

Glenn PITIOT - Clément DESODT
Hélène HORSIN MOLINARO

Édité le
13/02/2023

école
normale
supérieure
paris-saclay

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Glenn Pitiot, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

L'histoire des habitations troglodytes débute à l'époque du néolithique¹, au moment où l'humanité devient sédentaire et délaisse la chasse et la cueillette pour l'agriculture et l'élevage. Avant cette époque, l'Homme du paléolithique utilisait ces cavités périodiquement pour se prémunir de dangers ou d'intempéries. L'origine du mot troglodyte vient du grec *τρώγλη* (*tróglê*) qui signifie 'caverne', et *δύειν* (*dýeiê*) qui signifie 'pénétrer dans, plonger'. Un troglodyte est donc littéralement un être (humain ou animal) habitant une caverne ou une grotte naturelle ou encore un habitat creusé dans la roche ou s'appuyant sur celle-ci. Le Troglodyte creuse une cavité et l'utilise pour vivre ou servir de lieux culturel, funéraire, défensif ou encore économique [1].

L'habitat troglodytique ne nécessite pas de transport de matériaux, il est, en ça, relativement facile à mettre en œuvre. C'est ainsi que l'on retrouve ce type de constructions dès les temps les plus reculés, et notamment dans les régions arides, où les conditions météorologiques sont particulièrement dures (tempête de sable, gradient de température entre le jour et la nuit très important) et où les matériaux de construction tel que le bois sont particulièrement rares. Notons cependant que creuser sa maison dans une roche tendre et non friable exige une bonne connaissance de l'environnement. Un autre avantage de l'habitat troglodytique troglodytisme réside dans son confort thermique. La température dans ce type d'habitation, par l'inertie thermique de la roche, est relativement constante et égale à la moyenne thermique de la région (douce l'hiver et fraîche l'été). Un dernier de ses avantages réside dans sa discrétion qui lui donne parfois une fonction de refuge [2].

Le nombre important de sites troglodytiques, du bassin méditerranéen jusqu'en Chine mais aussi dans le nord de l'Europe ou sur le continent américain, témoigne des qualités et de l'universalité de ce type d'habitat (figure 1). Le plus vieux site troglodytique connu est celui de Beersheba (Israël). 200 à 300 personnes pouvaient vivre sur ce site dans une trentaine d'habitat datant du quatrième millénaire.

Cette ressource propose une introduction à l'habitat troglodyte en présentant la formation des roches dans lesquelles il est creusé, les particularités liées à ce type d'habitat sont explorées comme la gestion de l'humidité, le renouvellement de l'air, la gestion de la thermique.

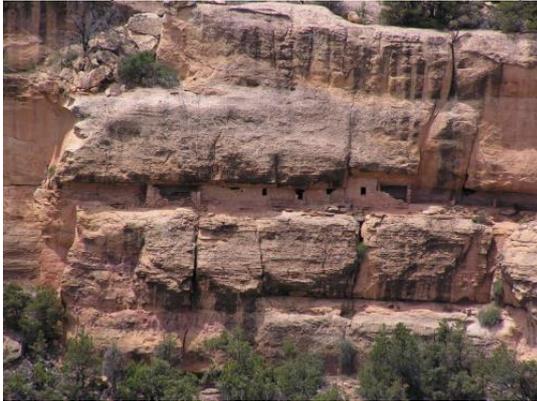
¹ Le néolithique commence au IX^e siècle av J.-C. au Proche-Orient, atteint la Grèce au VII^e siècle av J.-C., et s'achève avec la diffusion de la métallurgie du bronze (3 000 av J.-C.). Il est marqué par des mutations techniques (outillage en pierre polie, poterie, tissage, habitat) et sociales (groupes humains sédentaires).



(a) Les tombeaux royaux de la cité de Petra (Jordanie, premières décennies de notre ère)



(b) Habitat troglodytique à Guyaju (Chine, VII^e siècle)



(c) Structure troglodytique du comté de Montezuma (USA)



(d) Église San Luca alla Selva des Sassi de Matera (Italie, VIII^e siècle)

Figure 1 : Exemples de constructions troglodytiques à travers le monde, sources [3] [4] [5] [6]

1 – Introduction

En général les constructions troglodytiques profitent des dénivelés du terrain (falaises, collines, escarpements, ...) pour s’implanter (figures 1a, 1b 1c, 4a et 4b).

La culture de la maison troglodyte, malgré une uniformisation de l’habitat, a perduré dans le temps et dans le monde : la Chine possède sur son territoire actuellement plus de 40 millions d’habitations troglodytes ; en Tunisie, des complexes hôteliers prennent place dans d’anciens sites ; en France, en Espagne, en Italie plusieurs sites continuent d’être habités. Au début du XX^e siècle, quelques dizaines de milliers d’habitats troglodytiques étaient occupés en France. Dans les années 1960, on estimait à vingt-cinq mille les troglodytes en France. Actuellement, on peut les estimer à quelques centaines ou peut-être quelques milliers, dont un bon nombre se situe en Anjou (figure 2a) : l’Anjou et la Touraine sont les régions où se situent principalement le troglodytisme en France [2].



