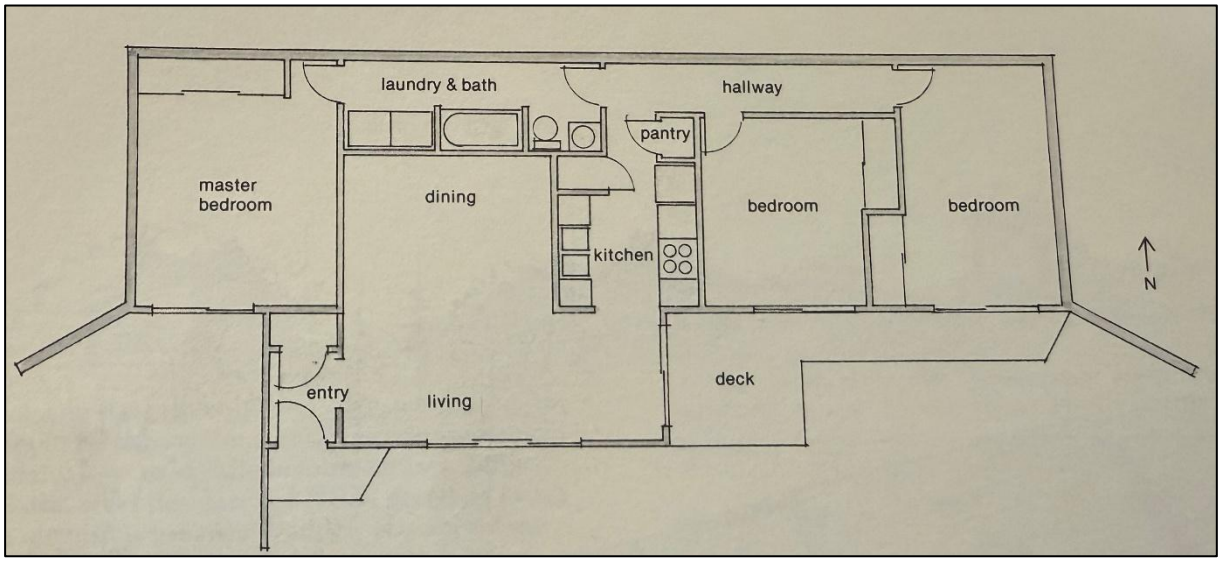


Figure 299 : SubTHouse, Jeff Sikora, Plan d'étage.

Donald Metz

La Winston House a été construite en 1972. Demandez à M. Winston, lui-même architecte, si un poêle à bois serait plus efficace que la cheminée du salon, et il vous répondra : *« Non. La maison conserve si bien la chaleur que je ne m'inquiète pas trop des éventuelles pertes de chaleur par la cheminée ».*

Chacune des maisons Metz a des points communs. En effet, toutes ont des fenêtres orientées au sud sous des avant-toits et des masses de maçonnerie retenant la chaleur à l'intérieur. Certaines parties des sols sont carrelées, ce qui permet d'accumuler la chaleur à l'intérieur du logement.

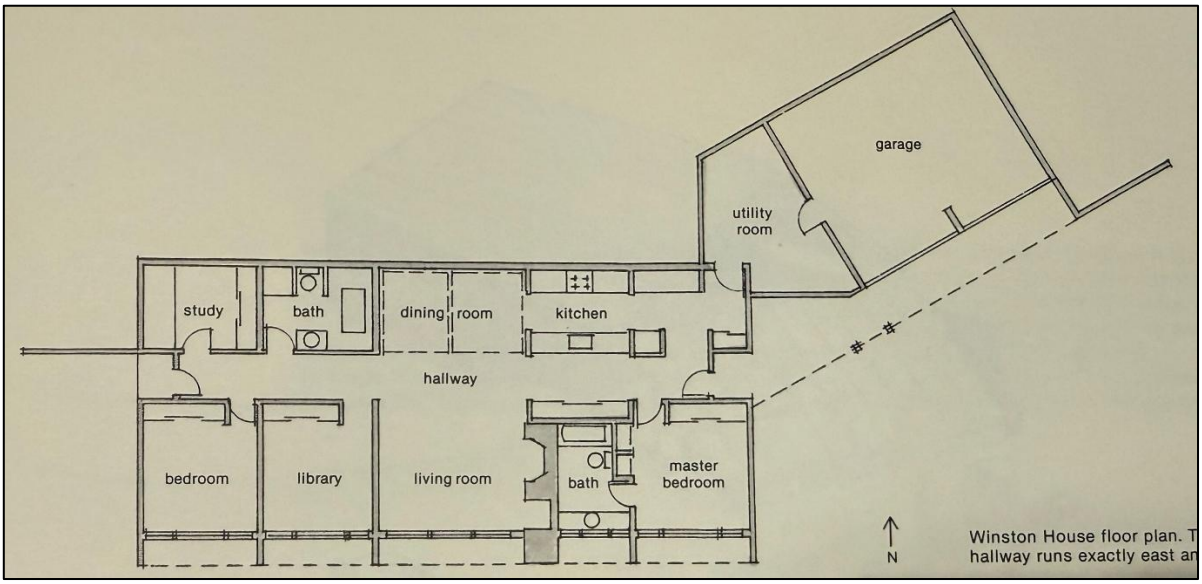


Figure 300 : Winston House, Donald Metz, Plan de la maison

L'une des dernières créations de Metz, la maison Alcorn, qui surplombe un marais salé à Cape Elizabeth, dans le Maine, est plus grande que la maison Baldtop Dugout, la maison Winston ou n'importe laquelle des maisons Earthtech qu'il a réalisé auparavant.

La maison comprend trois chambres, un bureau, deux salons, deux salles de bains, trois poêles, et deux puits de lumière. L'entrée se fait par une immense serre chauffée à l'énergie solaire, avec des plantes en culture à l'étage et un jacuzzi dans l'atrium inférieur. Le mur nord isolé de ce solarium est revêtu de réservoirs d'eau peints en noir mat pour fournir une masse thermique et renvoyer la chaleur vers cet espace lorsque le soleil ne brille pas. La façade de la maison présente trois surfaces vitrées distinctement orientées entre des ailettes saillantes : l'une reçoit la lumière du soleil le matin, l'autre à midi et la dernière l'après-midi.

Comme dans Baldtop Dugout, Metz juxtapose des murs courbes et des murs droits pour influencer le mouvement et agrémenter les espaces communs de plans inattendus.

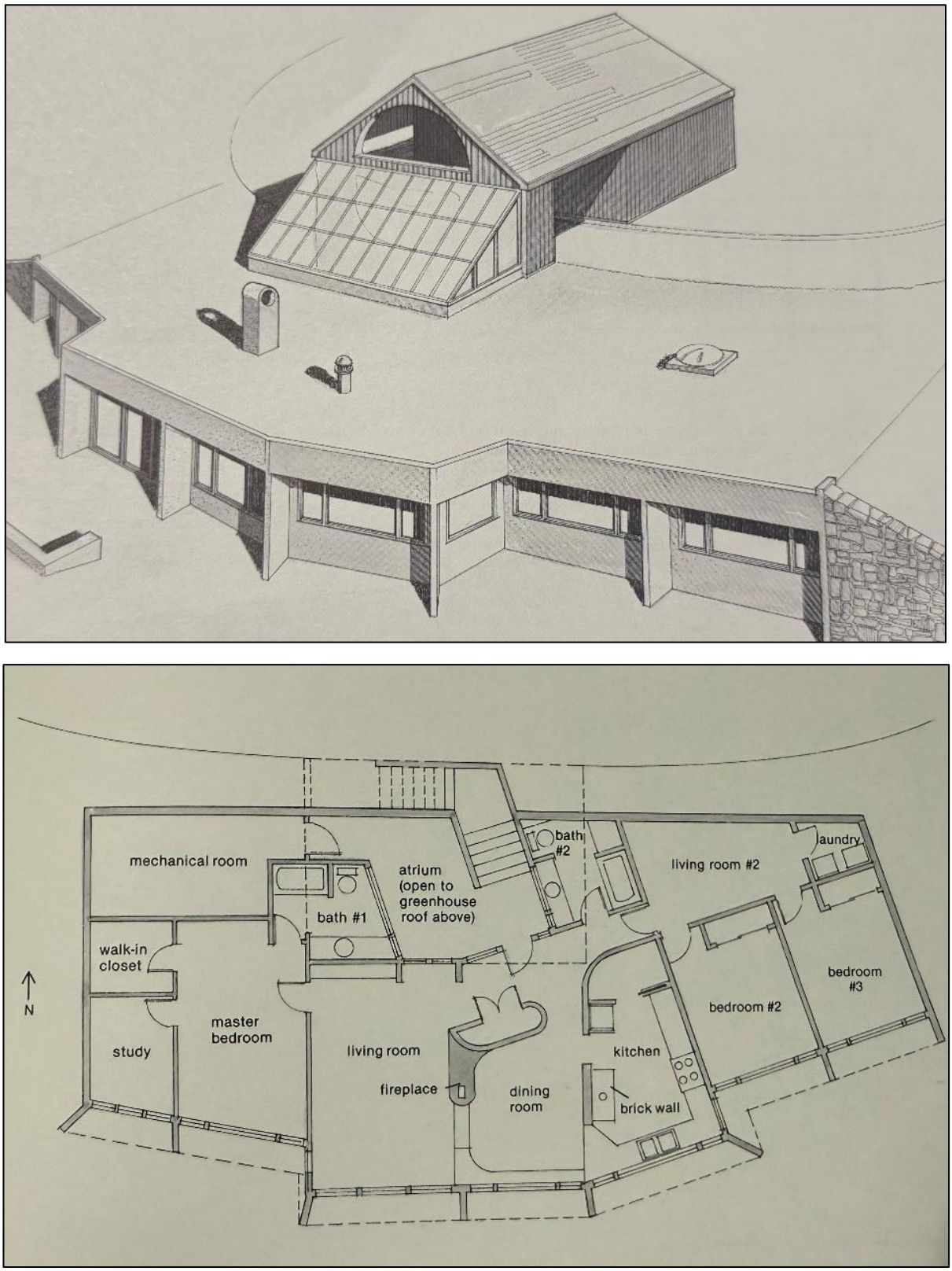


Figure 301 : Alcorn House, Cape Elizabeth (Maine), Axonométrie et plan d'étage

3.2.3.10 Etude de cas : Earthtech 6 de Stu Campbell

Emplacements

L'emplacement du terrain pour le concept de maison troglodytique Earthtech 6 de Stu Campbell est idéal. En effet, la pente du terrain est bien orientée au sud et les érables à l'ouest de la maison perdent leur feuillage chaque automne pour laisser passer le rayonnement solaire qui se dirige vers un mur vitré. D'autre part, selon les voisins, le soleil ne descend jamais en dessous du pinacle même à son altitude la plus basse en décembre ce qui permettra au soleil d'atteindre la maison n'importe quel moment de l'année.

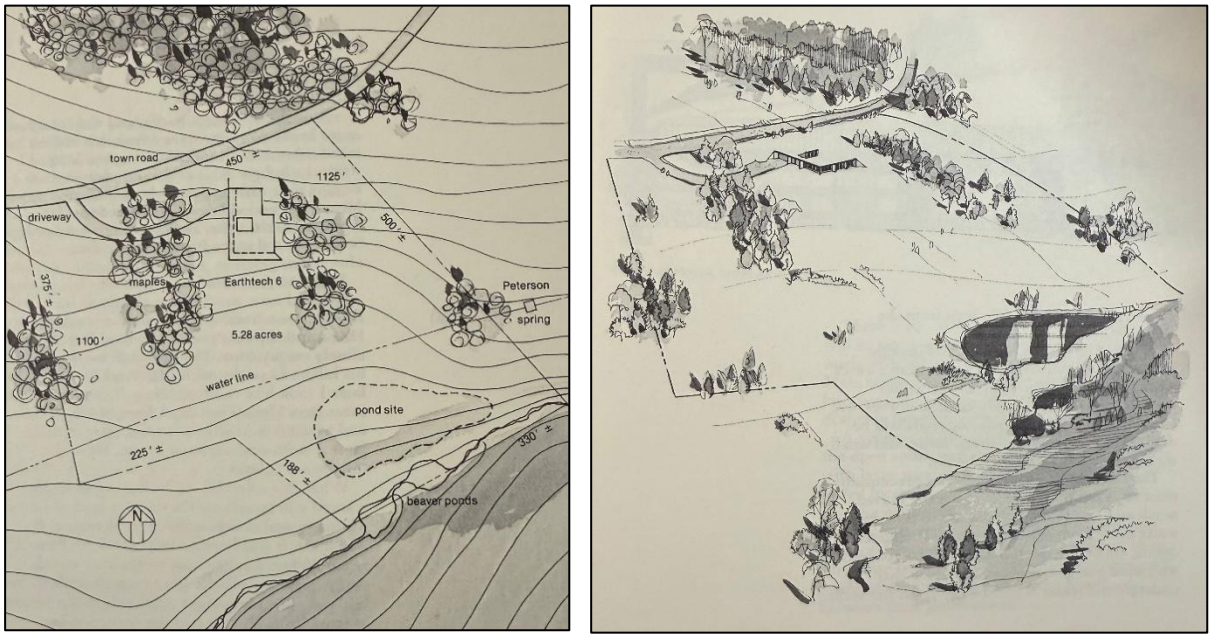


Figure 302 : Earthtech 6, Stu Campbell, Plan du site et axonométrie.

Réalisation

L'enveloppe de base de la maison ressemble à Earthtech 5 conçu par Donald Metz et est une maison souterraine à chauffage passif dont les murs sud et ouest sont vitrés.

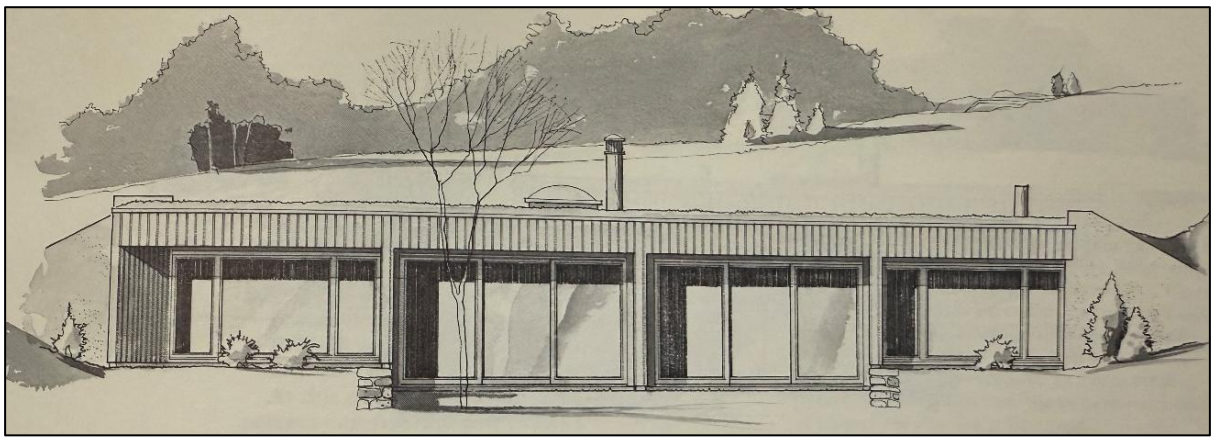


Figure 303 : Earthtech 5, Donald Metz, Lyme (New Hampshire), Elévation sud.

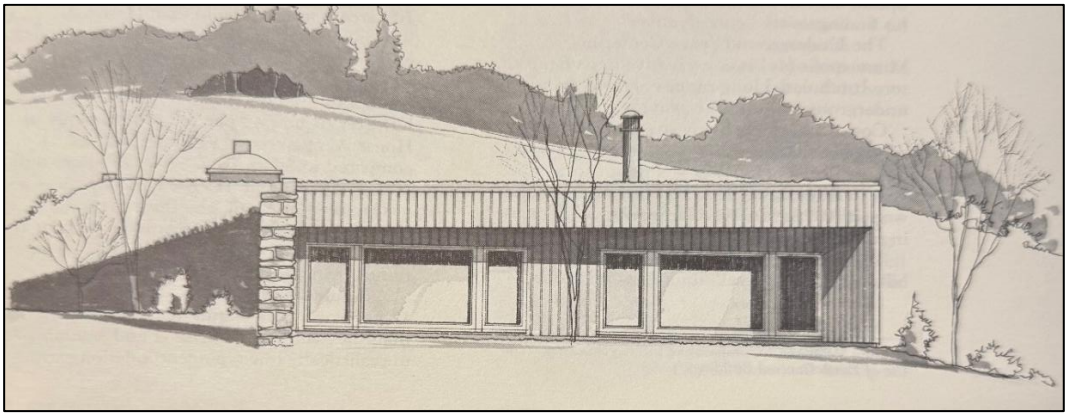


Figure 304 : Earthtech 5, Donald Metz, Lyme (New Hampshire), Elévation ouest.

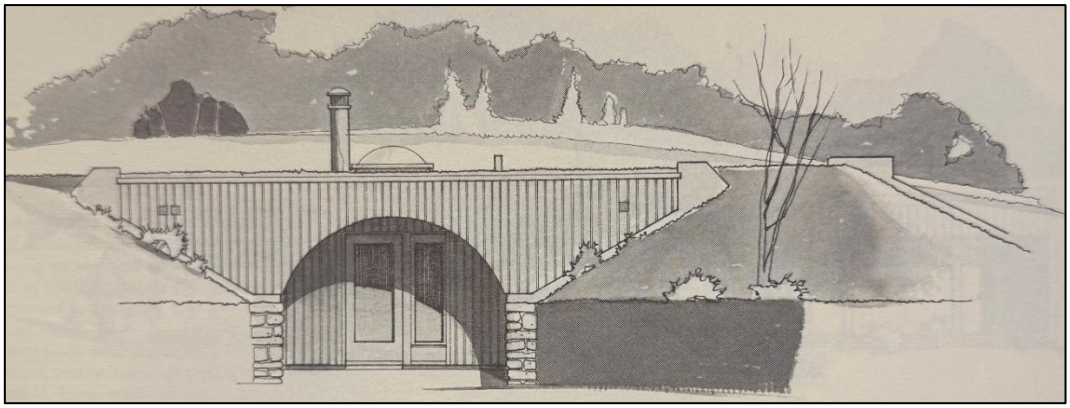


Figure 305 : Earthtech 5, Donald Metz, Lyme (New Hampshire), Elévation nord montrant l'entrée de l'habitat enterré.

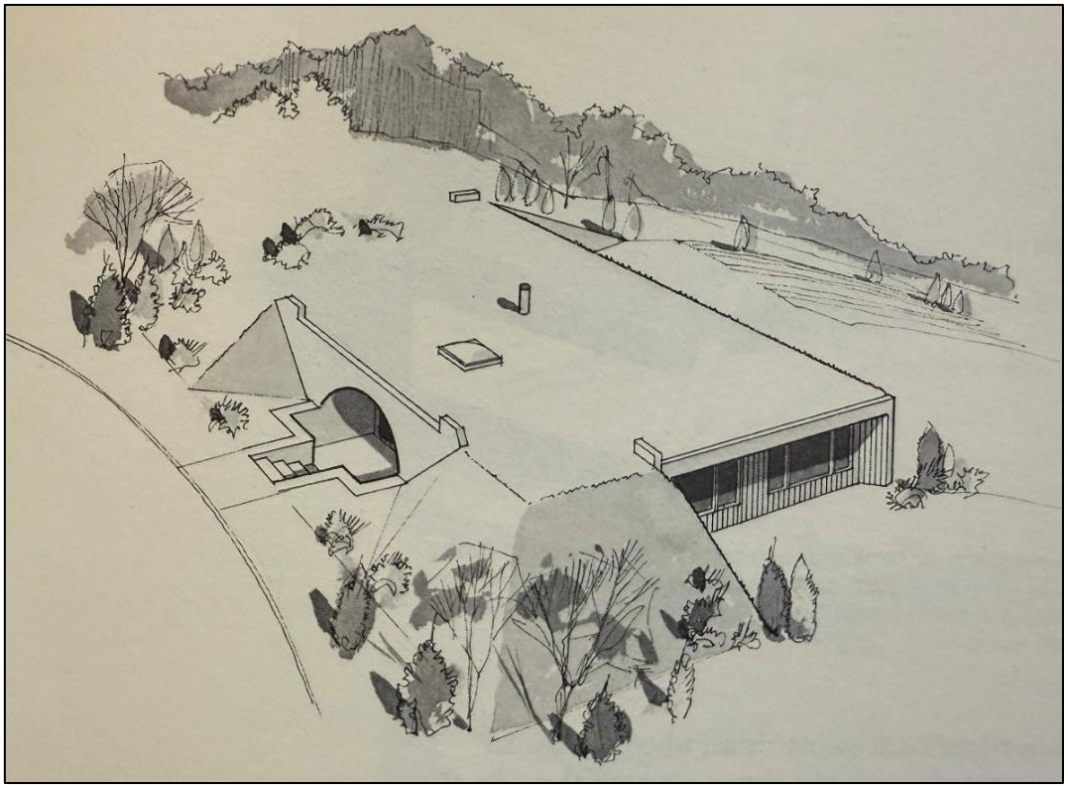


Figure 306 : Earthtech 5, Donald Metz, Lyme (New Hampshire), Axonométrie.

L'allée qui mène à la maison est relativement plate jusqu'à une double porte de garage située à flanc de colline, sous un avant-toit recouvert de lierre. L'entrée du garage et la porte d'entrée à sa droite sont toutes deux orientées à l'ouest. Le garage et la maison sont recouverts de terre, avec des toits essentiellement plats. Un « entonnoir de lumière », de forme triangulaire permet de relier ces deux éléments entre eux.

Le toit de cette longue lucarne directionnelle est incliné à vingt-deux degrés, soit l'altitude exacte du soleil à Stowe, dans le Vermont, lors du solstice d'hiver, le 21 décembre.
Ce petit toit en appentis est recouvert de bardeaux, tandis que les autres toits sont dissimulés par la végétation : herbe, fougères et petits arbustes, pour s'harmoniser avec le reste du terrain.

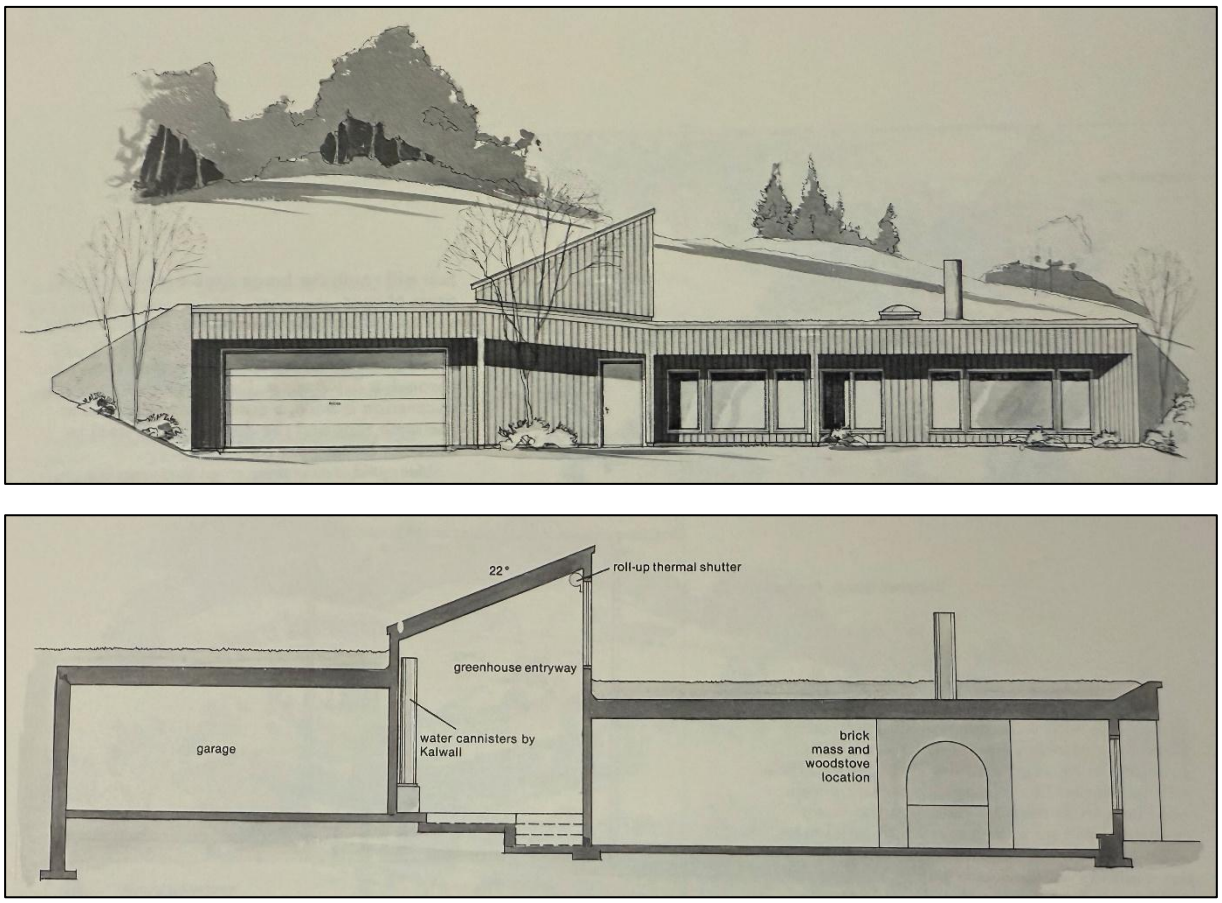


Figure 307 : Earthtech 6, Stu Campbell, Stowe (Vermont) Façade ouest et coupe transversal.

Les murs de la Earthtech 6, en béton armé coulé sur place, sont imperméabilisés à la bentonite. L'eau de pluie s'écoule dans des drains situés dans les murs intérieurs.

Les murs sud et ouest bénéficient de grandes baies vitrées pour capter la lumière et la chaleur du soleil. Ces ouvertures sont protégées par des ailerons et voilées par un avant-toit pendant les chaleurs estivale. Un puits de lumière plat est installé au-dessus de la cuisine, à côté d'une cheminée et de plusieurs conduits qui traversent également le toit.

Les invités qui arrivent en voiture peuvent accéder au niveau inférieur par une porte située à l'arrière du garage ou bien peuvent se garer à l'extérieur et arriver par la serre. Cette serre, en plus d'apporter lumière et chaleur à l'arrière de la maison, permet de cultiver quelques variétés de légumes tout au long de l'année. Le local technique est éclairé par la serre à travers une fenêtre dépolie, tout comme le bureau-chambre, à travers un vitrail. Une fois à l'intérieur, ils descendent un escalier en biais pour accéder au vestibule en angle situé à l'arrière du salon.

Le mur nord, isolé de la serre, est revêtu de cylindres remplis d'eau afin de permettre d'augmenter la masse thermique du bâtiment. En effet, ces cylindres sont peints en noir pour absorber le rayonnement et retenir la chaleur du soleil.

Pour réguler la chaleur et réduire la surface exposée, les fenêtres du mur sud de cette véranda sont des fenêtres à double vitrage standard, montées verticalement. En été, elles peuvent être ouvertes pour aspirer l'air à l'intérieur de la maison et offrir ainsi une ventilation croisée au bâtiment, la chaleur montant par le puit de lumière.

En hiver, la lumière directe du soleil pénètre profondément dans la chambre principale, la salle à manger, le salon et la chambre d'amis par les murs sud et ouest. Ici, la chaleur du rayonnement solaire est stockée dans le béton, dans l'ardoise du sol, dans les poutres massives du toit et dans la grande arche en maçonnerie au-dessus du poêle à bois central.

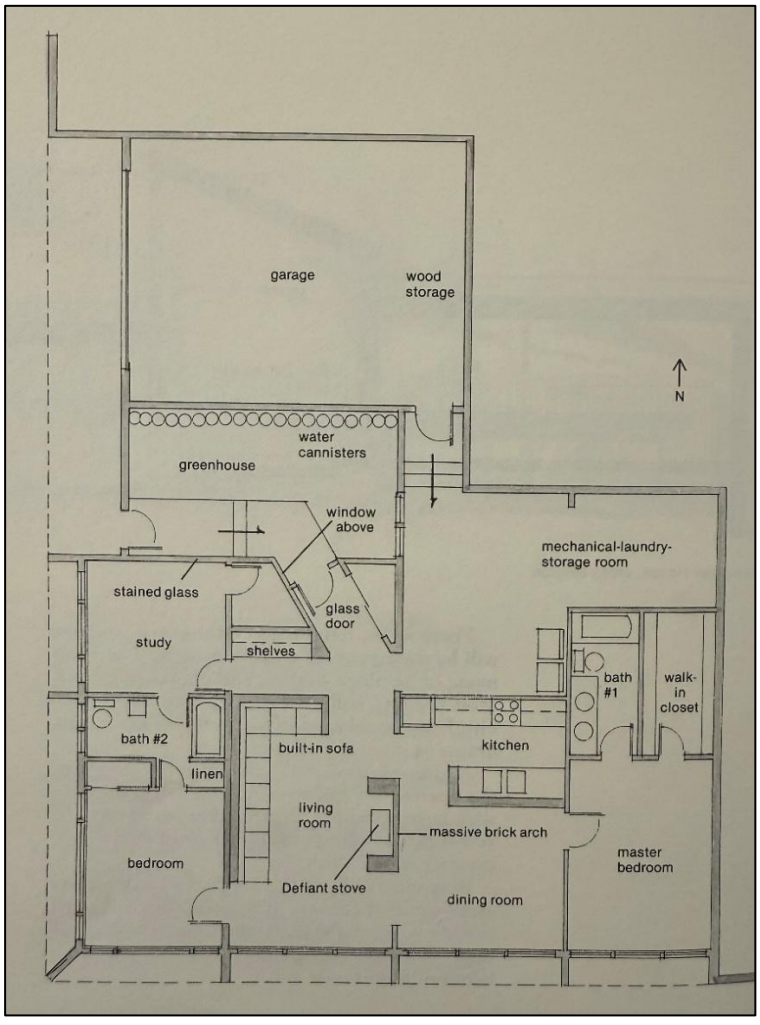


Figure 308 :
Earthtech 6, Stu Campbell, Plan d'étage.

3.2.3.11 Pour approfondir...

3.2.3.11.1 Où isoler les bâtiments semi-enterrés

Introduction :

L'intérêt pour les maisons semi-enterrées est principalement dû aux économies d'énergie substantielles qu'elles permettent de réaliser par rapport aux meilleures structures conventionnelles. Dans la construction hors sol, l'énergie est gaspillée par le chauffage et le refroidissement indésirables de l'environnement. En réduisant le transfert de chaleur vers et depuis l'environnement, moins d'énergie est nécessaire pour maintenir les conditions climatiques souhaitées à l'intérieur d'un logement.

La perte ou gain de chaleur d'une structure dépend principalement de deux facteurs : la charge de ventilation pour le chauffage ou le refroidissement de l'air entrant et la transmission de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment.

Dans la plupart des habitations, la charge de ventilation consiste en une infiltration d'air incontrôlée à travers des fissures ou des trous. Ces pertes de chaleur par infiltration indésirables sont pratiquement éliminées dans une construction enterrée.
L'air de ventilation peut alors être contrôlé afin que les systèmes de récupération de chaleur puissent être utilisés efficacement pour transférer la chaleur de l'air extrait à l'air entrant.

Les pertes par transmission dépendent de la quantité de chaleur conduite à travers l'enveloppe de la structure. Ceci est une fonction du coefficient de transmission thermique, qui est réduit par l'ajout d'isolant dans la structure du bâtiment, et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du mur.

En surface, la différence de température est déterminée par les conditions météorologiques locales. La terre, elle, permet de réguler les fluctuations de température quotidiennement et annuellement. Les fluctuations des températures saisonnière atteignent une profondeur de plusieurs mètres dans le sol. Cependant la pénétration des fluctuations de température dans la terre à court terme sur des périodes de quelques heures ou jours est presque négligeable.
À des profondeurs de 3 mètres ou plus, la température ne fluctue que très légèrement de part et d'autre d'une valeur constante de quelques degrés au-dessus de la moyenne de température annuelle de la terre qui est de 13°C.

Lorsque le vent souffle contre une maison hors sol, une zone de haute pression se forme du côté exposé au vent, forçant inévitablement l'air froid à passer au travers toutes les fissures, tandis qu'une zone de basse pression se forme du côté sous le vent, aspirant l'air chaud hors de la maison. En plus de l'infiltration accrue, le vent souffle continuellement sur la couche superficielle d'air qui a été réchauffée par conduction à travers le mur, cela augmente le coefficient de transfert de chaleur de surface et davantage de chaleur est donc perdu par conduction en raison de ce facteur de « refroidissement éolien ». Les maisons semi-enterrées ont beaucoup moins de surfaces exposées, donc ces effets sont considérablement réduits.

Enfin, un facteur important pour contrôler l'énergie nécessaire au chauffage ou à la climatisation d'un bâtiment est la « masse thermique », ou capacité thermique totale.

Un bâtiment doté d'une grande masse thermique dans son isolation peut stocker une grande quantité d'énergie. Ainsi, pendant la journée, l'énergie entrant par les fenêtres passives solaires du sud peut être stockée et la température augmentera légèrement et lentement tout au long de la journée. Pendant la nuit, il y aura une perte de chaleur nette de l'enveloppe du bâtiment et la chaleur sera transférée de la masse thermique à l'air intérieur, ce qui fera baisser lentement la température pendant la nuit. En revanche, un bâtiment à faible masse thermique ne peut pas stocker beaucoup d'énergie par degré d'élévation, et par conséquent, l'énergie solaire entrante chauffera rapidement le bâtiment à une température inconfortablement élevée, ce qui peut entraîner un besoin de refroidissement local. Comme peu d'énergie est stockée, la température baissera également rapidement pendant la nuit et un chauffage plus important sera nécessaire.

Le sol et la terre entourant un bâtiment enterré constitue une grande masse thermique qui réduit la variation de température ressentie par la structure extérieure et peut être utilisé pour le stockage passif de l'énergie solaire. En plus de ces avantages énergétiques, la terre protège le bâtiment de la dilatation, de la contraction, et surtout des dommages causés par le gel/dégel.

Il convient également de souligner qu'en cas de panne de courant par temps extrêmement froid, la température à l'intérieur d'un bâtiment protégé par la terre sera toujours supérieure à 10 °C même sur de longues périodes. Les bâtiments de surface dans des conditions climatiques similaires voient rapidement leur température chuter. Ainsi, les canalisations gèlent, causant d'importants dégâts, et le bâtiment devient inhabitable en quelques heures. La protection par la terre réduit donc la dépendance à une source d'énergie externe et permet d'apporter des réponses aux questions de contrôle du confort intérieur d'un habitat ou répondre aux problématiques de survie dans des régions aux conditions climatiques extrêmes.

Comparaison énergétique :

Les avantages en matière d'économie d'énergie des maisons semi-enterrées peuvent être illustrés en comparant la consommation énergétique totale hivernale et estivale de maisons à un ou deux niveaux construites hors sol et en sous-sol[2]. Les valeurs utilisées concernent Minneapolis (Minnesota) à 44° de latitude nord.

Les gains/pertes de chaleur par les fenêtres, les murs et le toit des maisons hors sol et du mur sud de la maison semi-enterrée ont été calculés à l'aide des données de l'ASHRAE[3].
Les fenêtres à double vitrage du côté sud représentaient 35 % de la surface du mur sud.

Il convient de noter que les valeurs énergétiques de charge saisonnière sont basées sur la performance mensuelle moyenne des structures et que, par conséquent, ces valeurs constituent des estimations valides du coût énergétique saisonnier pour chaque structure et une bonne base de comparaison.

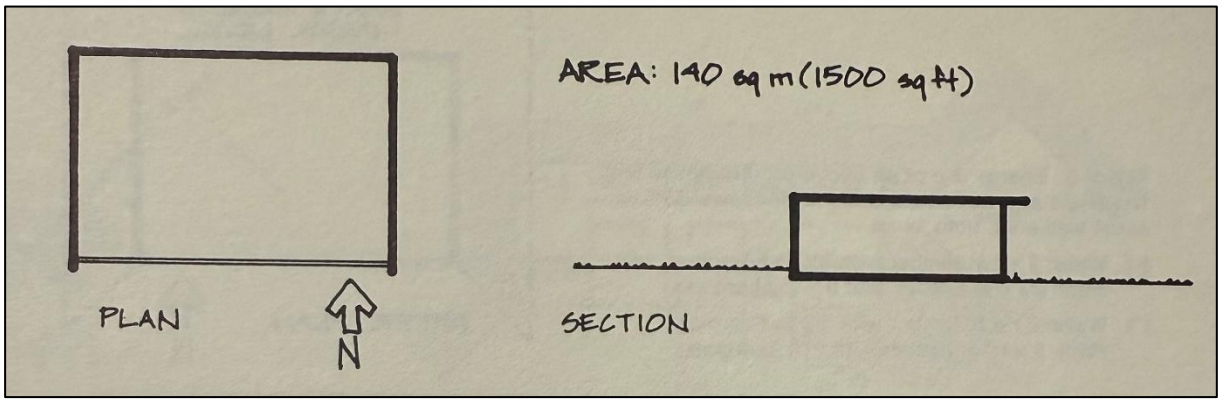
Si de véritables fluctuations de température extrêmes avaient été enregistrées, les structures semi-enterrées auraient été encore plus compétitives, car les variations quotidiennes de température ont peu d'impact sur les structures à forte inertie thermique.

1. T.P. Bligh. « Energy Conservation by Building Underground », Underground Space, vol. 1, n° 1, 1976, p. 19-33.
2. « Earth-Sheltered Housing Design-Guidelines, Exemples et Références, University of Minnesota, Minneapolis, 1978.
3. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. Handbook of Fundamentals. 1972.

Le sol réduit considérablement l'amplitude des variations de température de l'air et produit un déphasage, de sorte que la perte par conduction maximale dans un bâtiment souterrain ne se produit pas en même temps que la charge maximale due à l'infiltration d'air froid et à la ventilation.

Le premier exemple compare une maison conventionnelle de plain-pied de 140 m^2, hors sol, sur dalle (figure 1), à une structure similaire semi-enterrée, illustrée à la figure 2.

La structure semi-enterrée a de la terre placée contre les murs nord, est et ouest, et le toit est constitué de 50 cm de terre placée sur 10 cm d'isolant en polystyrène sur une dalle de béton préfabriquée de 20 cm. Le même isolant est placé contre les 155 cm supérieurs du mur avant le remblayage. Pendant les mois d'hiver, la température intérieure a été maintenue à 20 °C, et pendant l'été à 25,6 °C.



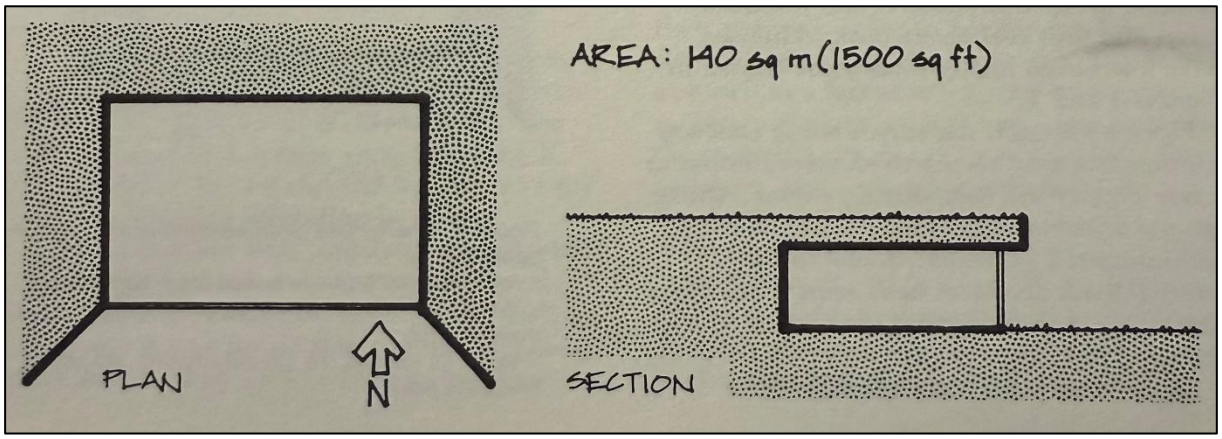
B-1	Hiver (kW.hr)	Eté (kW.hr)
Transmission	- 12 935	+ 3 658
Ventilation	- 1 544	- 1 544
Chaleur intérieur	+ 5 900	+ 1 700
Energie nette	- 8 579	+ 5 358

B-2	Hiver (kW.hr)	Eté (kW.hr)
Transmission	- 10 186	+ 3 173
Ventilation	- 1 544	- 1 544
Chaleur intérieur	+ 5 900	+ 1 700
Energie nette	- 5 830	+ 4 873

Figure 309 : Consommation d'énergie d'une maison hors sol, de plain-pied sur dalle.