Figure 2 : (a) Habitat troglodytique de la Massonnière à Grevellec (Maine-et-Loire) et (b) à Geulhem (Fauquemont-sur-Gueule, Pays-Bas), sources [7] [8]

Le roc étant perçu dans l'imaginaire collectif comme étant un lieu immuable, il a été utilisé pour protéger ce que les sociétés humaines considéraient de plus important, comme la protection des réserves de grains ou encore comme lieu stratégique, ainsi qu'attestent les multiples constructions souterraines des deux dernières Guerres Mondiales (figure 3).



Figure 3 : Exemple de constructions souterraines : armée française dans les galeries de la Butte de Vauquois durant la guerre 1914-1918, images extraites de source [7]

Une des utilisations des souterrains la plus intéressante d'un point de vue architecturale reste le troglodytisme sacré. De multiples constructions sacrées ont vu le jour sous terre, tels que les églises des Sassi de Matera en Italie (figure 1d) ou encore la chapelle de la mine de sel de Wieliczka en Pologne proche de la ville Cracovie. Au fil de son exploitation la mine a été aménagée par les mineurs qui ont créé des salles entières dont la chapelle de la bienheureuse Kinga de Pologne (figure 4).

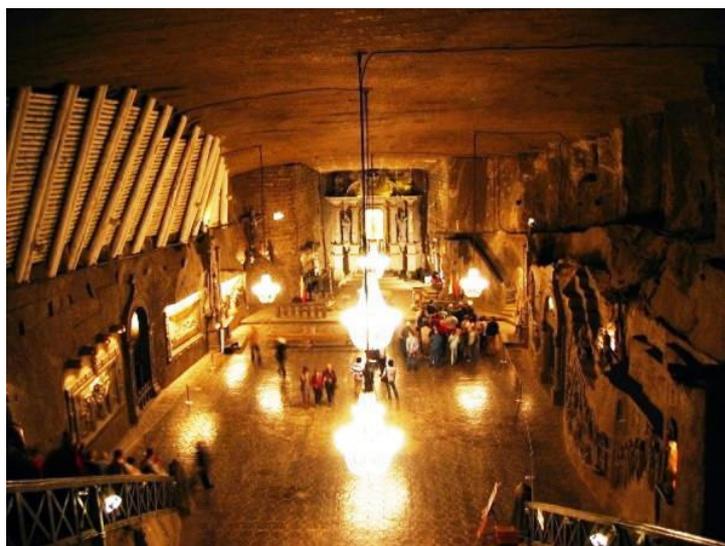


Figure 4 : Chapelle de la bienheureuse Kinga de Pologne à Cracovie dans des mines de sel, source [10]

2 – Géologie des roches

La roche est évidemment essentielle pour les maisons troglodytiques. Elle assure stabilité à la structure et imperméabilité à l'habitat. Néanmoins, elle doit être assez tendre pour être facilement creusée. Pour garantir cela, les maisons troglodytiques sont donc généralement aménagées dans des roches sédimentaires comme le calcaire, la molasse, le grès, le travertin, ou encore le loess. Des roches volcaniques sont aussi utilisées comme le tuf volcanique.

2.1 - Formation des roches sédimentaires

Nous nous appuyons sur un article du site *Planète Terre* de Pierre-André Bourque, professeur au département géologique de l'Université Laval de Québec [11].

La formation des roches sédimentaires est due à une succession de processus (figure 5) :

- Altération superficielle des matériaux produisant ainsi des particules. L'altération peut être par une action mécanique (gel/dégel par exemple), chimique (attaque des silicates par les eaux de pluie par exemple) ou encore biologique (par les lichens qui se nourrissent de minéraux) ;
- Les particules sont ensuite transportées par les cours d'eau, le vent ou la glace jusqu'au milieu de dépôt : bassin de sédimentation. Des couches successives se forment (figure 6) ;
- La diagenèse² transforme le sédiment en roche sédimentaire. La cimentation est un des processus de diagenèse en grande partie responsable de la formation de la roche (figure 7).

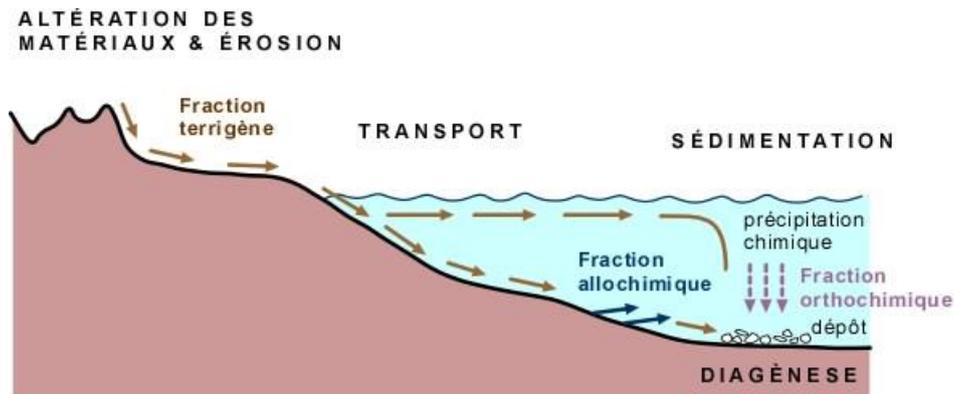


Figure 5 : Schématisation des phases de sédimentation [11]