B-1 : Murs : bois de 2x4 po avec 3 % de fibre de verre
Toit : bois de 2x6 po avec 5 % de fibre de verre

B-2 : Murs : bois de 2x6 po avec 5 % de fibre de verre
Toit : bois de 2x10 po avec 9 % de fibre de verre



	Hiver (kW.hr)	Eté (kW.hr)
Transmission	- 4 043	- 969
Ventilation	- 1 544	- 1 544
Chaleur intérieur	+ 5 900	+1700
Energie nette	+ 313	+ 731

Figure 310 : Consommation d'énergie d'une maison semi-enterrée, de plain-pied.

Murs : terre, 10 cm de polystyrène sur 155 cm à partir du haut du mur.
Toit : 50 cm de terre, 10 cm de polystyrène, 20 cm de dalle de béton.

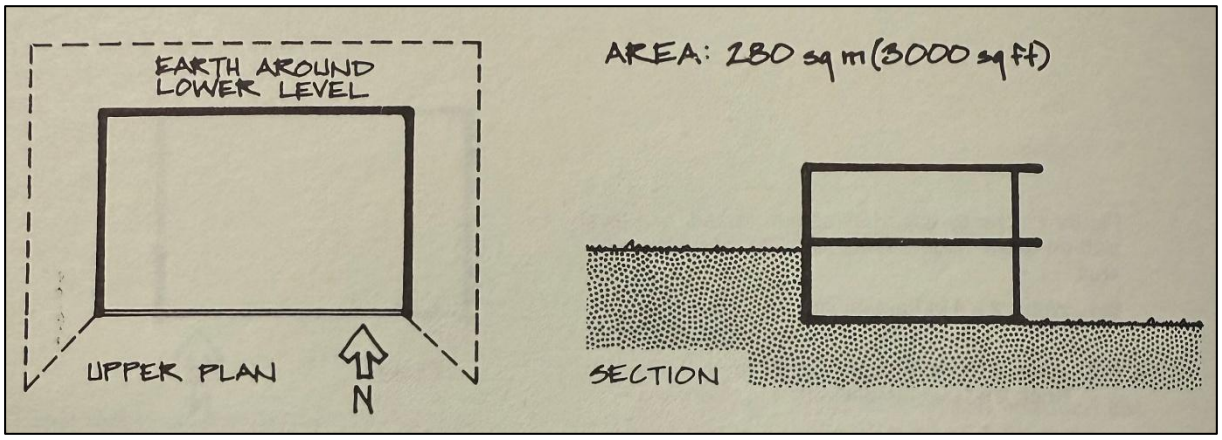
Notez que les pertes de transmission dans la maison semi-enterrée sont si faibles pendant l'hiver que la chaleur gagnée grâce à la charge solaire interne et aux fenêtres solaires passives est supérieure, en moyenne, aux pertes de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment.
Par temps nuageux et lors de vagues de froid extrême, un petit système de chauffage d'appoint tel qu'un poêle à bois ou une petite chaudière conventionnelle peut être nécessaire.

Pendant les mois d'hiver, les maisons hors sol présentent d'importants déficits énergétiques nets et nécessiteront une grande chaudière pour répondre aux pics de consommation élevés lors des vagues de froid. Même la maison bien isolée, (cas 2), a une charge de chauffage et de refroidissement importante. En fait, les maisons hors sol ont presque invariablement des fenêtres ou des portes sur les côtés est, ouest et nord. Cela entraîne une augmentation des pertes de chaleur par transmission et infiltration, et donc les maisons hors sol ont des charges énergétiques élevées. Pendant l'été, le sol froid qui enveloppe la structure de la maison troglodytique continue de la refroidir à un rythme légèrement inférieur à celui de l'hiver.
L'air infiltré, ajouté à la charge interne des maisons hors sol chauffées par le soleil, produit des gains de chaleur six à huit fois supérieurs à ceux des maisons semi-enterrées.

La figure 3 montre une maison traditionnelle hors sol de plain-pied avec sous-sol aménagé, une conception à deux niveaux fréquemment utilisée dans les climats nordiques. Le tableau montre que la partie souterraine améliore considérablement les performances par rapport à une structure sur dalle. Ceci permet de déterminer que la surface au sol de la maison présentée à la figure 2 peut être doublée sans subir de réelle pertes énergétique. Toutefois, la partie hors sol handicape tellement le bâtiment qu'il est loin d'atteindre les performances thermiques et énergétiques de l'exemple de maison semi-enterrée à deux niveaux présenté à la figure 4.

En ce qui concerne la maison enterrée, la consommation d'énergie remarquablement faible est due à la configuration plus compacte que celle d'un seul niveau et à une grande partie de l'enveloppe qui est plus profonde et mieux protégée des variations de température. La maison à deux niveaux contient deux fois plus de surface au sol, mais seulement 30 % de surface totale supplémentaire à travers laquelle la chaleur peut être transmise. Ainsi, malgré une ventilation et des charges thermiques internes accrues, le bâtiment a toujours une consommation d'énergie très faible en hiver et en été.

Un problème important dans les zones soumises au blizzard est le taux auquel la température intérieure baissera en cas de panne de courant. En prenant le taux maximal de perte de chaleur, en janvier, pour la maison illustrée à la figure 2, et sans tenir compte d'un éventuel gain de chaleur, comme celui provenant des personnes ou d'un poêle à bois, la température du bâtiment baissera à un rythme inférieur à 1 °C par jour. Ainsi, des conditions de vie et une température confortable pourraient être maintenues presque indéfiniment avec, par exemple, un petit poêle à bois.



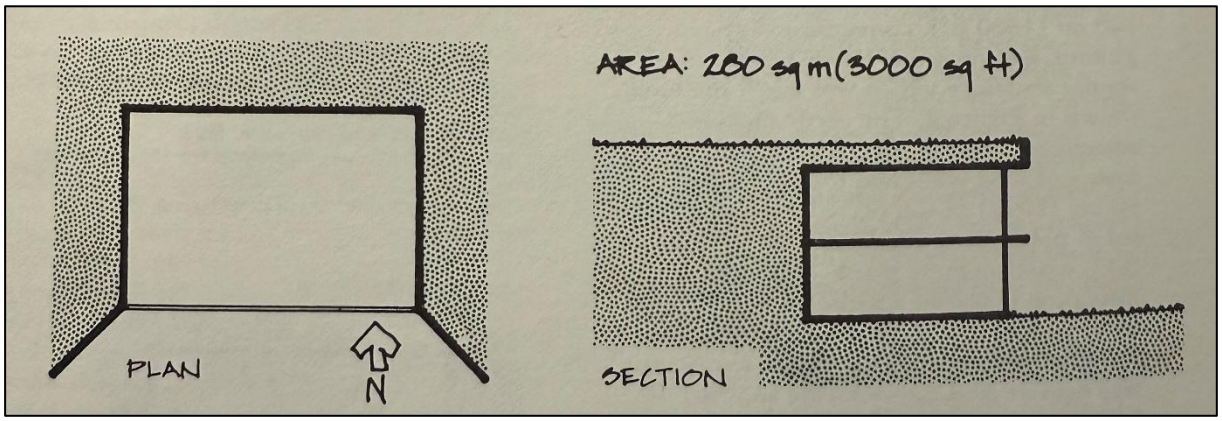
F-1	Hiver (kW.hr)	Eté (kW.hr)
Transmission	- 9 876	+ 3 658
Ventilation	- 3 087	- 3 087
Chaleur intérieur	+ 6 600	+ 1 800
Energie nette	- 6 363	+ 5 158

F-2	Hiver (kW.hr)	Eté (kW.hr)
Transmission	- 7 136	+ 2 872
Ventilation	- 3 087	- 3 087
Chaleur intérieur	+ 6 600	+ 1 800
Energie nette	- 3 623	+ 4 672

Figure 311 : Consommation d'énergie d'une maison hors sol à deux niveaux avec sous-sol aménagé.

F-1 : Murs : bois de 2x4 po avec 3 % de fibre de verre
Toit : bois de 2x6 po avec 5 % de fibre de verre

F-2 : Murs : bois de 2x6 po avec 5 % de fibre de verre
Toit : bois de 2x10 po avec 9 % de fibre de verre



	Hiver (kW.hr)	Eté (kW.hr)
Transmission	- 3 884	- 634
Ventilation	- 3 087	- 3 087
Chaleur intérieur	+ 6 600	+1800
Energie nette	- 371	+ 1 166

Figure 312 : Consommation d'énergie d'une maison semi-enterrée à deux niveaux.

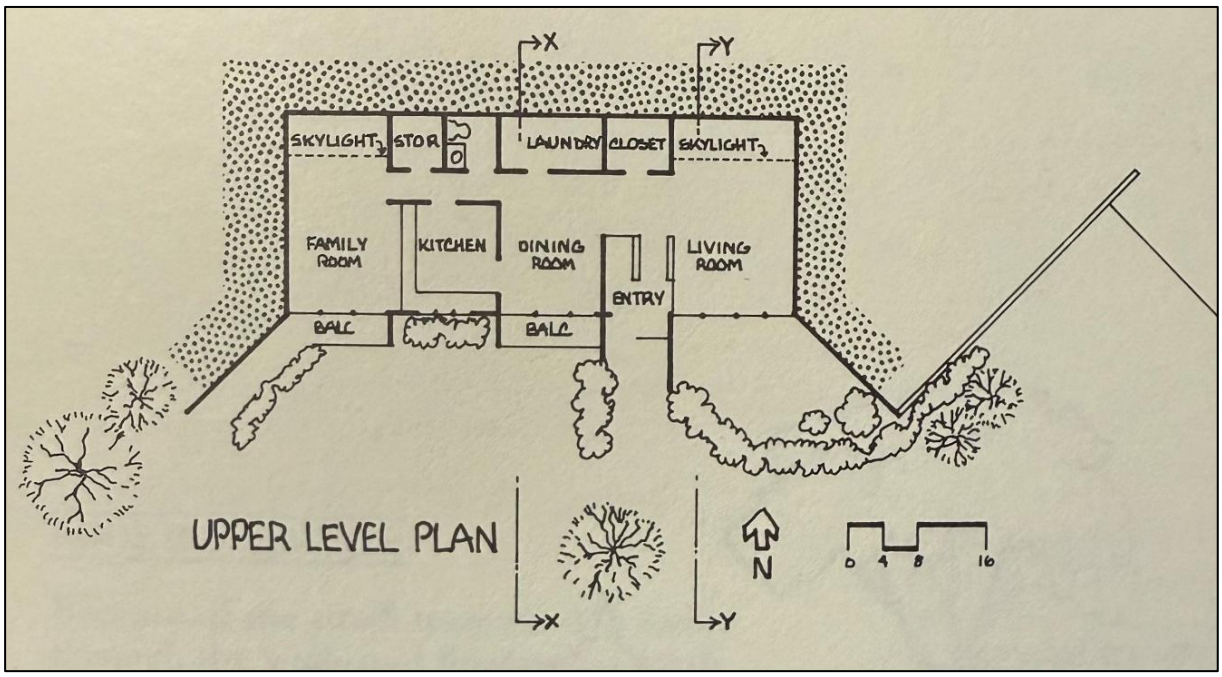
Murs : terre, 10 cm de polystyrène sur 155 cm à partir du haut du mur.
Toit : 50 cm de terre, 10 cm de polystyrène, 20 cm de dalle de béton.

Dans toutes les études ci-dessus, un sol limoneux sableux a été choisi avec une conductivité thermique de 0,81 W/m K. La chaleur spécifique et la densité étaient de 858 J/kg K et 185 kg/m^3. Comme la migration de l'humidité dans les sols est complexe et mal comprise, une valeur constante a été utilisée. Chaque conception a été analysée avec des teneurs en humidité allant de 18 % à 37 % et il a été constaté que les pertes de chaleur hivernales augmentaient de 28 %, tandis que pour les pertes de chaleur estivales, le taux de refroidissement a augmenté de 49 % pour le sol humide. Cela n'a pas un impact important car les pertes de transmission sont faibles pour les structures semi-enterrées.

Cependant, il convient de noter que dans les climats nordiques, le sol sera humide en été en raison de la fonte des neiges et des pluies, et les pertes de chaleur seront plus importantes, ce qui est avantageux pour le refroidissement estival. En hiver, la surface gèle et le gradient de température éloigne lentement l'humidité du bâtiment, asséchant le sol, les pertes de chaleur sont alors réduites. La conductivité thermique des sols peut varier jusqu'à un facteur de 10 avec l'augmentation de la teneur en humidité[4].

4. E.R.G. Eckert, T.P. Bligh, E. Pfender. « Energy Exchange Between Earth-Sheltered Structures and the Surrounding Ground ».

Les figures 5 et 6 présentent la conception d'une maison semi-enterrée à deux niveaux illustrant une conception réelle similaire à celle analysée dans la figure 4.



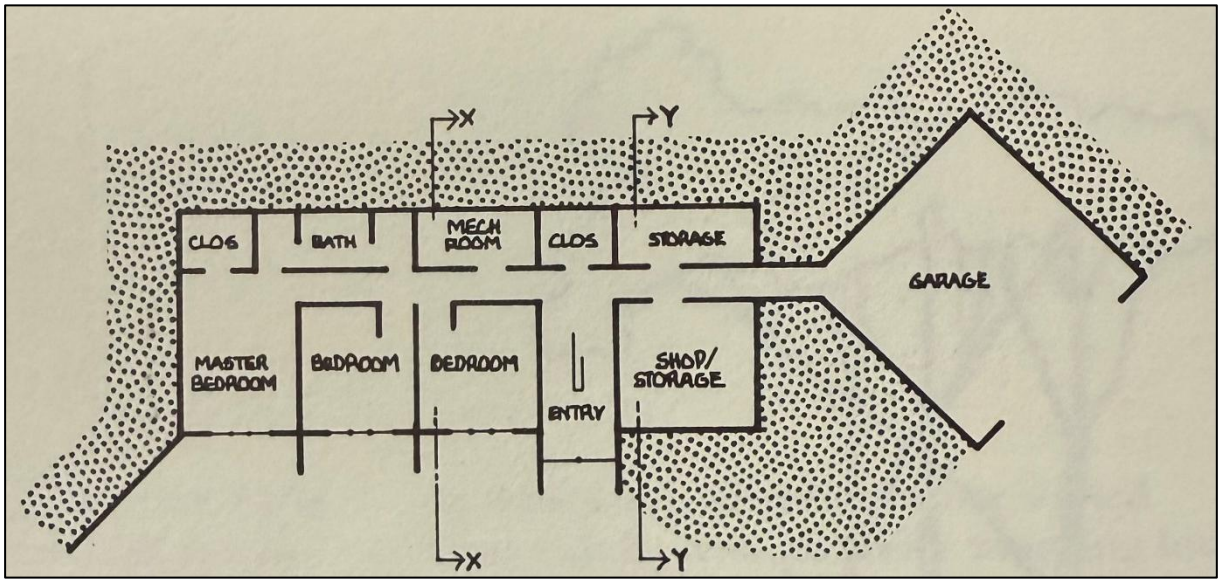


Figure 313 & 314 : Plans des niveaux supérieur et inférieur d'une maison semi-enterrée à deux niveaux.

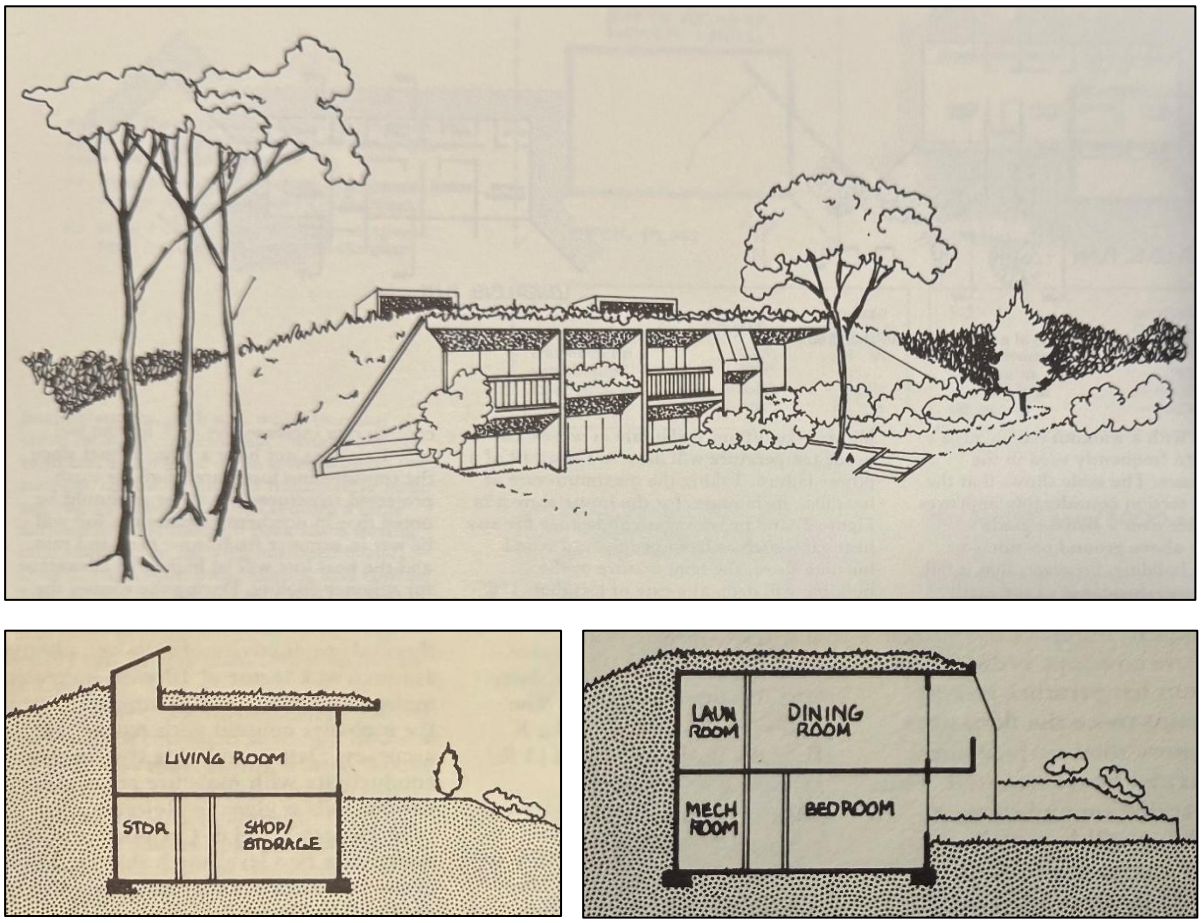


Figure 315, 316, 317 : Vue axonométrique et coupes d'une maison semi-enterrée à deux niveaux.

Isolation de toiture :

En raison des faibles pertes de transmission à travers les murs et le sol d'une structure semi-enterrée, les pertes de chaleur du toit peuvent dépasser 50 % des pertes totales de transmission. La conception thermique du toit est donc importante. Étant donné que la conductivité thermique du sol est environ 25 fois supérieure à celle du polystyrène, par exemple, ses propriétés isolantes ne constituent pas un facteur significatif dans la conception du toit.

Les performances de transfert de chaleur du toit peuvent être fortement influencées par deux propriétés importantes : la capacité thermique ou la masse thermique du toit, et les conditions aux limites de surface à l'interface toit/air [2].

La température de l'air intérieur a été autorisée à varier de façon saisonnière et s'est située entre 20° C en hiver et un pic de 25,6°C en été. Comme justifié plus loin, aucun gain solaire n'a été inclus puisque la surface était recouverte d'herbe.

2. « Earth-Sheltered Housing Design-Guidelines, Exemples et Références, University of Minnesota, Minneapolis, 1978.

Deux structures de toiture ont été comparés. La première, le toit B, avait 3 m de terre supportée par une dalle de béton préfabriquée de 31 cm, ce qui donne une valeur R de 4,32 m^2 K/W.
La seconde, le toit A, avait 46 cm de terre sur 10 cm de polystyrène supportée par une dalle de béton de 20 cm, ce qui donne une valeur R de 4,35 m^2 K/W.

Une profondeur de sol de 46 cm est généralement nécessaire pour assurer une bonne croissance de la plupart des végétaux dans la plupart des régions, et cette charge peut être supportée sur des portées raisonnablement grandes par des dalles de béton de 20 cm.

Cependant, il convient de noter qu'avec une couverture de sol de 3 m, la profondeur accrue du bâtiment réduira les pertes de chaleur à travers les murs, et l'effet de refroidissement estival à travers le toit serait meilleur. En effet, au cours des mois d'hiver, le toit de terre de 3 m a montré une réduction de seulement 2,4 % des pertes de transmission.

La discussion ci-dessus concerne les pertes d'énergie sur une période au cours de laquelle la température monte et descend, et est donc valable sur une base mensuelle ou annuelle.
Les températures quotidiennes, cependant, varient par intervalles aléatoires de jours au-dessus ou en dessous de cette moyenne.

Pour tester l'efficacité de la couverture de terre, un front froid a été simulé pendant cinq jours. Une journée de mi-janvier a été choisi au cours de laquelle la température de l'air a varié de façon sinusoïdale, passant d'une température minimale de -15 °C tôt le matin à une température maximale de -9,4 °C l'après-midi. Le 15 janvier, un front froid a provoqué une chute de 5,6 °C pour toutes les températures quotidiennes, qui ont ensuite varié de façon sinusoïdale entre -20,6 °C et -15,0 °C pendant cinq jours, avant de revenir au cycle sinusoïdal moyen normal.

La figure 7 illustre les réponses temporelles à ces conditions de deux structures de toiture présentant des valeurs R identiques de 4,35 m^2 K/W : la toiture A et la toiture B, constituées de 12 cm de polystyrène supporté par une dalle de béton de 20 cm.

La perte de chaleur quotidienne par unité de surface est représentée graphiquement.
Les zones ombrées sous chaque ligne représentent donc la perte de chaleur excédentaire due au front froid. En raison de sa faible inertie thermique, le toit B réagit rapidement au changement extérieur et maintient sa nouvelle perte de chaleur maximale jusqu'au retour à la normale des températures après le passage du front froid. Le toit A, à forte inertie thermique, quant à lui nécessite une journée entière avant que la température du plafond ne commence à indiquer que les conditions extérieures sont plus sévères.

La toiture A a donc nécessité 8 % d'énergie totale en moins que la toiture B.
D’autre part, la faible inertie thermique de la toiture B a nécessité près de deux fois plus d'énergie supplémentaire pendant la période froide de cinq jours, lorsque l'air de ventilation et d'infiltration était à son niveau le plus froid. Cela n'affecte pas le bilan énergétique net, mais augmente la charge de pointe, ce qui signifie qu'un système de chauffage plus important doit être installé.

De ce fait, cela démontre que même si deux structures peuvent être thermiquement équivalentes dans des conditions stables, la toiture à forte inertie thermique consomme moins d'énergie et réduit la charge de pointe lors de brèves vagues de froid ou de chaleur transitoires.

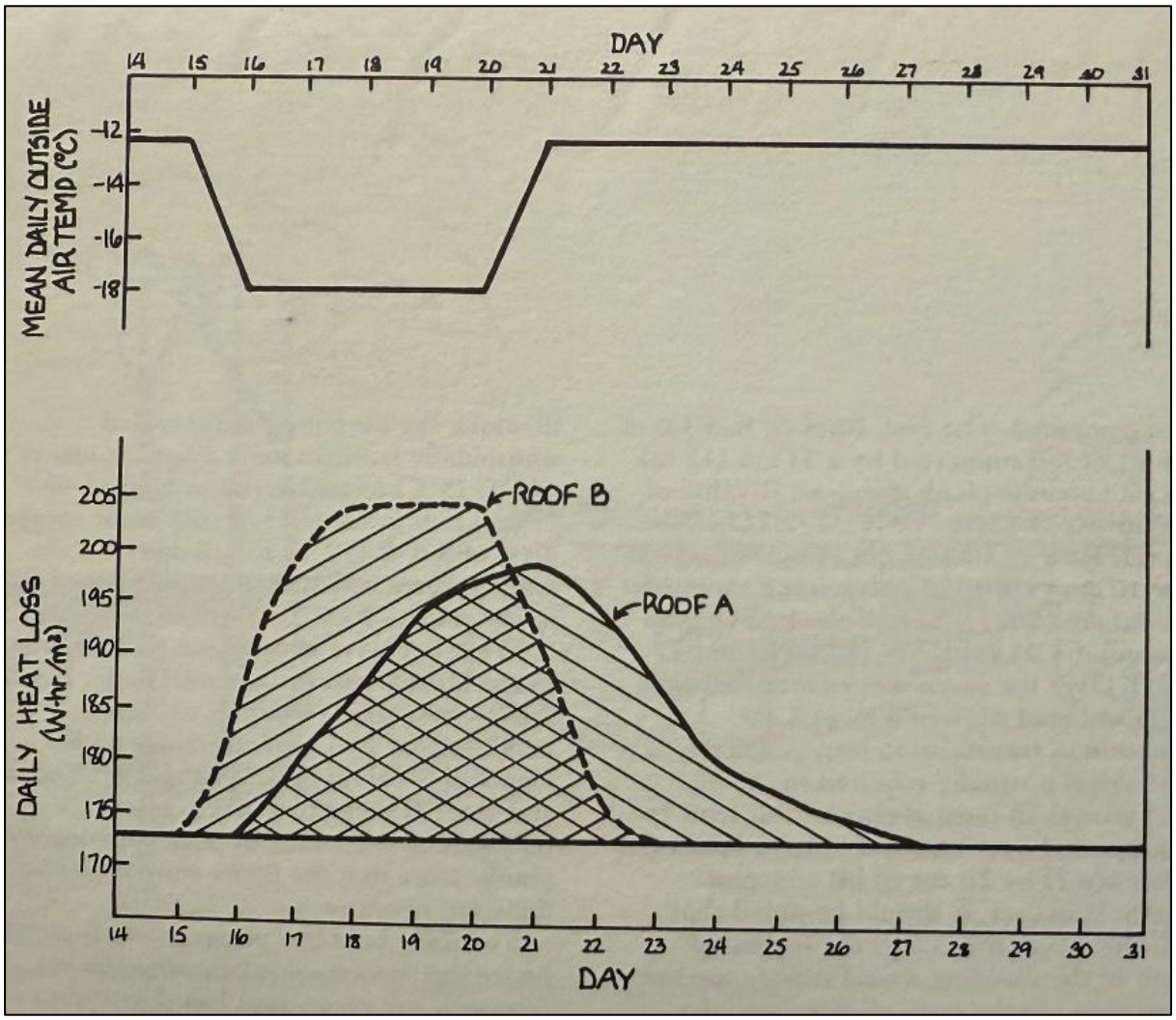


Figure 318 : Température moyenne quotidienne de la masse thermique des toitures :
Effet de la couverture de sol sur les pertes de chaleur quotidiennes d'un toit soumis à un front froid pendant cinq jours.

Enfin, la végétation sur le toit contribue à l'efficacité thermique par des effets d'ombrage, une meilleure isolation grâce aux poches d'air dans le feuillage et, surtout, l'élimination du gain de chaleur solaire sur le toit pendant l'été. Ceci est dû en partie à la réflexion et à la photosynthèse qui joue un rôle important, mais principalement à la transpiration qui refroidit le feuillage grâce à la variation de chaleur latente lorsque l'humidité s'évapore.

Des mesures de température effectuées sous des surfaces pavées et engazonnées ont montré que les températures maximales journalières estivales, dues au rayonnement solaire, peuvent dépasser 60 °C sous une surface asphaltée, même lorsque la température de l'air n'excède pas 32 °C. Dans les mêmes conditions, la température maximale sous l'herbe n'a atteint que 40 °C [5].

5. T. Kusuda. « Température de la Terre sous cinq surfaces différentes. » Bureau national des normes, rapport 10373. 1971.

Pendant l'été, l'effet net du rayonnement sur différentes surfaces a été illustré à la figure 8. Une surface recouverte d'asphalte devient 8,3 °C plus chaude que la température moyenne de l'air, tandis qu'une couverture végétale est constamment inférieure aux conditions ambiantes de 0,6 à 3,9 °C, selon la hauteur de l'herbe. De plus, pendant l'hiver, l'herbe fournira des poches d'air isolantes supplémentaires.

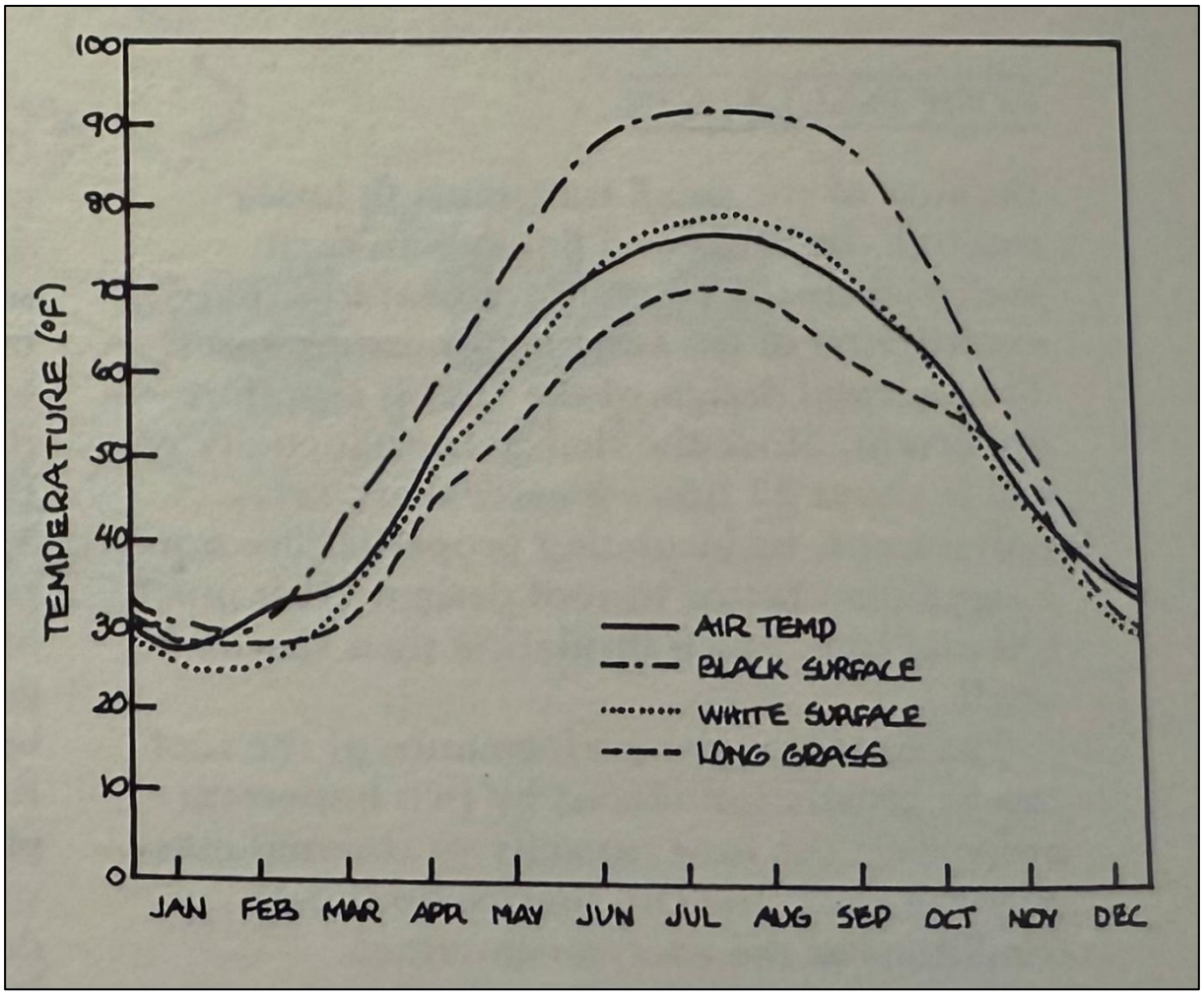


Figure 319 : Températures moyennes mensuelles sous quatre surfaces différentes.

Isolation des murs :

Les fenêtres et les portes doivent être limitées autant que possible au mur sud. En hiver, les fenêtres à double vitrage orientées au nord présentent un flux de perte de chaleur moyen vingt fois supérieur à celui d'un mur enterré, par temps très froid, ce facteur peut atteindre 35. Pour une fenêtre orientée à l'est ou à l'ouest, ce facteur est dix fois supérieur à celui d'un mur. En revanche, les fenêtres orientées au sud peuvent produire un gain net de chaleur.

Le sol entourant un bâtiment enterré sera réchauffé, après un certain temps, à une certaine température entre la température du bâtiment et celle du sol d'origine.

Pendant l'été, la température intérieure du bâtiment doit pouvoir atteindre 26 °C. Le flux de chaleur vers le sol contribue à maintenir le bâtiment au frais. En hiver, la température intérieure ne doit pas dépasser 20 °C. Pendant une courte période, notamment dans les bâtiments à deux niveaux, la chaleur va effectivement refluer du sol vers le bâtiment. Pour le reste de l'hiver, les pertes de chaleur dans le sol seront moindres si le sol n'a pas été préchauffé durant l'été précédent.

Si les murs sont totalement isolés, le bâtiment sera isolé du sol et n'interagira pas avec la masse thermique du sol. La question se pose alors quant à la quantité de terre nécessaire et à son emplacement.

Le flux de chaleur entrant dans un mur non isolé et protégé par la terre serait maximal en haut et diminuerait jusqu'à un minimum au niveau du sol. Il est donc primordial d'augmenter la résistance thermique près du haut du mur. Cela peut se faire en plaçant l'isolant verticalement le long du mur ou en prolongeant l'isolation du toit horizontalement à partir du mur afin de créer des ruptures du flux thermiques conduit par les parois de l'habitat troglodytique.

Pour analyser cela, une structure témoin avec des quantités d'isolation identiques a été utilisée (Figure 9). Après trois ans d'étude pour atteindre des conditions de fonctionnement stables, le mur B a montré une amélioration de 10 % du refroidissement estival au prix d'une augmentation de 5 % des pertes de chaleur hivernales.

En moyenne sur l'année, cela a donné des économies de 100 kWh pendant l'été au détriment de 107 kWh pendant l'hiver pour la maison de 140 m^2 de la figure 2. Bien qu'il n'y ait pas de gain d'énergie net, dans le mur B, l'avantage a été déplacé vers le refroidissement estival.

Ainsi, si la charge de refroidissement peut être maintenue suffisamment basse, il ne sera pas nécessaire d'installer un climatiseur. Le système CVC est alors réduit à une simple unité de chauffage.

Enfin, la même quantité d'isolant pourrait être placée horizontalement à partir du mur comme illustré sur le côté droit de la figure 10. Notez que les flux de chaleur à travers le plafond et le sol sont pratiquement identiques dans les deux cas. Cependant, la perte hivernale à travers le mur avec isolation horizontale a diminué de 7,2 à 6,0 kWh/m^2, soit une amélioration de 20 %, et en outre, les pertes de chaleur dues au refroidissement estival ont diminué de 17 %.

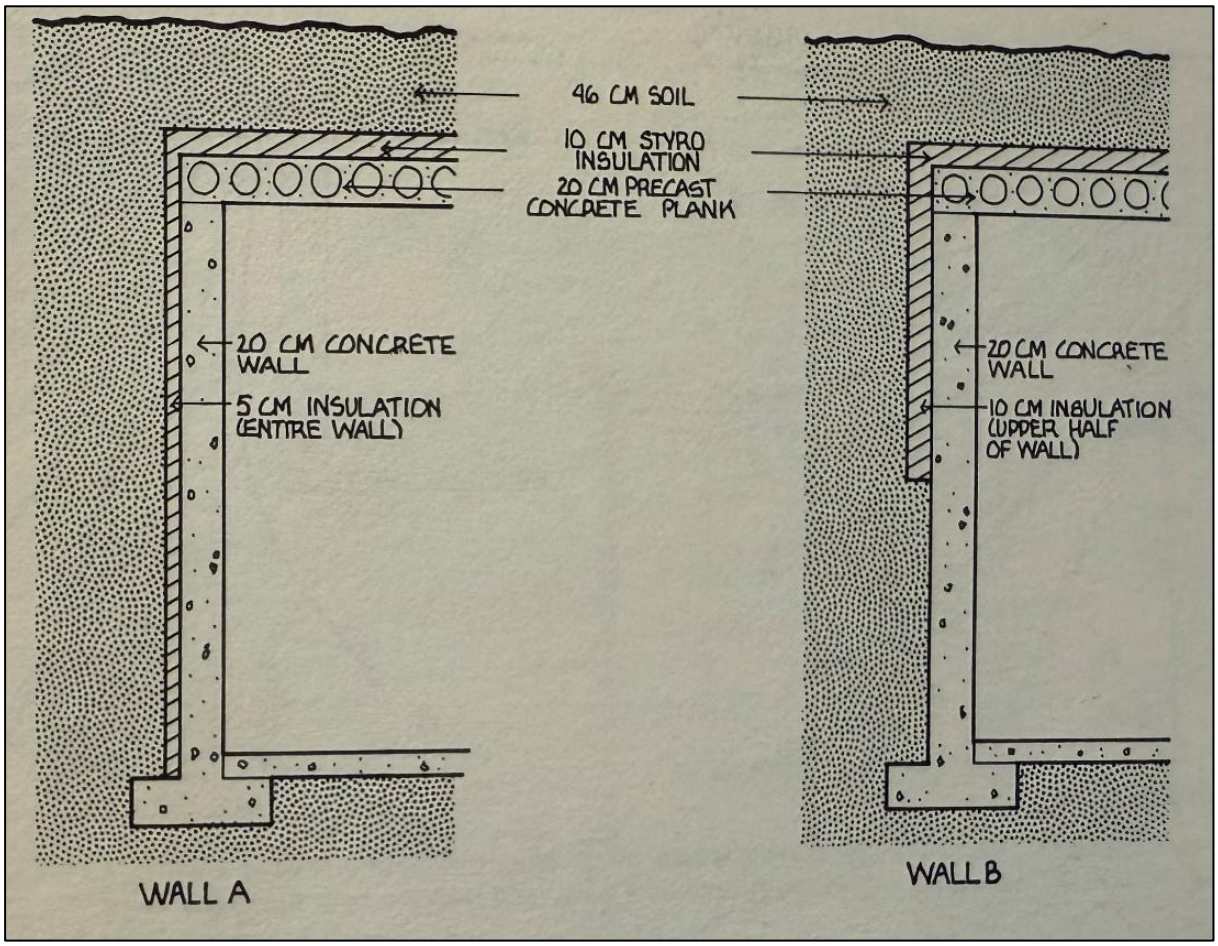


Figure 320 : Comparaison de l'isolation des murs verticaux d'un habitat troglodytique.