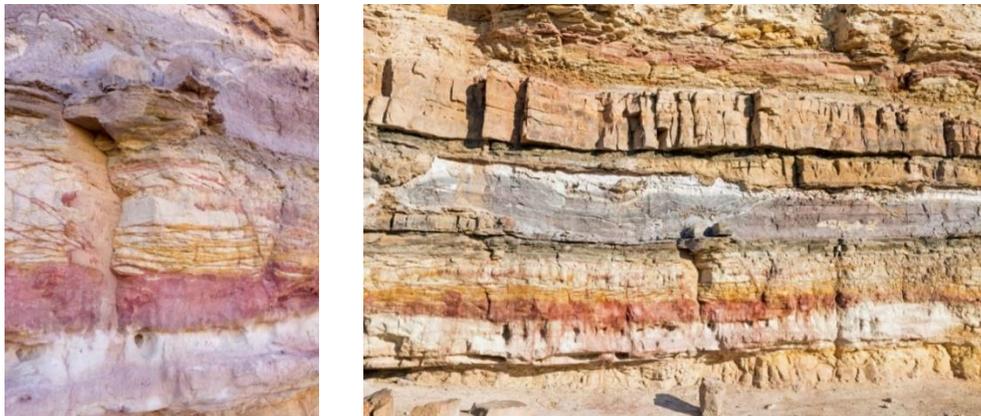


Figure 6 : Strates distinctes dans des roches sédimentaires du désert du Neguev (Israël), sources [12,13]

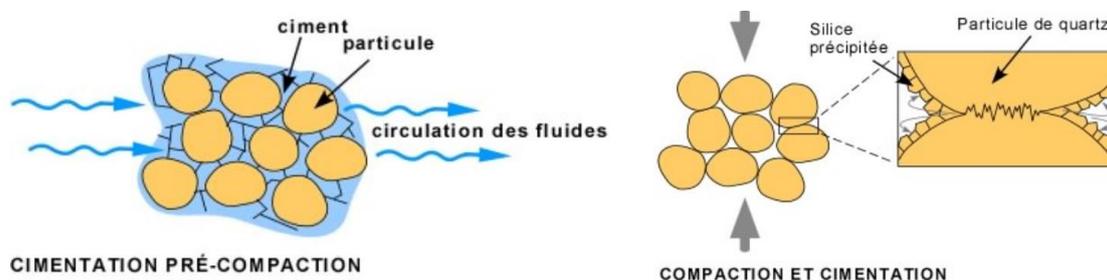


Figure 7 : Cimentation par écoulement d'un fluide chargé en minéraux et cimentation par écoulement et compaction, source [11]

² Ensemble des processus physico-chimiques et biochimiques par lesquels les dépôts de sédiments meubles sont transformés en roches dures.

Les calcaires sont des roches sédimentaires composées majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 , mais aussi de carbonate de magnésium MgCO_3 , elles sont facilement solubles dans l'eau. La craie et le tuffeau (figures 2a et 8) sont des roches sédimentaires calcaires formées dans les mers profondes et calmes pour la première et en eaux peu profondes et agitées pour la seconde [14].

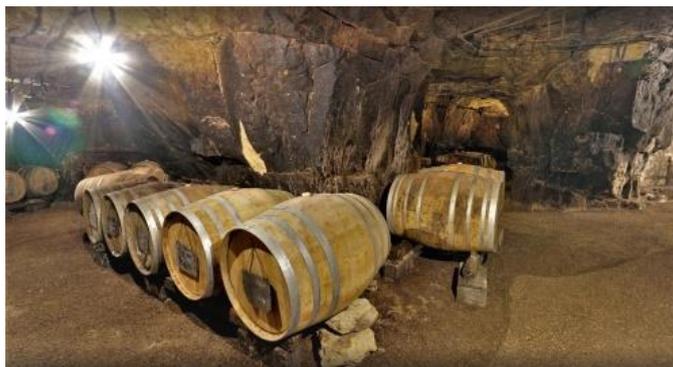


Figure 8 : Cave du Château de Coulaire (Indre-et-Loire), le tuffeau est noirci par les émanations d'alcool, source [15]

La molasse est une roche sédimentaire s'accumulant dans des bassins d'avant-pays, en périphérie des chaînes de montagnes (figure 9). Le grès est une roche sédimentaire détritique, c'est-à-dire au moins composée de 50% de débris ; c'est une agrégation de grains dont la composition dépend des roches préexistantes (figure 10).



Figure 9 : Maison troglodyte à Châteauneuf-sur-Isère (Drôme)

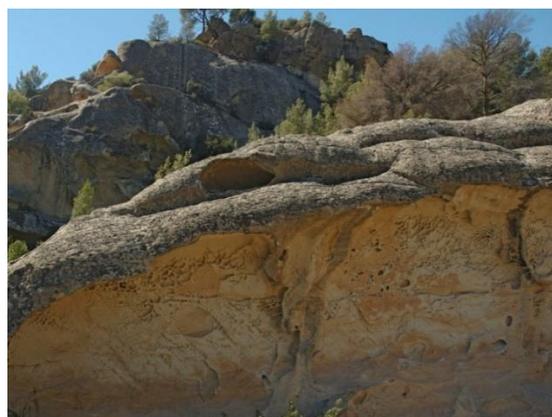


Figure 10 : Le grès de Sainte-Anne à Événos (Var), source [16]

Le travertin (figure 11) est une roche sédimentaire calcaire continentale biogénique, c'est-à-dire construite par des organismes vivants, qui se forme aux émergences de sources ou cours d'eau à petites cascades par précipitation/cristallisation de carbonates à partir d'eaux sursaturées en ions Ca^{2+} et HCO_3^- [17]. Le loess est une roche sédimentaire détritique meuble formée par l'accumulation de limons issus de l'érosion par le vent dans les régions désertiques et périglaciaires (figure 12).