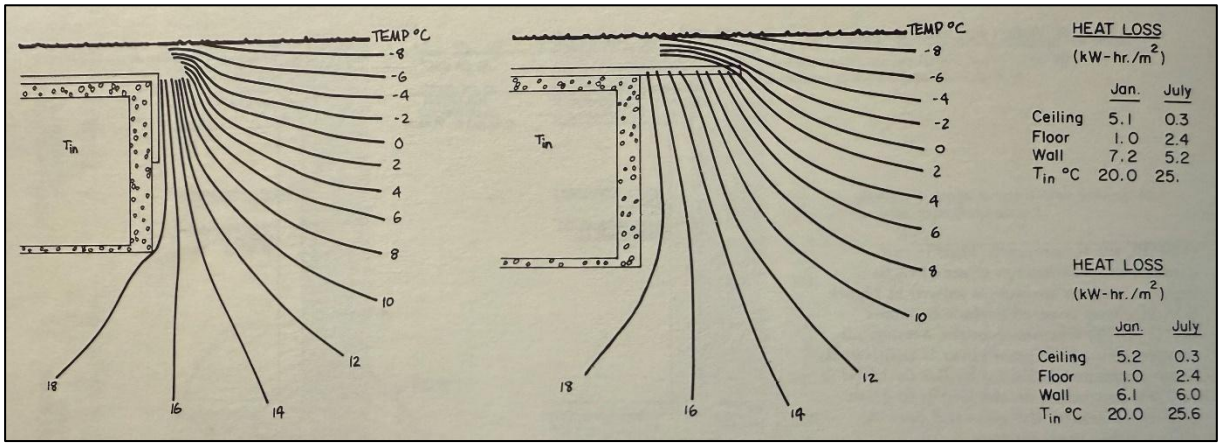


Figure 321 : Comparaison de l'isolation des murs horizontaux d'un habitat troglodytique (isothermes représentées en °C). Notez que les lignes de flux thermique sont orthogonales aux isothermes et que l'isolation horizontale produit un flux thermique faible et uniforme provenant du mur.

Isolation du plancher et du sous-sol :

Les pertes de chaleur à travers le plancher d'une structure semi-enterrée seront faibles et constantes toute l'année. Des études montrent que le taux de perte à travers un sol en béton non isolé présente des pertes d'environ 1,2 W/m, ce qui représente moins de 14 % des pertes d'énergie totales hivernales à travers l'enveloppe du bâtiment. L'ajout de 2,5 cm de polystyrène sous le sol diminue ces pertes de moins de 5 %, ce qui représente une diminution de moins de 1 % de la consommation énergétique totale du bâtiment [2].

La même quantité d'isolant ajoutée à un toit avec une valeur R de 4,23 m^2 K/W entraîne une diminution de 20 % des pertes de chaleur par le plafond pendant l'hiver, soit une amélioration de 11 % de la performance globale. Il est donc beaucoup plus rentable d'ajouter de l'isolant au toit qu'au sol.

Cette conclusion est renforcée en été, car la masse thermique du sol sous un plancher non isolé permet à la chaleur de s'échapper du bâtiment plus rapidement lorsque la température intérieure augmente. Ainsi, une augmentation de trois fois des pertes de chaleur par le plancher peut être constatée pendant l'été. L'installation d'isolant sous la dalle de plancher réduit considérablement cet effet de refroidissement.

A l'inverse, afin d'atténuer la sensation de froid, l'isolation sous le plancher est préconisée afin de permettre aux dalles de plancher de flotter plus près de la température ambiante.
Un plancher à température ambiante de 23 °C, est encore environ 14 °C plus froid que la température corporelle. Une meilleure solution au problème de confort n'est pas d'isoler la dalle comme indiqué ci-dessus, mais d'installer de la moquette, du parquet ou des tapis sur la dalle. Ainsi, le confort souhaité est assuré sans dégradation notable des effets positifs du comportement thermique du plancher.

Isolation des fenêtres :

Le rayonnement solaire à travers les fenêtres est une source importante de chaleur.
Un certain rayonnement est disponible en hiver à travers les fenêtres orientées à l'est et à l'ouest, mais celles-ci produiront un chauffage excessif en été et entraîneront une perte de chaleur nette en hiver, comme indiqué dans le tableau suivant.

Les fenêtres orientées au sud fournissent la quantité maximale de chaleur solaire passive en hiver, avec une charge de chauffage estivale faible si des avant-toits appropriés sont utilisés. Pour les fenêtres orientées au sud, le double vitrage est préférable si des rideaux isolants, ou mieux encore, des volets extérieurs isolants, sont installés. Les fenêtres à double vitrage transmettent 72 % du rayonnement solaire, tandis qu'une fenêtre à triple vitrage n'a qu'une transmittance de 61 %.

2. « Earth-Sheltered Housing Design-Guidelines, Exemples et Références, University of Minnesota, Minneapolis, 1978.

Le tableau suivant montre le gain/la perte de chaleur à travers les fenêtres à double vitrage avec rideaux la nuit pour améliorer la valeur U. De toute évidence, les fenêtres orientées au nord, à l'est ou à l'ouest sont indésirables d'un point de vue énergétique :

Mois	Nord	Est / Ouest	Sud
Janvier	- 60.37	- 48.95	+ 3.90
Février	- 48.57	- 31.48	+ 17.53
Mars	- 36.84	- 11.02	+ 14.78
Avril	- 12.09	+ 16.34	+ 9.39
Mai	+ 9.11	+ 37.43	+ 11.80
Juin	+ 26.66	+ 55.77	+ 23.45
Juillet	+ 25.87	+ 60.11	+ 27.90
Août	+ 18.26	+ 51.12	+ 41.62
Septembre	+ 3.19	+ 28.04	+ 55.74
Octobre	- 13.59	+ 3.99	+ 53.82
Novembre	- 35.42	- 26.68	+ 13.53
Décembre	- 54.61	- 47.08	- 5.56

Totaux de Juin à Août	+ 70.79	+ 167.00	+ 92.96
Totaux de Octobre à Avril	- 261.94	- 144.98	+ 107.40

Figure 322 : Tableau des gains/pertes de chaleur à travers les fenêtres à double vitrage kW h/m².

Coefficient U de jour 3,349 W/m²K
Coefficient U de nuit 2,555 W/m²K

Remarque : Les valeurs positives indiquent un flux de chaleur entrant dans le bâtiment, les valeurs négatives, un flux sortant.

Les rideaux isolants intérieurs diminuent les pertes de chaleur la nuit en empêchant l'air chaud de la pièce d'atteindre la vitre intérieure. La température du verre descendra fréquemment en dessous du point de rosée de l'air intérieur, ce qui entraînera de la condensation sur les fenêtres et une déshumidification de l'air intérieur. Il est important pour la santé et le confort physique de maintenir l'humidité dans la plage de 30 à 40 %.

Une humidité très faible dessèche excessivement la peau et augmente la perte de transpiration, ce qui produit une sensation de froid. Si l'humidité est maintenue, la température intérieure peut être baisser de deux ou trois degrés. Pour cette raison, les volets extérieurs bien que plus difficile à concevoir, seront meilleurs à l'usage. En effet, les surfaces vitrées sont protégées des intempéries et atteignent donc une température similaire à celle de l'habitat et ne provoquent pas de condensation.

Pour conclure, le placement optimal de l'isolation d'un habitat troglodytique est à l'horizontal à partir du mur avec des volets thermiques de type enrouleur situés à l'extérieur des baies vitrées plus un ombrage créée par des avant-toits pour les périodes estivales.

Des volets thermiques rigides de type battant pourraient être conçus pour servir la double fonction d'isolation hivernale et d'ombrage estival. De toute façon, l'ensemble du domaine des volets thermiques pour fenêtres nécessite encore davantage de recherches et de développements, car, par unité de surface, les fenêtres sont de loin la plus grande source de perte de chaleur.

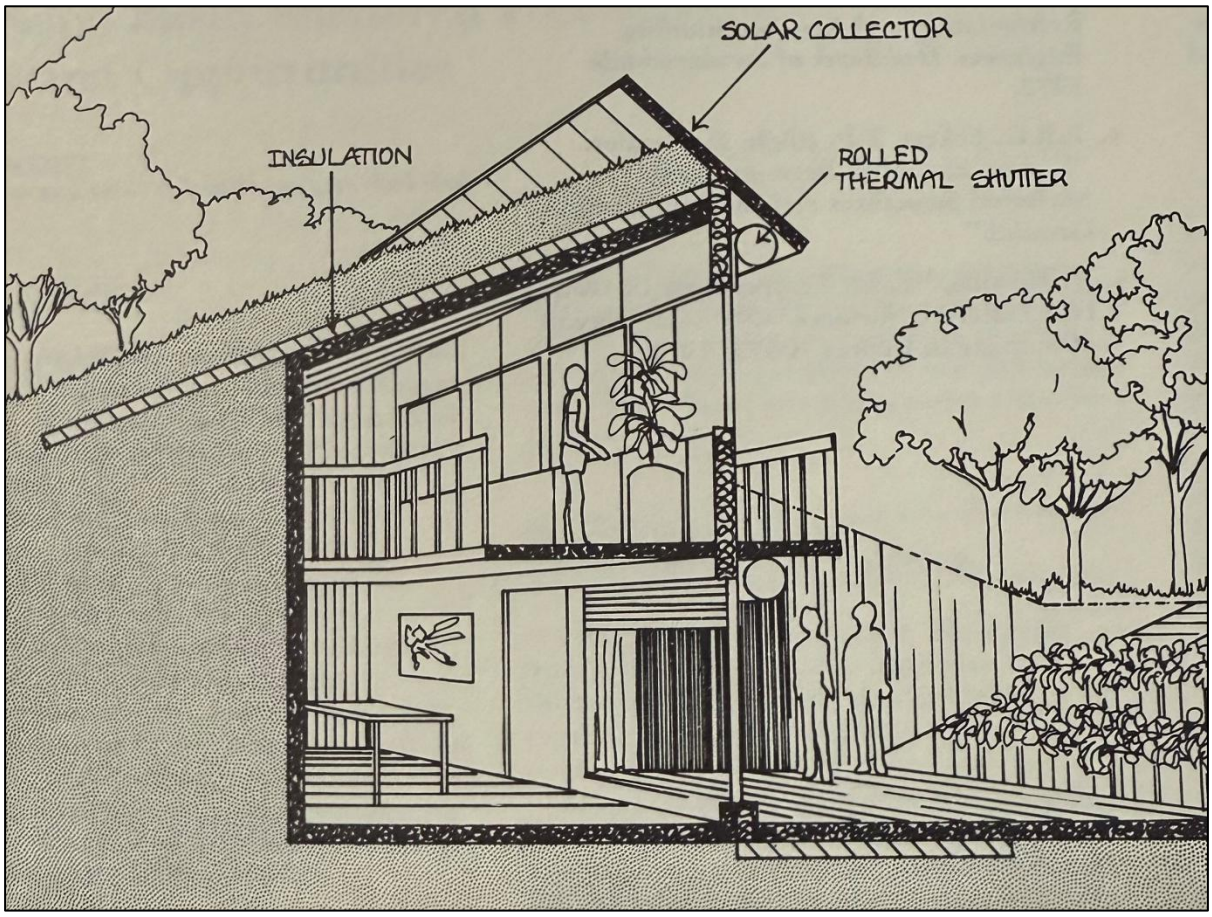


Figure 323 : Coupe transversale d'une maison semi-enterrée montrant le placement correct de l'isolation et des volets thermiques extérieurs des fenêtres.

3.2.3.11.2 Financement des logements semi-enterrés : enjeux et opportunités

Aujourd'hui, les coûts élevés de l'immobilier et des approvisionnements énergétiques ont stimulé un regain d'intérêt pour l'utilisation de la terre comme isolant afin d'améliorer l'efficacité énergétique des nouveaux logements.

Etudes fédérales :

Il serait négligent de ne pas mentionner l'énergie solaire dans une discussion sur les logements troglodytique. Le HUD et le DOE (Dossier des Ouvrages Exécutés) ont tous deux entrepris des efforts substantiels dans la recherche et la démonstration de la technologie de chauffage et de refroidissement solaire. Étant donné que les systèmes d'énergie solaire, actifs ou passifs, jouent généralement un rôle important dans les conceptions troglodytiques, le développement réussi de la technologie solaire peut clairement améliorer la faisabilité et l'acceptabilité des logements troglodytiques à l'échelle mondial. L'énergie solaire et les logements troglodytiques peuvent être considérés comme des technologies d'économie d'énergie indépendantes mais complémentaires ayant des implications majeures pour les logements du futur.

Résultats concrets :

Pour que le public accepte la maison troglodytique pour ses économies d'énergie, des analyses sophistiquées et crédibles doivent être présentées en plus des témoignages individuels ponctuels. L'acceptation généralisée par la population d'une telle rupture significative avec l'habitation conventionnelle nécessitera forcément du temps. Les agences gouvernementales, ainsi que les universités et les chercheurs privés, devront sans aucun doute documenter scrupuleusement les économies d'énergie, la réduction des coûts d'entretien et les autres affirmations faites au nom des habitations troglodytiques. C'est exactement ce que j'ai souhaité produire au sein de ce mémoire.

Les principales personnes à convaincre seront ainsi :

- Les architectes qui conçoivent, dessinent et spécifient les plans.
- Les entrepreneurs et la main-d'œuvre qui construisent les structures troglodytiques.
- Les consommateurs qui doivent prendre des décisions en matière d'investissement immobilier et de mode de vie.
- Les fonctionnaires qui sanctionnent et inspectent pour protéger la santé, la sécurité et le bien-être du public.
- Les évaluateurs qui estiment la valeur marchande ainsi que le risque d'investissement d'un habitat troglodytique.
- Les prêteurs qui fournissent des financements de construction permanents et dont l'attitude face au risque est traditionnellement conservatrice.
- Les assureurs.
- Les décideurs politiques qui peuvent contrecarrer ou accélérer le développement du concept semi-enterré par le biais de la législation et de la réglementation.

En effet, sans le soutien des institutions financières, la croissance et le potentiel prometteur des habitats troglodytiques ne pourra jamais se développer.

3.3 Limites et inconvénients de l'architecture troglodyte comme solution d'habitat contemporain durable face aux défis environnementaux modernes

Rien n'est plus erroné que de considérer l'habitat troglodytique comme un symbole de l'action écologique simplement parce qu'il est enfoui, camouflé, ou intimement fusionné avec le milieu naturel. En effet, l'architecture troglodytique déforme les caractéristiques et les structures d'un milieu naturel, tout comme l'architecture bâtie. Elle modifie l'aspect des montagnes et des plaines en les marquant et les polluant. *« Nous ne vivons plus avec la nature, mais nous la soumettons, la violant sans remords au nom d'un droit sublimé à la survie [1]».*

En tous cas, si l'on veut trouver un message écologique en parlant de l'architecture troglodytique, il ne se trouve pas dans l'idée de ne pas « abîmer » la nature ou de la « conserver » telle quelle. Dans l'architecture troglodytique, le message écologique est plus particulièrement lié à l'exploitation et l'utilisation des caractéristiques et performances physiques des ressources que nous offre la géophysique. Cependant, elle présente certaines limites et inconvénients.

Contraintes géologiques et techniques :

Si l'habitat troglodyte offre une excellente inertie thermique, sa mise en œuvre dépend fortement des caractéristiques du terrain. Tous les sols ne permettent pas un creusement sûr ni durable : certaines roches sont trop friables, d'autres trop humides, rendant les travaux complexes, coûteux ou impossibles. De plus, les interventions techniques modernes (ventilation, réseaux, étanchéité) doivent être soigneusement intégrées pour garantir la sécurité et le confort, ce qui augmente la technicité et parfois le prix de ce type d'habitat.

Problèmes d'humidité, d'aération et de salubrité :

Le sous-sol présente naturellement des défis liés à l'humidité, aux infiltrations et à la stagnation de l'air. Sans systèmes de ventilation performants, la qualité de l'air intérieur peut se dégrader, entraînant moisissures, odeurs et inconfort. D'autre part, même si certaines conceptions intègrent patios, puits de lumière ou façades ouvertes, l'absence d'exposition directe au soleil peut être perçue comme un manque de bien-être par certains habitants.

Accessibilité, normes et adaptation aux usages modernes :

Transformer une cavité en habitat conforme aux normes actuelles — sécurité incendie, accessibilité, isolation, réseaux — peut se révéler complexe. L'espace creusé se prête mal à des modifications ultérieures : agrandir, restructurer ou réaménager un volume troglodytique nécessite des travaux lourds, voire irréalisables sans compromettre la stabilité du site.
Cette rigidité spatiale limite la capacité d'évolution des logements face aux besoins changeants des modes de vie contemporains.

1. Manfredi Nicoletti, *L'architettura delle caverne*, Editori Laterza, 1980, op cit page 181.

Acceptabilité sociale et contraintes urbanistiques :

Enfin, l'habitat troglodyte souffre encore d'une image marginale ou archaïque.
Son intégration dans des projets urbains ou périurbains rencontre des réticences, tant du côté des habitants que des acteurs de l'aménagement. Les règlements d'urbanisme ne sont pas toujours adaptés à ce type de construction, et l'absence de cadres juridiques spécifiques limite son développement. Dans un contexte où la rapidité de construction est souvent privilégiée, l'architecture souterraine peine à trouver sa place dans une logique immobilière dominée par la standardisation et le court terme.

Coût et complexité des travaux de réhabilitation :

S'il est parfois moins coûteux de creuser que de construire en surface, réhabiliter un habitat troglodyte ancien peut devenir un chantier très onéreux : stabilisation des parois, consolidation des voûtes, création d'ouvertures, traitement des sols humides, installation de systèmes de drainage… Ces interventions nécessitent souvent des entreprises spécialisées, ce qui rend le projet financièrement inaccessible pour de nombreux ménages.

Risques liés à l'évolution naturelle du milieu souterrain :

Les cavités, même bien conçues ou entretenues, restent soumises aux aléas naturels : affaissements, mouvements de terrain, failles, infiltrations imprévisibles. Dans certaines régions, les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux ou l'érosion progressive peuvent fragiliser la structure. Ces risques nécessitent une surveillance régulière, parfois coûteuse, pour garantir la sécurité des habitants.

Difficultés liées à l'orientation et à la connexion avec l'extérieur :

L'habitat souterrain limite les vues panoramiques, la relation directe avec l'environnement, la possibilité d'ouvrir des fenêtres multiples ou de profiter d'espaces extérieurs privatifs.
Cette rupture avec l'extérieur peut être vécue comme une contrainte pour les habitants sensibles à la lumière, au paysage ou à l'idée d'une maison « ouverte ». Cela peut aussi réduire la valeur immobilière du bien par rapport à un logement offrant une orientation solaire optimale.

Dépendance à la technologie pour assurer le confort moderne :

Afin d'atteindre le niveau de confort attendu aujourd'hui, les habitats troglodytiques dépendent souvent de systèmes techniques sophistiqués : ventilation mécanique permanente, déshumidification, éclairage artificiel renforcé, pompes à chaleur adaptées, capteurs d'humidité… Cette dépendance va à l'encontre d'une vision totalement « passive » ou low-tech du logement durable, et peut augmenter les coûts énergétiques si les systèmes ne sont pas bien dimensionnés.

Limites psychologiques et culturelles :

Pour certaines personnes, l'idée de vivre sous terre évoque l'enfermement, l'obscurité, ou même un certain imaginaire négatif (grotte, cave, isolement). Ces résistances psychologiques limitent largement l'acceptabilité sociale de l'habitat troglodyte, indépendamment de ses qualités environnementales. L'attachement culturel à la maison « en surface » ou avec toiture visible reste très fort dans de nombreuses sociétés.

Faible reproductibilité à grande échelle :

Même s'il existe des régions propices au troglodytisme, cette forme d'habitat ne peut pas être déployée de manière uniforme sur l'ensemble du territoire. Sa dépendance au type de roche, au relief et au climat local en fait une solution très contextualisée. Par conséquent, elle ne peut jouer qu'un rôle limité dans une stratégie globale de logement durable, contrairement à des solutions plus standardisables comme la construction bioclimatique ou l'architecture en matériaux biosourcés.

Limitations en matière d'énergies renouvelables :

Un habitat souterrain offre moins de surfaces exposées pour l'installation de panneaux photovoltaïques ou solaires thermiques, rendant la production énergétique autonome plus complexe.

Manque de flexibilité fonctionnelle :
Les formes organiques ou irrégulières des cavités peuvent compliquer l'aménagement intérieur moderne (mobilier, cloisons, domotique), entraînant plus d'adaptations sur mesure.

Difficultés d'évacuation en cas d'urgence :
Vivre en profondeur ou dans des volumes enclavés réduit le nombre de sorties possibles en cas d'incendie ou de sinistre, ce qui peut poser des problèmes de sécurité.

Impacts potentiels sur la biodiversité souterraine :
Le creusement ou l'habitation de cavités peut perturber des écosystèmes hypogés (chauves-souris, microfaune, champignons), ce qui ajoute une dimension environnementale à surveiller.

Délais de construction plus longs :
Même si la structure porteuse est « fournie par le terrain », les travaux de creusement et de stabilisation peuvent rallonger le chantier par rapport aux constructions préfabriquées.

En définitive, si l'architecture troglodyte présente un potentiel réel face aux défis environnementaux contemporains, elle révèle aussi un ensemble de limites structurelles, techniques, économiques et culturelles qui freinent son déploiement à grande échelle. Les contraintes géologiques, les risques d'humidité, la dépendance à des systèmes technologiques, les coûts de réhabilitation, ainsi que les difficultés d'adaptation aux normes modernes montrent que cet habitat, malgré ses qualités thermique et écologique, n'est pas universellement applicable. À cela s'ajoutent les obstacles psychologiques, les limites en matière d'aménagement et la faible reproductibilité territoriale, qui restreignent encore davantage son acceptabilité. Ainsi, l'habitat troglodyte apparaît comme une solution pertinente dans des contextes spécifiques, mais dont l'usage généralisé demeure limité par des conditions environnementales, techniques et socioculturelles difficiles à contourner.

Conclusion

CONCLUSION

L'architecture troglodyte, représentée par des sites emblématiques en Andalousie comme Guadix ou Setenil de las Bodegas, illustre une parfaite symbiose entre habitat et environnement naturel. Ces habitations creusées dans la roche, témoignent d'un savoir-faire millénaire et d'une capacité d'adaptation exceptionnelle aux contraintes climatiques et géographiques de la région. Les techniques utilisées offrent des solutions remarquables en termes de régulation thermique, de durabilité des matériaux et d'intégration paysagère, répondant ainsi aux défis posés par des environnements extrêmes.

Dans un contexte actuel marqué par la crise climatique et la pénurie de logements, ces constructions troglodytes apparaissent comme une source d'inspiration précieuse.
En réinterprétant leurs principes fondamentaux avec les technologies et matériaux modernes, il est possible de concevoir des habitats résilients, à faible impact environnemental, adaptés à des conditions climatiques variées. En effet, leur capacité à exploiter les ressources locales tout en minimisant l'empreinte écologique représente un modèle pertinent pour des approches architecturales durables.

Toutefois, la transposition des techniques troglodytes doit surmonter plusieurs défis, notamment ceux liés aux coûts de mise en œuvre ou aux attentes modernes en matière de confort usuel. La réussite de telles initiatives nécessitera donc une collaboration entre experts en architecture et en urbanisme, tout en intégrant les communautés locales dans le processus.
L'architecture troglodyte andalouse offre donc une voie prometteuse pour repenser la manière dont nous concevons l'habitat face aux enjeux climatiques et sociaux contemporains.
Elle illustre la pertinence de puiser dans les solutions du passé pour répondre aux défis de l'avenir, en adoptant une approche à la fois innovante et respectueuse des écosystèmes.

Pour conclure, les besoins actuels d'économie d'énergie serviront, je l'espère, à la revalorisation des habitats troglodytiques. C'est d'ailleurs cette raison qui m'a poussé à rédiger un mémoire de fin d'étude sur ce sujet.



Figure 324 : Façade d'un troglodyte de Guadix servant de référence pour le développement d'une architecture troglodyte contemporaine. Source : andaluciamia.com

Résumé et bilan des analyses et des études de cas effectuées en Andalousie

L'étude menée sur l'habitat troglodytique, envisagé comme une réponse possible aux climats extrêmes, révèle la pertinence de cette architecture durable ancrée dans le sol. En analysant les propriétés énergétiques, techniques et sociales de ces espaces souterrains, ce travail a montré que l'habitat sous terre n'est pas une solution archaïque ou marginale, mais au contraire une stratégie d'adaptation subtil, issue d'un processus constructif ancestrale. Loin d'être un simple refuge, l'architecture troglodytique offre un modèle alternatif d'habitat, fondé sur l'inertie thermique, la sobriété matérielle et l'intégration paysagère, des valeurs essentielles pour repenser nos modes d'habiter face à l'urgence climatique.

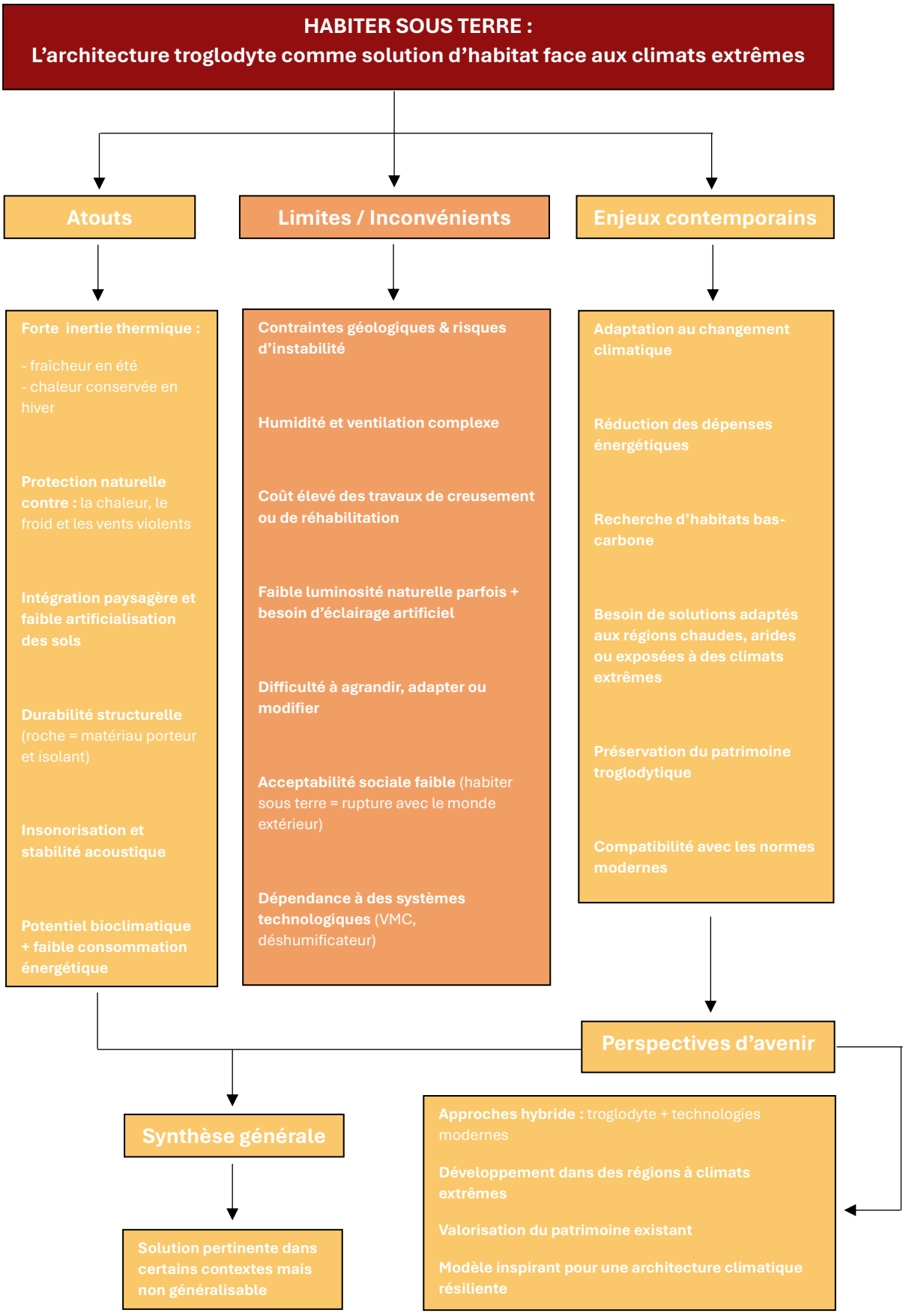
Les études de cas menées en Andalousie, et plus particulièrement à Guadix et Setenil de las Bodegas, ont mis en lumière la diversité et la contemporanéité de ces formes d'habitat.
À Guadix, les demeures creusées dans les badlands démontrent une remarquable capacité à maintenir un confort thermique stable malgré les fortes amplitudes climatiques caractéristiques du plateau andalou. Leur faible impact visuel et la relation intime qu'elles tissent avec le relief illustrent parfaitement le potentiel écologique d'un habitat souterrain.
Ces maisons troglodytes, encore habitées aujourd'hui, confirment que l'architecture de terre et de roche, souvent considérée comme dépassée, peut répondre à des enjeux actuels : réduction de la consommation énergétique ou limitation de l'artificialisation des sols par exemple.

À Setenil de las Bodegas, l'intégration des habitations sous les surplombs rocheux propose une variante singulière du troglodytisme : un habitat semi-souterrain qui exploite les dispositifs naturels du site par une adaptation pragmatique, où l'habitat s'inscrit dans une continuité avec son environnement. La pierre y devient murs, toiture, et espace public à la fois. Ce cas d'étude montre ainsi que le troglodytisme peut s'inventer dans des contextes géologiques variés, créant des espaces à la fois résilients, identitaires et en dialogue étroit avec leur environnement.

Cependant, l'analyse de ces deux exemples a également révélé les limites de cette architecture. Si l'habitat troglodytique peut offrir une réponse efficace aux climats extrêmes, sa mise en œuvre reste étroitement liée aux caractéristiques géologiques locales des sites, aux normes réglementaires modernes mais aussi aux attentes socioculturelles contemporaines.
L'humidité, la gestion de la ventilation, l'éclairage naturel ou encore la difficulté d'extension des volumes creusés témoignent de contraintes importantes et parfois incompatibles avec les modèles d'habitat actuels. De plus, l'urbanisation croissante et la pression foncière menacent la pérennité de ces sites, pourtant exemplaires du point de vue environnemental.

En définitive, habiter sous terre n'apparaît ni comme une solution universelle ou comme un modèle qu'il faudrait généraliser. En revanche, l'étude des cas andalous démontre clairement que les propriétés troglodytiques : inertie thermique, insertion dans le relief, économie de matériaux... constituent des pistes innovantes pour concevoir l'architecture durable de demain.
L'enjeu ne réside donc pas dans la reproduction littérale de ces habitats, mais plutôt dans la réinterprétation de leurs principes, au croisement de l'architecture vernaculaire et de l'innovation contemporaine. À ce titre, les habitations troglodytiques de Guadix et de Setenil de las Bodegas nous invitent à considérer le sol non plus comme une simple surface à bâtir, mais comme une véritable ressource climatique et constructive. Ils ouvrent ainsi la voie à une architecture plus humble, durable et plus résiliente, capable de répondre, avec intelligence et modération, aux défis climatiques extrêmes du XXIe siècle.

Diagramme de synthèse



Ouverture

Si l'architecture troglodytique apparaît aujourd'hui comme une réponse possible aux dérèglements climatiques, elle n'est en réalité qu'une porte d'entrée vers une réflexion plus vaste : celle de la réinvention de nos modes d'habiter à l'heure de la transition écologique. Explorer le potentiel des habitats souterrains revient à interroger notre rapport au sol, au paysage, à la matière et au temps, autant de dimensions essentielles que l'architecture contemporaine redécouvre progressivement.

Dès lors, une nouvelle question se pose : comment combiner l'héritage de ces savoir-faire ancestraux avec les innovations technologiques, les enjeux sociétaux et les imaginaires de demain ?

Les pistes ouvertes par l'habitat troglodytique invitent ainsi à élargir le champ des possibles et à envisager d'autres formes d'architecture bioclimatique, hybrides ou encore réhabilitées, capables de répondre durablement aux futurs défis contemporains auxquels seront confrontés les habitats modernes comme pourrait le faire l'architecture biomimétique.

EPILOGUE

Au terme de cette exploration des habitats troglodytiques, une certitude demeure : ce type d'architecture n'est ni un vestige du passé ni une simple curiosité architecturale. Habiter sous terre est une réponse utile, sensible et durable aux défis climatiques contemporains qui se multiplient. Dans un monde où la pression urbaine s'intensifie et où les conditions météorologiques deviennent de plus en plus extrêmes, l'architecture troglodyte apparaît non seulement comme une solution d'adaptation, mais aussi comme une source d'inspiration pour repenser nos façons d'habiter.

Au travers de cet ouvrage, j'ai essayé de mieux faire connaître le patrimoine troglodytique seulement connu de quelques spécialistes et de ceux qui quotidiennement ou occasionnellement vivent sous terre. En effet, le monde du troglodytisme doit être considéré au même titre que les autres formes d'architecture. Souvent perçus comme exceptionnels et rares, les habitats troglodytiques dans bien des cas sont menacés par l'urbanisation et malheureusement, parfois, disparaissent sous des constructions dont la durabilité n'excède même pas trente ans.

Pourtant, ce savoir-faire ancestral correspond étonnamment bien avec les préoccupations écologiques contemporaines : réduction des besoins énergétiques, intégration paysagère, résilience thermique. Le sous-sol, longtemps perçu comme un refuge ou un repli défensif, devient un espace de vie potentiel d'avenir, où tradition et innovation peuvent se rencontrer.

Puissions-nous considérer ces habitats non comme des survivances marginales, mais comme des modèles d'utilisation environnementale intelligente. J'espère que ce mémoire puisse contribuer à préserver, valoriser et réinventer ce patrimoine unique, afin que les architectures souterraines continuent de nous inspirer et de répondre aux besoins des générations futures.

Annexes

ANNEXES : Bibliographie & Références

Introduction

Livres :

HOUEL J.P., *Voyage pittoresque des Isles de Sicile, de Lipan et de Malte, Imprimerie de Monsieur, 1782-1787*

UTUDJIAN Edouard, *Architecture et urbanisme souterrains*, Paris, Robert Laffont, 1966

VERNE Jules, *Les indes noires,* page 18

WELLS H.G., *La machine à explorer le temps,* 1895 page 50

Partie I : L'architecture troglodyte : une réponse vernaculaire a des défis climatiques historiques

Livres :

ALLEN E., *Stone Shelter*, Cambridge, M.I.T. Press, 1969

BLASQUEZ David, *Pour un habitat troglodytique,* Bordeaux, U.P d'architecture, 1978

CHAULIAGUET Charles, *L'énergie solaire dans le bâtiment*, Paris, Eyrolles, 1978

CHARNEAU Nicolas & TREBBI Jean-Charles, *Maisons creusées, maisons enterrées*, Paris, Alternative, 1981

CRESSET George, *Land of the 500 millions : a geography of China*, Paris, Chêne, 1977

LOUBES Jean-Paul, *Archi troglo,* Roquevaire : Parenthèses, 1984

LOUBES Jean-Paul, *Maisons creusées du Fleuve Jaune,* Editions Creaphis, 1988

LOUIS A., *Tunisie du sud, Ksars et villages de crètes, Paris,* CNRS, 1975

MYRDAL Jan, *Un village de la Chine populaire, Paris,* Gallimard, 1972

NICOLAS F. et VAYE M., *Recherche sur les enveloppes bioclimatiques*, Paris, Plan-Construction, 1978

NICOLETTI Manfredi, *Architettura delle caverne*, Rome, Laterza, 1980

RAPOPORT Amos, *Anthropologie de la maison*, Paris, Dunod, 1972

VON MEISS Pierre & RADU Florine, *Vingt mille lieues sous les terres : espaces publics souterrains,* Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004

Articles de revue relatif au troglodytisme :

CHIORINO Francesca, *GARCIA Anton & MESA Debora,* *Ensamble Studio : Ca'n Terra : il mito della caverna,* Casabella, novembre 2020, n°915

MALUENDA E. & ENCABO SEGUI Enrique, *Ensamble Studio : Parasite souterrain :* L'Architecture d'aujourd'hui, novembre 2020, n°438

Travaux d'étudiants – Mémoires et Thèses :

MARIELLE Bertrand, *L'habitat troglodytique dans le bassin méditerranéen,* Paris : ENSA de Paris-La-Villette , 1977

Partie II : L'architecture troglodyte et hypogeisme comme modèle de durabilité dans le cadre de la résilience climatique

Livres :

ARZOUMANIAN V. & BARDOU P., *Archi de terre*, Roquevaire, Parenthèses, 1978

Ayuntamiento De Guadix, *Las cuevas de Guadix : asi piensa la gente de las Cuevas,* Ed 1989

CAMPION Jean-Philippe, *Les Cuevas à Granada,* Montpellier : EARL , 2000

CAMPBELL S., *The Underground House-Book,* New York, Garden Way, 1980

FLORES Carlos, *Arquitectura popular española 4, La arquitectura blanca de Andalucia y Levante,* Madrid : Aguilar, 1976

GOLDFINGER, *Myron, Villages in the Sun : Mediterranean Community Architecture,* New-York : Praeger Publishers, 1969

MAZRIA E., *Le guide de l'énergie solaire passive,* Roquevaire, Parenthèses, 1981

TRINQUESSE Y., *Soleil en sous-sol,* Paris, Desforges, 1977

UNDERGROUND SPACE CENTER, *Le guide de l'architecture enterrée*, Parenthèses, 1984

UTUDJIAN Edouard, *L'urbanisme souterrain*, Paris, PUF, 1952

UTUDJIAN Edouard, *Architecture et urbanisme souterrains*, Paris, Robert Laffont, 1966

Travaux d'étudiants – Mémoires et Thèses :

ALONSO-MARTIN Inès, *Etude sémiotique du Sacromonte : l'émergence d'un quartier référentiel de Grenade,* Paris : ENSAPVS, 2020

SERVERA François, *Les cuevas du Sacramonte de Grenade : habiter la terre,* Paris : ENSAPVS, 2013

Partie III: Réponses aux défis climatiques contemporains : perspectives d'avenir de l'architecture troglodytique et adaptation aux normes modernes

Livres :

BERTHOLON Patrick & HUET Olivier, *Habitat creusé / Le patrimoine troglodytique et sa restauration*, Au pied du mur, Eyrolles, 2005

CAMPBELL Stu, *The Underground House Book,* 1980

JACOBS Herbert & Katherine, *Building with Frank Lloyd Wright*

NICOLETTI Manfredi, *Architettura delle caverne*, Rome, Laterza, 1980

RAGON M., *Où vivrons-nous demain ?,* Paris, Robert Laffont, 1963

RUDOFSKY B., *L'architecture insolite*, Paris, Tallandier, 1979

SOLERI PAOLO, *Arcologie, la ville à l'image de l'homme,* 1980

Underground Space Center, *Earth Sheltered Housing Design*

WELLS Malcolm, *To Build Without Destroying the Earth*

WILLIAMS John & PAULUS Paul, *L'utilisation des bâtiments recouverts de terre*

Articles de revue relatif au troglodytisme :

MOLLARD Manon, *Future archaeology,* Architectural review, avril 2021, n°1480

Travaux d'étudiants – Mémoires et Thèses :

LAKTAOUI Yoan, *Habiter le sol naturel pour vivre de façon soutenable,* Nancy : ENSA de Nancy, 2022

ANNEXES : Tableaux comparatif des études de cas

Les qualités du confort usuel des habitations troglodytiques dans les régions étudiées :