Figure 11 : Travertin sculpté pour la Fontaine de Trevi à Rome (Italie), source [18]

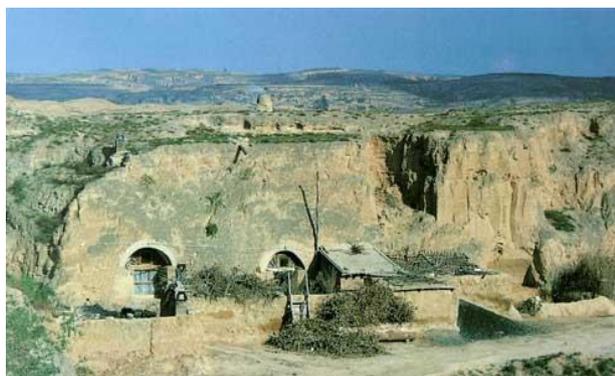


Figure 12 : Habitat troglodyte dans la couverture de loess à Yulin (Chine), source [19]

2.2 - Formation du tuf volcanique

Le tuf volcanique, roche généralement tendre, de couleurs variées, est le résultat de la consolidation sous l'action de l'eau, de particules millimétriques de débris volcaniques. Matériau abondant en Italie et facile d'extraction, il est très fréquent dans la construction de bâtiments de l'Antiquité romaine.

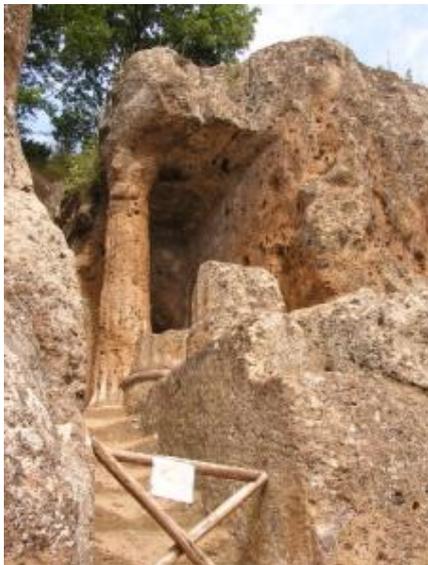


Figure 13 : Nécropole étrusque de Sovana (Italie) taillée à même la colline de tuf (IIIe-IIe siècle av. J.-C.), source [20]



Figure 14 : Fondations du temple de Jupiter Capitolin en tuf « Capellaccio » (région de Rome) (VIIe-Ve siècle av. J.-C.), source [21]

2.3 - Processus de formation des grottes

Les grottes et les cavernes sont lentement formées par la décomposition de la roche principalement sous l'action de l'eau. Les eaux de pluie, en s'infiltrant dans le sol, entraînent des éléments solubles (carbonate de calcium) et des quantités microscopiques de roche insolubles (gravier, limons, argile). Progressivement, ce processus est à l'origine de la création de cavités, en effet certaines parties du sol seront plus sensibles à la dissolution du carbonate de calcium. Cet élément est le constituant principal des coquilles d'animaux marins qui interviennent dans la création par sédimentation des roches que nous avons citées plus haut. Il est donc naturel de retrouver des habitats troglodytiques dans ces roches [22].

Regardons maintenant, le processus de dissolution du carbonate de calcium. Le carbonate de calcium ($CaCO_3$) est très faiblement soluble dans l'eau pur, de l'ordre de 15 à 20 mg.L^{-1} . Néanmoins, dans l'eau chargée en dioxyde de carbone le carbonate de calcium devient beaucoup plus soluble [23].

Deux réactions entrent donc en jeu :



L'équation (1) représente la dissolution du CO_2 dans l'eau en dioxyde de carbone. L'équation (2) représente la dissolution par le dioxyde de carbone du carbonate de calcium. Plus les pluies seront acides plus la formation de grottes sera importante.

3 – Particularités liées à l'habitat troglodytique

3.1 - Gestion de l'humidité

L'habitat troglodytique peut être construit dans des roches très poreuses (par exemple le tuffeau a une porosité de 40 à 50%, données *Cavités 37*³). Couplé à une bonne capacité d'absorption de l'eau, ces roches échangent constamment avec le milieu externe et alterne entre absorption et désorption [24].

3.1.1 - Les effets de l'eau

En premier lieu, l'eau peut surcharger la roche ce qui entraîne des contraintes mécaniques plus importantes dans les piliers ou les arches de soutènement. Par exemple, *Cavités 37* avance que la surcharge pondérale peut atteindre 30% dans le tuffeau lorsque celui-ci a une teneur en eau de 100%.

L'eau peut également avoir des effets néfastes sur la propriété mécanique des roches, *Cavités 37* met en avant une diminution de la résistance en compression de 40%. Lorsque la roche se gorge d'eau des contraintes internes peuvent se créer liées notamment à la pression capillaire et au gonflement de la fraction argileuse ou encore à l'effet du gel.

Enfin, l'eau en créant des cristaux ou en dissolvant la calcite peut dégrader la roche.

3.1.2 - Les origines de l'humidité

Trois phénomènes peuvent être à l'origine d'une forte concentration en eau dans un habitat troglodytique : le ruissellement de la surface peut mener à l'infiltration de l'eau dans la grotte, cet effet peut être amplifié par des constructions en haut du coteau qui créent de la rétention d'eau, les eaux peuvent aussi remonter par capillarité des nappes phréatiques et enfin les roches peuvent se gorger d'eau à cause de l'humidité relative.

3.1.3 - Réduire l'humidité dans l'habitat troglodytique

La particularité de chaque habitat troglodyte ne peut ici être évoquée de façon exhaustive, aussi ce point n'est abordé que de façon générale. Comme nous venons de le voir, l'humidité peut avoir plusieurs origines, la réduire passe en premier lieu par l'analyse de son origine.

Ainsi par exemple, pour éviter ou réduire les infiltrations, il convient de maîtriser la végétation à l'aplomb du coteau en privilégiant les végétaux à racines traçantes (à développement horizontal), d'éviter les écrans imperméables, de drainer les maçonneries ou d'évacuer un maximum les eaux de pluie par des tranchées.

Pour éviter l'humidité provenant des remontées capillaires, il faut éviter d'avoir un écran imperméable pour le sol de l'habitat. Ainsi en laissant une ouverture le long des murs de 10 à 15 cm les remontées dans les parois sont évitées (figure 15). L'espace ainsi laissé peut rester libre, être drainé ou encore bouché avec de la chaux aérienne. Un sol peut être réalisé en prévoyant un drainage, voir même la mise en place d'un hérissonnage (couche matériaux drainants sous la dalle figure 16), un chauffage basse température et l'utilisation des matériaux adaptés comme la chaux

³ Cavités 37 est un service public spécialisé dans le recensement et la préservation des cavités souterraines et des falaises rocheuses, nombreuses sur le territoire du Val de Loire (<http://cavites37.com/#>).

aérienne, qui est imperméable à l'eau mais autorise les échanges gazeux et permet de réguler l'humidité (voir section 3.3).



Figure 15 : Exemple d'espace au sol aux pieds des murs, source [24]

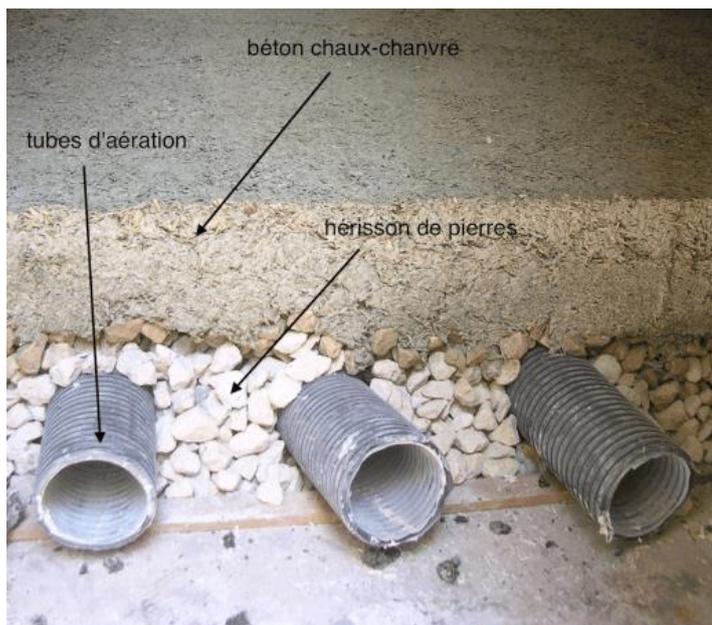


Figure 16 : Exemple de réalisation d'un hérissonnage, source [25]

Pour éviter une humidité relative trop importante de l'air en provenance des roches mais également des pièces d'eau de l'habitat (cuisine, salle de bain, ...), la ventilation doit être réelle. Elle peut être naturelle ou mécanique mais mesurée puisque l'air trop sec intérieur favorise l'arrivée de l'humidité de la roche. Le chauffage peut être aussi bénéfique pour réduire ce problème. Si, la ventilation ne suffit pas un déshumidificateur peut être utilisé pour réguler l'humidité relative entre 50 et 60%, qui est un intervalle où le confort est assuré.

3.2 - Chauffage et renouvellement de l'air

Le taux d'humidité de l'air d'un habitat troglodyte est donc un point majeur à prendre en compte. Le gradient de température de l'air à l'intérieur d'un habitat troglodytique est assez stable le long de l'année, il y a peu de variation entre l'été et l'hiver (voir aussi la section 4). Cependant, ces températures assez fraîches sont peu compatibles avec un habitat actuel. La question d'un chauffage est donc nécessaire, question également fortement liée à l'humidité relative.

3.2.1 - Lien entre humidité relative et température de l'air

L'humidité relative est le rapport de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la quantité de vapeur d'eau maximale possible. La quantité de vapeur d'eau maximale possible, elle varie avec la température (voir les données Météo France tableau 1). Ainsi, pour être en situation de confort l'ambiance doit posséder une humidité relative comprise entre 50 et 60%. La température de résultante sèche⁴ devrait être comprise entre 19 et 20°C.