Critères d'analyse / Régions étudiées	Andalousie (Espagne)	Tunisie
Inertie thermique	Élevée : température stable, idéale pour climats chauds et modérés	Moyenne à élevée : bonne protection contre la chaleur
Hygrométrie	Modérée : faible humidité naturelle, évite l'accumulation d'humidité excessive	Faible : très sèche en raison du climat désertique
Éclairage naturel	Moyen : ouvertures limitées, recours à des puits de lumière	Faible : ouvertures réduites pour conserver la fraîcheur
Capacité à accueillir des réseaux de fluides	Bonne : compatible avec l'installation de plomberie et d'électricité moderne	Moyenne : nécessite des aménagements spécifiques pour installer des infrastructures
Possibilité d'extension du logement	Bonne : l'argile et le calcaire sont faciles à creuser, extensions réalisables	Moyenne : les matériaux rocheux et sableux sont plus limitants
Confort thermique	Élevé : frais en été, tempéré en hiver	Très élevé : maintien de la fraîcheur, mais peut nécessiter du chauffage en hiver
Coût d'entretien	Modéré : nécessite un entretien pour limiter l'érosion	Faible : peu de maintenance requise, sauf pour les ouvertures
Isolation acoustique	Très bonne : murs épais bloquent les bruits extérieurs	Bonne : l'argile et le sable offrent une isolation satisfaisante
Esthétique intérieure	Agréable : murs en argile/calcaires souvent décorés	Rustique : charme minimaliste des matériaux bruts

Cappadoce	Shensi (Chine)
Très élevée : performance exceptionnelle dans les variations extrêmes	Bonne : température stable pour les climats continentaux
Très basse : les roches volcaniques absorbent peu d'humidité	Moyenne : nécessite parfois une gestion de l'humidité en raison des loess
Moyen : utilisation de fenêtres et de puits de lumière	Faible : dépend souvent d'aménagements pour améliorer l'entrée de lumière
Très bonne : le tuf est facile à travailler pour intégrer des réseaux modernes	Moyenne : le loess est fragile, ce qui peut compliquer les travaux
Très bonne : le tuf est facile à modeler pour agrandir ou modifier les habitations	Moyenne : les risques d'effondrement limitent les extensions importantes
Exceptionnel : confort maximal été comme hiver	Bon : stable mais nécessite un chauffage supplémentaire en hiver
Modéré : érosion naturelle du tuf peut nécessiter des réparations périodiques	Modéré à élevé : le loess peut nécessiter des consolidations régulières
Excellente : les murs en tuf absorbent efficacement les sons	Moyenne : les habitations en loess sont moins isolantes acoustiquement
Unique : murs sculptés dans le tuf, ambiance chaleureuse	Fonctionnelle : murs en loess souvent laissés bruts ou peu décorés

Les performances climatiques, énergétiques et écologiques des différents habitats troglodytes dans le monde :

Critères d'analyse / Régions étudiées	Espagne	Tunisie
Types d'habitats	Maisons troglodytiques creusées dans des collines ou sous des formations rocheuses	Maisons troglodytiques creusées dans des collines argileuses, souvent en structure circulaire
Matériau naturel	Roches volcaniques (Guadix), calcaires (Setenil), argileuses (Cuevas de Almanzora, Purullena)	Argile compacte et grès
Régulation thermique	Température constante entre 18 et 20 °C en moyenne, adapté aux climats chauds	Température stable et fraîche (15-18 °C), idéal pour les zones désertiques
Adaptation au climat	Adapté aux climats méditerranéens et semi-arides, protection contre les chaleurs intenses	Adapté aux climats désertiques chauds et arides
Ressources énergétiques	Faible consommation d'énergie pour maintenir un confort thermique	Réduction quasi-totale de la dépendance aux systèmes de climatisation
Durabilité	Longue durée de vie, mais entretien nécessaire selon la qualité de la roche	Très durable grâce à l'argile compacte, faible entretien requis
Résistance aux conditions externes	Bonne protection contre les températures extrêmes, mais vulnérabilité en cas d'érosion	Protection efficace contre la chaleur intense et les vents secs du désert
Confort climatique	Confort optimal dans des climats chauds et secs	Confort optimal dans des régions chaudes et sèches
Impact environnemental	Écologique, utilisant des matériaux naturels et minimisant l'impact sur le paysage	Très écologique, utilisant des matériaux locaux et minimisant l'impact environnemental
Particularités régionales	Présence dans plusieurs régions d'Andalousie, intégration esthétique et fonctionnelle	Présence dans les villages berbères comme Matmata, souvent utilisées comme habitations familiales

Cappadoce	Chine
Maisons troglodytiques creusées dans des cheminées de fée, des formations rocheuses volcaniques	Principalement les yaodongs (grottes creusées dans des falaises ou des plaines de loess)
Roches volcaniques tendres (tuf)	Loess : roche meuble et isolante
Excellente isolation thermique, température intérieure stable autour de 15-20 °C	Excellente isolation, température stable entre 10 et 15 °C toute l'année
Adapté aux climats continentaux (étés chauds, hivers froids)	Idéal pour des climats continentaux (hivers froids, étés chauds)
Réduction des besoins en chauffage l'hiver et en refroidissement l'été	Réduction des besoins en chauffage l'hiver et en refroidissement l'été
Durable, mais nécessite un entretien régulier pour éviter l'érosion	Très durable grâce à la structure compacte du loess, résistante aux intempéries
Bonne résistance aux variations climatiques et à l'humidité	Bonne résistance au vent, aux variations climatiques et à l'humidité
Confort optimal pour les régions avec des écarts thermiques importants	Confort optimal dans des régions avec des écarts thermiques importants
Faible empreinte écologique, matériaux locaux et intégration dans le paysage naturel	Faible empreinte écologique, matériaux locaux utilisés
Présence dans la région de Göreme, utilisation souvent liée à des fonctions religieuses (églises, monastères)	Présence dans les régions de loess du nord de la Chine, style de vie communautaire marqué

Les performances climatiques, énergétiques et écologiques des différents habitats troglodytes des villages andalous étudiés :

Critères d'analyse / Etude de cas	Guadix	Setenil de las Bodegas	Baza
Type de structures	Grottes creusées dans la roche tendre	Maisons sous et entre des rochers massifs	Grottes troglodytiques souvent profondes
Matériaux utilisés	Roches volcaniques tendres et argile	Roches calcaires et substrats naturels	Argile et matériaux sédimentaires
Disposition des habitations	Souterraines, avec façades visibles	Intégrées sous des formations rocheuses verticales	Souterraines et dispersées
Éléments architecturaux	Façades blanchies, intérieurs spacieux	Murs et plafonds naturels en roche brute	Façades blanchies, structures basiques
Climatisation naturelle	Stable grâce à l'épaisseur des parois	Ombre naturelle des rochers	Régulation thermique stable
Esthétique extérieure	Entrées souvent blanchies à la chaux	Contraste marqué entre roche brute et murs peints	Apparence rustique, peu ornementée
Évolution historique	Développé sous influence arabe	Exploité dès le Moyen Âge	Origines arabes et médiévales
Adaptation au terrain	Structures horizontales sur collines rocheuses	Constructions verticales dans un canyon rocheux	Habitations en pente douce sur terrains argileux
Fonctionnalités modernes	Hôtels, maisons modernes	Constructions modernisées tout en gardant les rochers	Certaines habitations transformées en musées
Tourisme	Sites célèbres pour leur histoire et architecture	Destination unique pour son urbanisme étonnant	Moins connu mais avec un potentiel historique

Gorafe	Cuevas de Almanzora	Caniles	Purullena
Habitations troglodytiques groupées en colonnes	Grottes aménagées dans les collines	Habitations troglodytiques avec espaces modernisés	Grottes troglodytiques avec une forte densité
Roches argileuses et sédimentaires	Argile et calcaires des collines	Argile compactée et roche tendre	Argile et calcaire avec des revêtements modernes
Groupées sur des terrains escarpés	Constructions dans les collines basses	Regroupées en petits ensembles familiaux	Densité élevée sur terrains plats et collines
Façades simples, souvent rustiques	Maisons troglodytiques avec finitions modernes	Simplicité architecturale	Façades et entrées souvent colorées
Isolation naturelle par la roche	Bonne régulation thermique naturelle	Température stable été comme hiver	Température constante, très adaptée au climat chaud
Sobre, intégrée au paysage désertique	Intégration visuelle moderne et traditionnelle	Apparence rustique avec quelques modernisations	Couleurs vives sur certaines entrées
Liens avec l'époque préhistorique	Développé sous l'influence romaine et arabe	Évolution lente vers des habitations modernes	Développement grâce à la proximité de Guadix
Exploitation de falaises naturelles	Façades exposées, creusées dans les collines	Construction adaptée aux terrains plats et collines	Exploitation maximale des collines
Simples modernisations pour la plupart	Fort développement touristique et modernité	Habitations modernisées mais peu touristiques	Maisons modernes et hôtels
Destination paisible, peu touristique	Destination touristique reconnue	Peu touristique mais pittoresque	Fortement tournée vers le tourisme

Tableau comparatif des climats :

Critères d'analyse / Régions étudiées	Andalousie (Espagne)	Tunisie
Température moyenne annuelle	Environ 16-18 °C	Environ 20-22 °C
Été	Très chaud, souvent 35-40 °C	Caniculaire, souvent > 40 °C
Hiver	Doux, autour de 8-12 °C	Doux, entre 10-15 °C
Ensoleillement annuel	Très élevé, environ 3 000-3 300 heures / an	Extrêmement élevé, > 3 400 heures
Précipitations annuelles	Environ 300-500 mm / an	Faible, < 200 mm
Type de climat	Méditerranéen et semi-aride	Désertique chaud
Humidité relative	Faible, souvent autour de 40-50 %	Très faible, souvent < 30 %
Caractéristiques climatiques	Étés longs, chauds et secs, hivers doux	Étés torrides, très secs, nuits fraîches
Vents dominants	Alizés méditerranéens chauds	Vent chaud et sec (sirocco), pouvant soulever des tempêtes de sable
Adaptation des habitats	Protection contre la chaleur estivale grâce à l'épaisseur des structures troglodytes	Adaptation pour maximiser la fraîcheur dans un environnement aride

Cappadoce	Shensi (Chine)
Environ 12-15 °C	Environ 13-15 °C
Chaud, entre 25-30 °C	Chaud, autour de 30-35 °C
Froid, souvent -5 à 5 °C, avec neige	Froid, autour de -5 à 5 °C
Environ 2 700-3 000 heures	Modéré, environ 2 000-2 500 heures
Environ 300-400 mm	Modéré à faible, environ 500-600 mm
Continental sec	Continental avec influences semi-arides
Modérée, autour de 50-60 %	Modérée à faible, autour de 40-50 %
Étés secs et chauds, hivers froids et neigeux	Grandes variations saisonnières, étés chauds et humides, hivers froids et secs
Vents modérés, parfois des vents froids en hiver	Vents de type continental, parfois chargés de poussière en été
Protection contre le froid hivernal et la chaleur estivale grâce aux roches volcaniques	Régulation thermique naturelle grâce à l'isolation des grottes en loess

Tableau comparatif de la géographie et géologie :

Critères d'analyse/ Régions étudiées	Andalousie (Espagne)	Tunisie
Climat	Méditerranéen : étés chauds et secs, hivers doux	Désertique chaud : étés torrides, très faibles précipitations
Températures moyennes	Étés : 35-40 °C, Hivers : 8-12 °C	Étés : > 40 °C, Hivers : 10-15 °C
Précipitations annuelles	300-500 mm	< 200 mm
Géologie	Roches calcaires, sols argileux, montagnes et plaines fertiles	Argile compacte, sable, formations rocheuses semi-arides
Relief dominant	Montagnes (Sierra Nevada), plaines ondulées, vallées fluviales	Déserts, dunes, collines basses
Caractéristiques géographiques	Riche diversité : montagnes, plaines, vallées fluviales et littoral	Étendues désertiques avec oasis, paysages arides
Ressources naturelles	Sols fertiles, oliviers, minéraux, agriculture	Sols arides, nappes phréatiques dans les oasis
Végétation	Méditerranéenne : oliviers, chênes-lièges, vignobles	Très faible : palmiers-dattiers, plantes résistantes au désert
Hydrographie	Présence de fleuves comme le Guadalquivir	Rivières intermittentes ou asséchées, oasis
Attrait visuel	Combinaison de reliefs majestueux et campagnes verdoyantes	Étendues désertiques, beauté minimaliste des oasis

Cappadoce	Shensi (Chine)
Continental sec : étés chauds, hivers froids avec neige	Continental humide à semi-aride : étés chauds et humides, hivers froids
Étés : 25-30 °C, Hivers : -5 à 5 °C	Étés : 30-35 °C, Hivers : -5 à 5 °C
300-400 mm	500-600 mm
Formations volcaniques : tuf tendre érodé en cheminées de fée	Loess fertile, plateaux calcaires, collines érodées
Plateaux volcaniques, formations rocheuses sculptées par l'érosion	Plateaux de loess, montagnes, vallées fluviales
Paysages uniques avec cheminées de fée, vallées encaissées, étendues semi-arides	Paysages variés : plateaux fertiles, montagnes, vallées du fleuve Jaune
Tuf volcanique, terres fertiles dans les vallées	Sols fertiles en loess, grandes réserves d'eau dans le fleuve Jaune
Faible : steppe, arbustes résilients	Mixte : forêts tempérées, terres agricoles fertiles
Faible, absence de grandes rivières	Fleuve Jaune, grandes nappes phréatiques
Paysages sculptés et iconiques, couleurs contrastées	Contrastes entre plateaux fertiles, vallées fluviales et montagnes escarpées

Tableau comparatif des propriétés thermique et performances des différents types de roches des habitats troglodytiques des régions étudiées :

Critères d'analyse / Régions étudiées	Andalousie (Espagne)	Tunisie
Type de roche	Argile compacte et calcaire	Argile sableuse et grès
Conductivité thermique	Modérée à faible, entre 0,6-1,2 W/mK	Faible, environ 0,5-0,8 W/mK
Inertie thermique	Élevée, capable de maintenir une température intérieure stable	Moyenne à élevée, offre un bon tampon thermique
Capacité isolante	Bonne, adaptée aux variations diurnes et saisonnières	Bonne, surtout pour résister à la chaleur intense
Résistance aux températures élevées	Très bonne, protège contre les fortes chaleurs estivales	Très bonne, efficace face aux températures > 40 °C
Capacité à conserver la fraîcheur	Très efficace grâce à l'épaisseur des murs en argile ou calcaire	Très efficace, exploite les propriétés naturelles des roches sableuses
Adaptabilité au froid	Bonne, conserve une température modérée en hiver	Moyenne, offre une protection suffisante contre le froid
Durabilité	Très durable, mais vulnérable à l'érosion éolienne	Durable, mais sensible aux tempêtes de sable
Coût énergétique	Très faible, peu de besoins en chauffage ou climatisation	Très faible, le climat intérieur est naturellement régulé
Particularités	Bonne combinaison d'isolation et d'inertie thermique	Matériaux adaptés à des environnements désertiques extrêmes

Cappadoce	Shensi (Chine)
Tuf volcanique	Loess
Très faible, environ 0,4-0,6 W/mK	Faible, environ 0,3-0,5 W/mK
Très élevée, idéale pour réguler les variations de température	Modérée, suffisante pour des écarts thermiques modérés
Excellente, offrant une protection maximale contre les variations extrêmes	Bonne, mais moins performante en conditions climatiques extrêmes
Excellente, conserve une température stable même sous des chaleurs extrêmes	Modérée, peut nécessiter des aménagements pour maximiser l'isolation
Exceptionnelle, les propriétés du tuf offrent une fraîcheur durable	Bonne, mais dépend fortement de l'épaisseur et de l'aménagement
Excellente, le tuf conserve une chaleur suffisante en hiver	Bonne, mais nécessite parfois un renforcement thermique
Très durable, peu sensible à l'érosion	Durable, mais le loess peut être sujet à des glissements de terrain
Très faible, les propriétés thermiques du tuf réduisent la dépendance énergétique	Faible à modéré, nécessite parfois des ajustements pour améliorer le confort
Matériau idéal pour des conditions climatiques variables	Utilisé dans des climats continentaux, moins performant pour les variations extrêmes

ANNEXES :
Questionnaire pour un entretien avec un habitant d'une maison troglodyte en Andalousie

Phrases d'accroche : Merci de participer à cet entretien. Nous aimerions en savoir plus sur votre expérience en tant qu'habitant d'une maison troglodyte en Andalousie. Vos réponses contribueront à mieux comprendre cet habitat unique, son lien avec son environnement et ses perspectives d'avenir.

A. Contexte personnel et historique :

1. Pouvez-vous vous présenter brièvement et nous parler de votre parcours dans la vie ?
2. Depuis combien de temps habitez-vous dans une maison troglodyte ?
3. Avez-vous grandi dans ce type d'habitat ou est-ce un choix que vous avez fait plus tard ? Pourquoi ?
4. Pouvez-vous nous raconter l'histoire de votre maison troglodyte ?

B. Architecture et aménagement :

5. Quelles sont, selon vous, les principales caractéristiques architecturales de votre maison troglodyte ?
6. Quels matériaux ou techniques spécifiques ont été utilisés dans sa construction ou sa rénovation ?
7. Avez-vous apporté des modifications ou rénovations à votre maison ? Si oui, lesquelles et pourquoi ?
8. Comment décririez-vous la répartition des espaces intérieurs ? Est-elle fonctionnelle pour votre mode de vie ?
9. Quels sont les avantages et inconvénients liés au fait de vivre dans une maison troglodyte en termes de confort et de fonctionnalité ?

C. Expérience de vie quotidienne :

10. Comment votre maison troglodyte répond-elle aux variations climatiques (été, hiver) ?
11. Quelles sont les différences majeures avec un habitat "traditionnel" en surface ?
12. Quels aspects de votre vie quotidienne sont directement influencés par la nature troglodyte de votre maison ?
13. Y a-t-il des particularités dans l'entretien ou la maintenance de ce type de logement ?

D. Dimension patrimoniale et sociale :

14. Quel lien entretenez-vous avec le patrimoine troglodyte local ?
15. Avez-vous l'impression que ce type habitat est reconnu et valorisé dans la région ?
16. Comment les habitants de votre communauté perçoivent-ils les maisons troglodytes ?
17. Y a-t-il des initiatives locales pour préserver ou promouvoir ce type d'habitat ?

E. Perspectives et réflexions :

18. Pensez-vous que les maisons troglodytes pourraient répondre aux besoins modernes de logement, en particulier dans les environnements climatiques extrêmes ?
19. Selon vous, quels sont les principaux défis liés à la préservation ou à la modernisation des habitations troglodytes ?
20. Si vous pouviez améliorer un aspect de votre maison troglodyte, lequel serait-il et pourquoi ?
21. Recommanderiez-vous ce type d'habitat à d'autres personnes ? Si oui, pourquoi ?

Conclusion : Merci beaucoup pour votre temps et vos réponses précieuses. Y a-t-il autre chose que vous souhaiteriez partager à propos de votre expérience dans une maison troglodyte ?

ANNEXES :

Questionnaire pour un entretien avec un architecte ou spécialiste travaillant sur l'architecture troglodytique en Andalousie

Phrases d'accroche : Merci de participer à cet entretien. Nous souhaitons explorer votre expertise sur l'architecture troglodyte, vos projets, et votre vision de cet habitat unique dans un contexte contemporain. Vos réponses permettront d'approfondir notre compréhension des enjeux et opportunités liés à ce type d'architecture.

A. Parcours professionnel et spécialisation :

1. Pouvez-vous vous présenter et nous parler de votre parcours en architecture ?
2. Qu'est-ce qui vous a amené à vous intéresser à l'architecture troglodyte en Espagne ?
3. Avez-vous travaillé spécifiquement sur des projets liés à l'architecture troglodyte en Andalousie, comme à Setenil de las Bodegas ou Guadix ? Si oui, pouvez-vous en parler ?
4. Comment définiriez-vous votre approche architecturale vis-à-vis de ce type d'habitat ?

B. Analyse des spécificités architecturales :

5. Quelles sont, selon vous, les principales caractéristiques de l'architecture troglodyte en Espagne ?
6. Comment les spécificités géologiques des régions troglodytes influencent-elles vos choix architecturaux ?
7. Quels sont les avantages fonctionnels et architecturaux des habitations troglodytes, notamment en termes de régulation thermique et de durabilité ?
8. Quels défis spécifiques rencontrez-vous lorsque vous travaillez sur des projets troglodytes, qu'il s'agisse de rénovation ou de nouvelles constructions ?