Quantité maximale de vapeur d'eau contenue dans une particule d'air en fonction de la température								
Température de l'air [°C]	-10	-5	0	5	10	15	20	30
Quantité maximale de vapeur d'eau [g/m ³]	2	3	4,5	6,5	9,5	13	17	30

Tableau 1 : Quantités maximales admissibles dans l'air en fonction de la température

⁴ La température de résultante sèche est la moyenne entre la température des parois et la température de l'air ambiant.

3.2.2 - Technique possible de chauffage

La température de l'air est donc liée à l'humidité relative. Idéalement, un chauffage devrait assurer une température et une humidité relative adéquates. Comme nous l'avons vu en section 3.1, la ventilation est un paramètre entrant dans la maîtrise de l'humidité, énergétiquement il faudrait favoriser la ventilation naturelle plutôt que mécanique. Cavités 37 propose deux modèles schématisés sur les figures 17 et 18.

La figure 17 expose un mode de chauffage ponctuel, classique peu optimisé dans le sens où la régulation de la température et de l'humidité relative de toutes les pièces n'est pas prise en compte. En comparaison, la figure 18 propose un mode de chauffage adapté à l'habitat troglodytique. L'air entrant par une aération en fond de cave, est chauffé par le plancher chauffant. Ce réchauffement de l'air diminue l'humidité relative qui atteint ainsi des pourcentages adéquats. Ainsi, ce système contrôle aussi bien la température que le taux d'humidité, sa réalisation est néanmoins plus compliquée.

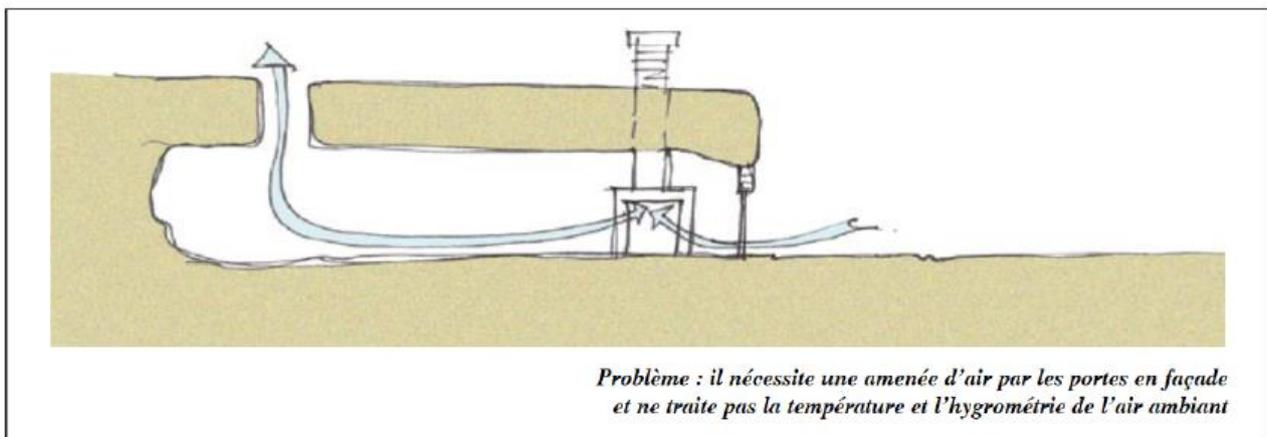


Figure 17 : Schéma présentant un chauffage classique, source [24]

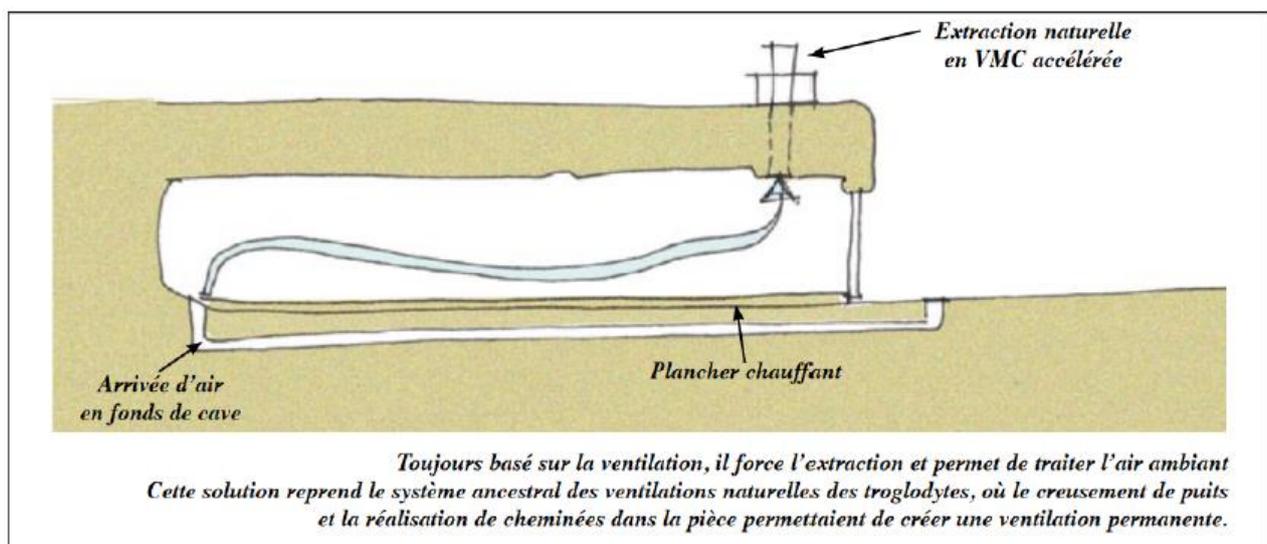


Figure 18 : Schéma présentant un chauffage optimisé, source [24]

3.3 - Instabilité de la grotte

Certains matériaux doivent être privilégiés et d'autres évités. Par exemple, les chaux hydraulique et aérienne doivent être privilégiées pour les enduits des murs, le béton doit être utilisé pour la création de renforcement.