C. Techniques et matériaux :

9. Quelles techniques de construction troglodyte traditionnelle utilisez-vous ou adaptez-vous dans vos projets ?
10. Intégrez-vous des matériaux ou technologies modernes dans ces projets ? Si oui, comment les combinez-vous avec les pratiques traditionnelles ?
11. En quoi l'architecture troglodyte se distingue-t-elle en termes de gestion des ressources locales et de faible impact environnemental ?
12. Y a-t-il des innovations récentes qui facilitent la réhabilitation ou la construction troglodyte ?

D. Enjeux contemporains :

13. Selon vous, l'architecture troglodyte peut-elle répondre aux défis actuels comme la crise du logement ou le changement climatique ?
14. Comment ce type d'habitat pourrait-il être intégré dans des contextes urbains ou modernisés ?
15. Voyez-vous un potentiel de l'architecture troglodyte dans d'autres régions du monde aux conditions climatiques similaires ?
16. Quelles sont les principales contraintes économiques, sociales ou réglementaires que vous rencontrez dans vos projets ?

E. Patrimoine et culture :

17. Quel rôle joue l'architecture troglodyte dans le patrimoine architectural et culturel espagnol ?
18. Comment travaillez-vous pour préserver l'identité culturelle de ces habitats tout en répondant aux besoins modernes ?
19. Y a-t-il des initiatives ou collaborations locales qui favorisent la valorisation et la préservation de ces structures ?

F. Perspectives et réflexions :

20. Quels sont, selon vous, les aspects les plus prometteurs de l'architecture troglodyte pour l'avenir de l'architecture durable ?
21. Pensez-vous que ce type d'habitat pourrait influencer des tendances architecturales à plus grande échelle ?
22. Si vous aviez carte blanche pour un projet troglodyte, que concevriez-vous et pourquoi ?
23. Quels conseils donneriez-vous à de jeunes architectes souhaitant travailler sur l'architecture troglodyte ?

Conclusion : Merci beaucoup pour cet échange. Y a-t-il d'autres aspects de l'architecture troglodyte que vous aimeriez évoquer ou que vous jugez importants ?

ANNEXES :
Etude de projets innovants d'architecture troglodyte contemporaine face aux climats extrêmes

Gîte de montagne de Moncaup (Haute-Garonne)

Architectes : Max Boisrobert, Danièle Fourcade

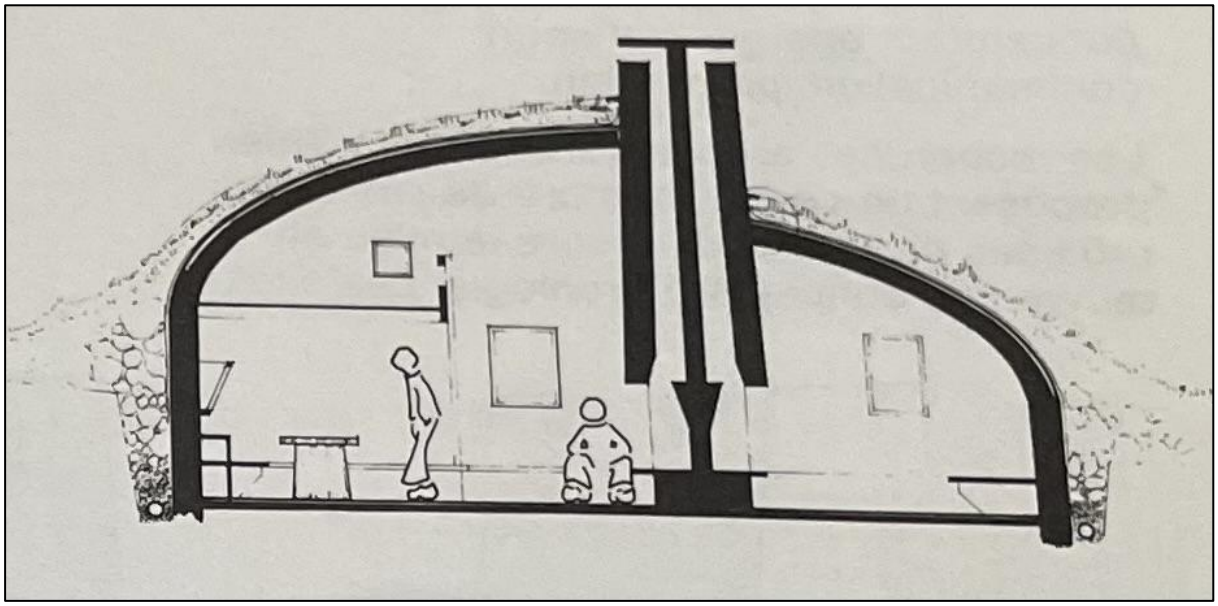


Figure 325 : Gîte de montagne de Moncaup (Haute-Garonne), Max Boisrobert & Danièle Fourcade, Coupe transversale. Source :

Maison de vacances au Danemark

Architecte : Claus Bonderup



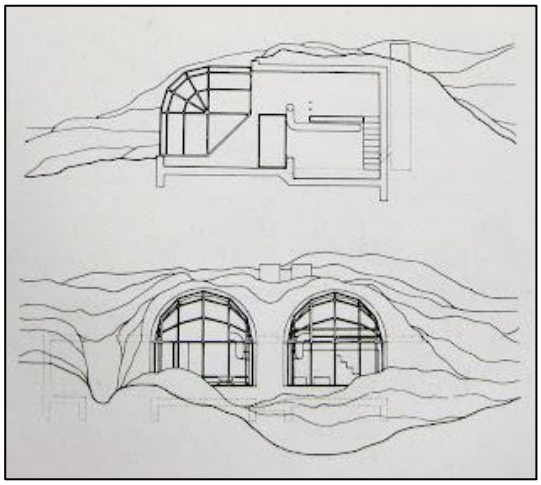


Figure 326 & 327 : Maison de vacances au Danemark, Claus Bonderup. Coupe transversale. Source : https://es.pinterest.com/

Le bâtiment se fond dans le paysage riche en dunes de sable couvertes de broussailles.
Les seules éléments signalant la présence de l'habitat consistent en deux quarts de sphère vitrés qui ouvrent des vues sur la mer.
La structure est composée de deux coques accouplées en béton qui supportent le poids du sable.

Random House

Architecte : Malcom Wells, 1964

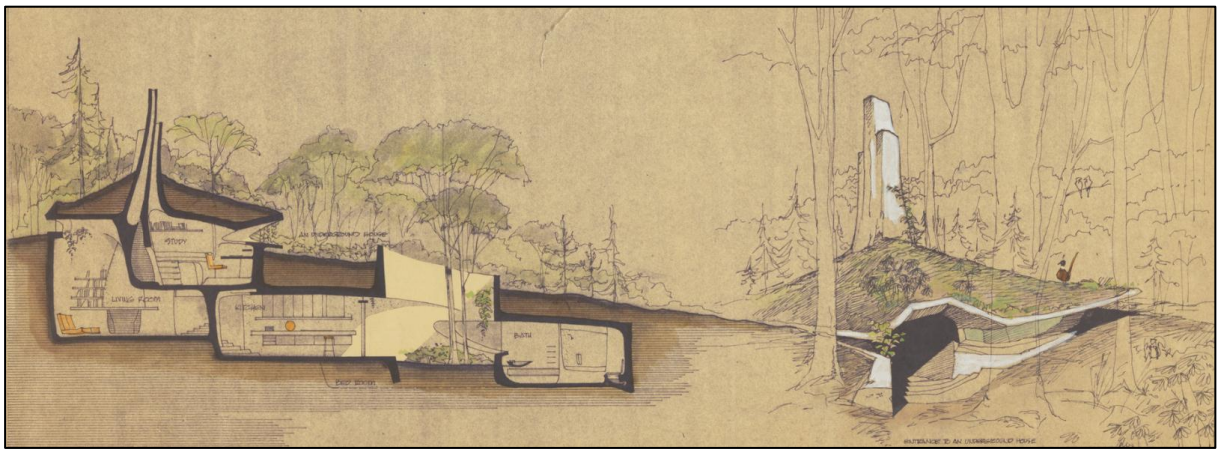


Figure 328 : Random House, Malcolm Wells, 1964, Coupe et axonométrie.
Source : moma.org

Malcolm Wells utilise dans ce projet une technique de coque non préfabriquée, construite sur place. Un grand trou est excavé, dans lequel on construit une coque moulée sur place donnant la forme sur laquelle est posée l'isolation, puis renforcée par une seconde coque étanchéifiée sur toute la surface périphérique. Un épaisse couverture de terre enveloppe l'ensemble de l'habitation.

Clark-Nelson House à River Falls (Wiscousin)

Architectes : Michael Mc Guire, 1972

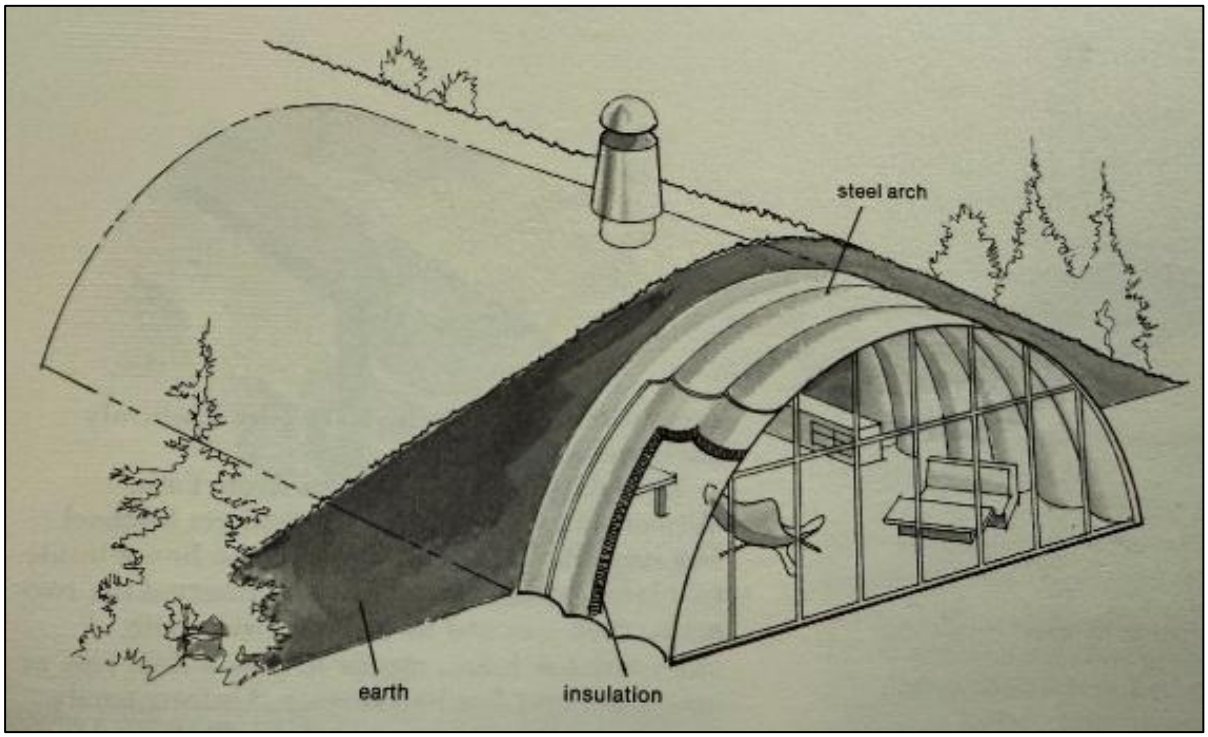


Figure 329 : Clark-Nelson House, River Falls (Wiscousin), Michael Mc Guire, 1972, Schéma de détails constructifs.

Grotte Davis à Armington (Illinois)

Architecte : Andy Davis

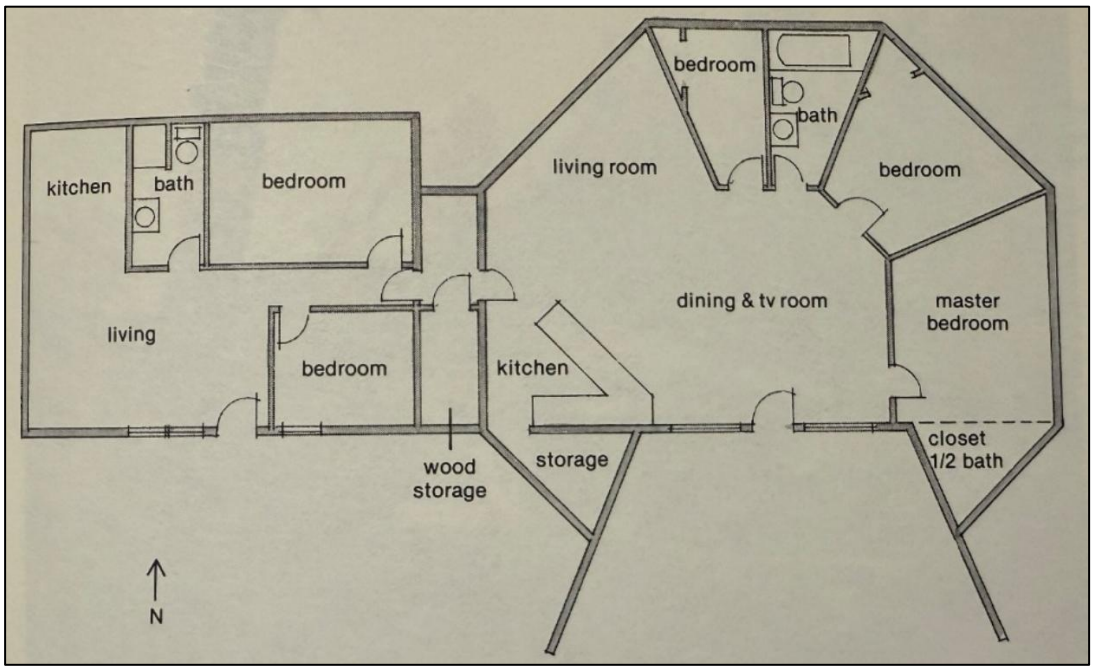


Figure 330 : Grotte Davis, Armington (Illinois), Andy Davis, Plan d'étage.

Grotte Log-End à West Chazy (New York)

Architecte : Rob Roy

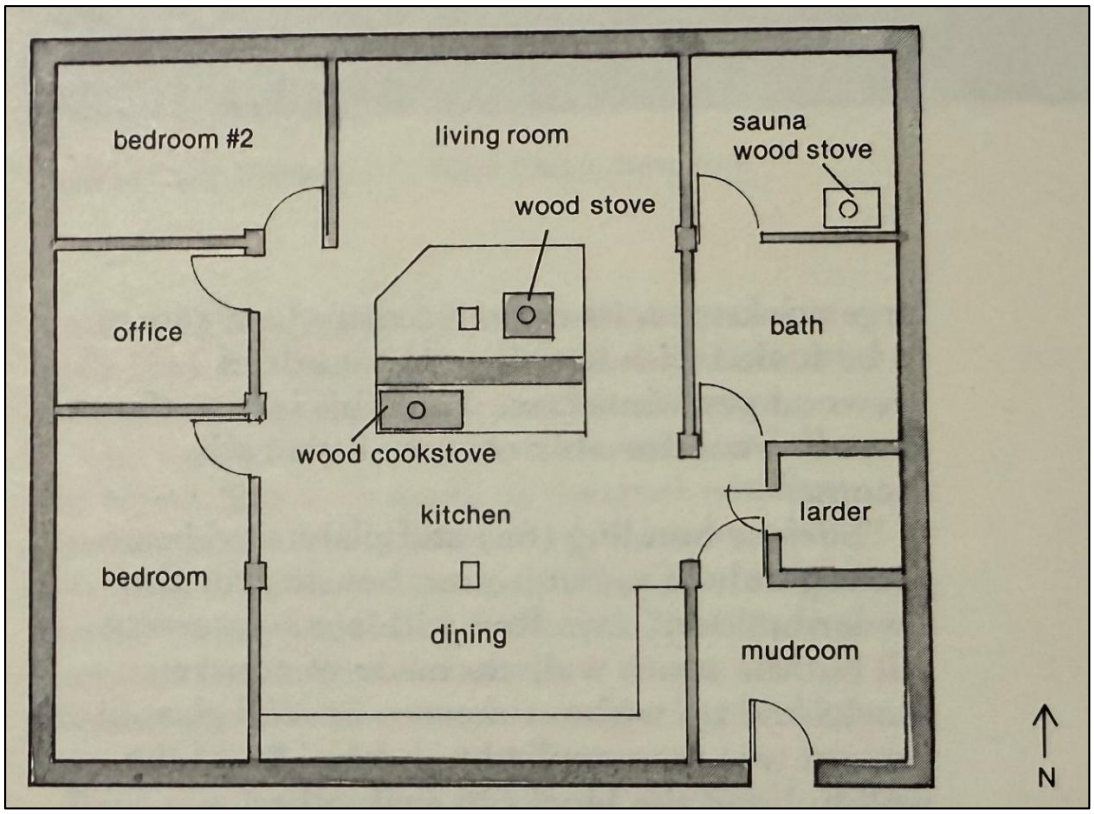


Figure 331 : Grotte Log-End, Murtagh Hill, West Chazy (New York), Rob Roy, Plan d'étage.

Crédits

Plans, croquis, schémas :

CAMPBELL Stu, *The Underground House Book,* 1980

CHARNEAU Nicolas & TREBBI Jean-Charles, *Maisons creusées, maisons enterrées*, Paris, Alternative, 1981,

LOUBES Jean-Paul, *Archi troglo,* Roquevaire : Parenthèses, 1984

LOUBES Jean-Paul, *Maisons creusées du Fleuve Jaune,* Editions Creaphis, 1988

NICOLETTI Manfredi, *Architettura delle caverne*, Rome, Laterza, 1980,

Photographies :

Sauf mention, toutes les autres photographies sont de Dorian Jouvenot

Cartes :

Mise en forme par Dorian Jouvenot

Conception graphique : Jouvenot Dorian
Mise en pages : Jouvenot Dorian

Cet ouvrage a été réalisé par Dorian JOUVENOT
Imprimé le 15 décembre 2025 par Dorian Jouvenot sur les presses de l'imprimerie de l'ENSAPVS
75013 Paris
Dépôt légal : 03 décembre 2025

HABITER SOUS TERRE :
L'architecture troglodyte comme solution d'habitat face aux climats extrêmes

Cet ouvrage offre, au travers de centaines de documents et de photographies, un voyage fascinant historique et analytique à la découverte des habitats troglodytiques de l'Antiquité jusqu'à l'architecture contemporaine. En effet, des milliers de personnes vivent toujours dans des habitats troglodytiques.

L'ouvrage livre les secrets de cette architecture minéral qu'on retrouve sous toutes les latitudes. Il propose une étude des conditions d'établissement, des aménagements et des propriétés énergétiques qui caractérisent les habitats troglodytiques. L'ouvrage relate ainsi de faits sur l'inertie thermique, les contraintes du sol, l'éclairage, le contrôle de l'humidité ou encore l'intimité, le financement ou les émotions que procure cette architecture aux propriétaires.

Les habitats troglodytiques offrent aux architectes des sources de réflexion qui peuvent servir de réponse à de nombreux problèmes liés au logement moderne. Issu d'une architecture bioclimatique, ils permettent de réaliser des économies d'énergie conséquente afin de réduire les coûts de chauffage et de climatisation, des frais d'entretien minimaux et l'utilisation optimale de sites non adaptés à la construction de logements conventionnels. Ces maisons sont également compatibles avec les systèmes de chauffage solaire passifs, sont bien insonorisées et bénéficient d'une protection idéale contre les intempéries.

Ainsi cet ouvrage présente et met en avant les techniques de construction troglodytiques comme solution d'habitats face aux problématiques dans les régions soumises aux conditions climatiques extrêmes. Cet ouvrage, tout en promenant le lecteur dans le passé, ouvre en grand au public une porte sur de nouveaux horizons...souterrains !



Photo de quatrième de couverture : Mirador Balcon de Setenil de las Bodegas, Andalousie (Espagne).