3.3.1 - La chaux hydraulique et aérienne

De par sa constitution, une fois posée la chaux aérienne garantit une imperméabilité à l'eau mais garantit les échanges gazeux. Il est donc primordial d'utiliser ce matériau comme enduit car à la différence du béton, il ne créera pas de rétention d'eau entre le mur et l'enduit ce qui peut entraîner des fissurations et donc une fragilisation de la structure. Associé à du sable, le mortier de chaux possède de bonnes caractéristiques mécaniques et est donc à privilégier.

3.3.2 - Moyen pouvant assurer la stabilité de la grotte

L'utilisation de tirant peut être un moyen d'assurer la stabilité d'une grotte. En effet, ce mécanisme simple (figure 19) est constitué d'une barre en acier scellée dans du béton. Une fois le scellement sec, l'armature est précontrainte (tirant actif) ou juste mise en butée contre le mur (tirant passif), ceci assure la stabilité du mur. Pour fixer un tel type d'ancrage il faut dimensionner les tirants ce qui est fait de manière empirique avec un test de traction [26].

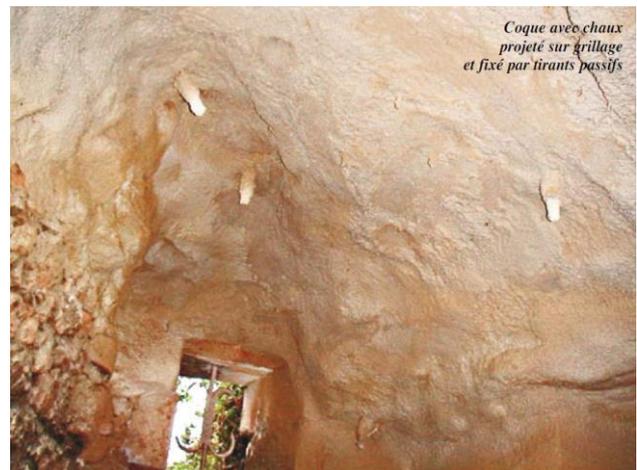
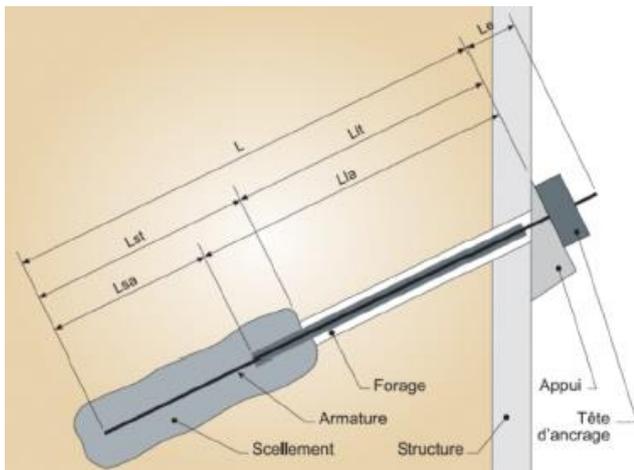


Figure 19 : Schéma d'un tirant, source [27]

Figure 20 : Exemple d'utilisation de tirants, source [24]

4 – Avantage thermique

Cette partie propose de présenter, à partir d'un exemple, l'avantage thermique que peut avoir un habitat troglodyte. Nous nous appuyons sur un article de *ECSDEV Compilation* [28] qui référence une campagne d'essais dans un habitat troglodyte. Il faut néanmoins garder à l'esprit qu'une étude réalisée sur un de ces habitats singuliers ne peut en aucun cas être généralisée à toutes les habitations troglodytes.

Les caractéristiques de l'habitat et de son environnement sont décrites afin de présenter quelques points de l'étude réalisées ainsi que les résultats qui en découlent.

4.1 - Caractéristiques climatiques

L'habitat troglodyte étudié se situe à *Belerda de Guadix* dans la région de Granada en Andalousie au sud de l'Espagne. Ce village se situe à 1 200 mètres au-dessus du niveau de la mer. Il y règne un climat méditerranéen, c'est-à-dire qu'il y fait froid et humide l'hiver, et chaud et sec l'été. La particularité de ce climat est aussi d'avoir des gradients de température très importants entre la journée et la nuit. Tableau 2 sont répertoriées quelques données climatiques récoltées entre 1981 et 2000 par la *National Meteorology Agency*.

Mois	Températures [° C]			Précipitations mensuelles	Humidité relative
	Moyenne	Maximale	Minimale		
Janvier	6,5	13,0	0,0	42	72
Août	24,8	34,2	15,5	4	42
Moyenne annuelle	15,4	23,0	7,8	36,5	58

Tableau 2 : Conditions météorologiques dans la région de l'exemple Belerda de Guadix, source [29]

4.2 - Caractéristiques géologiques

Le sol de cet habitat troglodyte est celui que l'on retrouve dans les régions arides ou semi-arides : la végétation est clairsemée, les roches sédimentaires tendres, les sols riches en argile sont érodés par le vent et l'eau (figure 21). Suffisamment mou pour être creusé et suffisamment compact pour garantir solidité et imperméabilité, il est le résultat de fortes pluies irrégulières. Des données (tableau 3) issues de la compagnie *Ingenería Geológica Ronda 71 S.L* [30] indique que le sol est constitué majoritairement d'argile (64%) et de sable (35%). Ces données sont essentielles pour comprendre l'environnement de l'habitation.

Classification	CL-ML (argile-Limon)
Argile	64,3 %
Sable	35,6 %
Gravier	0,1 %
Limite liquide	30,4 %
Résistance en compression	0,392 MPa
Angle de frottement interne	30°
Module de déformation	9,8 MPa

Tableau 3 : Caractéristiques géologiques de l'exemple Belerda de Guadix, source [29]



Figure 21 : Le sol de Belerda de Guadix, images extraites de source [30]

4.3 - Caractéristiques de l'habitat troglodyte

Le plan de l'habitat est représenté figure 22. C'est un habitat plus que centenaire, inhabité depuis 1960 et réhabilité en 2004 dans un but de modernisation et d'amélioration de la sécurité. Il est complètement enterré, seule une face est protégée par un mur (pièce 10 figure 22), deux pièces ont été ajoutées en extérieur (pièces 8 et 9 figure 22), une pièce supplémentaire a été creusée (pièce 7 figure 22).

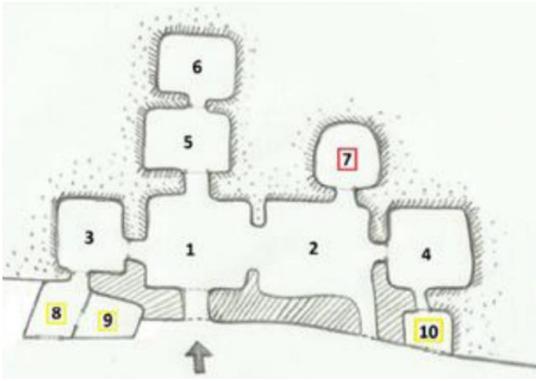


Figure 22 : Schéma de l'habitat troglodyte, source [28]

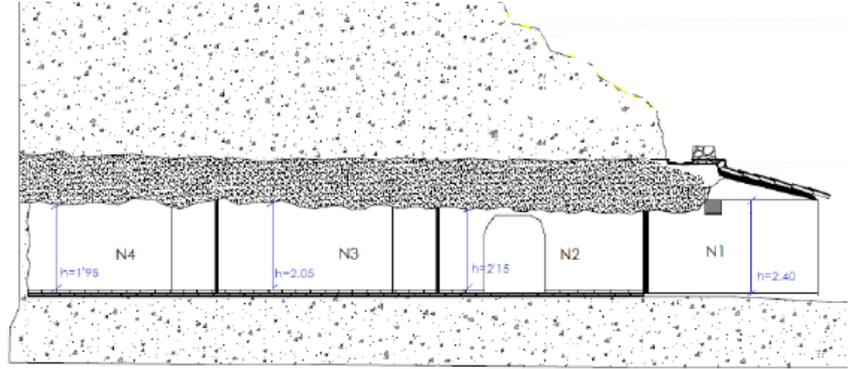


Figure 23 : Plan de coupe de l'habitat troglodyte, N1 à N4 sont les quatre zones thermiques, source [28]

1 : Entrée ; 2 : salle à manger ; 3 : Cuisine ; 5,6 : Chambres ; 7 : Chambre nouvellement creusée ; 8 : Débarras ajouté ; 9 : Salle de bain ajoutée ; 10 : Salle de bain.

Sur le plan de coupe figure 23, il est possible de mesurer la profondeur de cet habitat. L'inertie thermique du sol au-dessus de la maison influence directement la capacité thermique de la maison. Nous pouvons d'ores-et-déjà affirmer que les pièces les plus éloignées de la façade seront les moins sujettes aux changements de température et auront donc un gradient de température plus faible que les pièces immédiatement derrière la façade. Quatre zones thermiques aux propriétés différentes, numérotés N1 à N4 figure 23, ont été déterminées entraînant la disposition des points de mesures sur ces quatre zones détaillées tableau 4.

Niveau	Caractéristiques	Pièces	Profondeur depuis la façade [m]
N1	Niveau de surface, le mur est en contact avec l'extérieur. Un mur de béton de 20 cm a été ajouté, ainsi qu'une dalle recouverte de carreaux de céramique.	8,9,10	2,45
N2	Niveau partiellement en contact avec l'extérieur soit par une fenêtre soit par une autre pièce	1,2,3,4	5,72
N3	Niveau sans contact direct avec l'extérieur	5,7	9,29
N4	Niveau sans contact direct avec l'extérieur	6	12,39

Tableau 4 : Caractéristiques des quatre zones thermiques, source [28]

4.4 - Résultat de l'étude

Les mesures ont été réalisées pendant une année. Les valeurs qui ont été retenues sont les journées la plus froide de l'hiver et la plus chaude de l'été. Pour ces journées, pour chaque zone thermique les températures de surface et de l'air ainsi que l'humidité relative ont été relevées.

Durant l'été la température des pièces varie entre 24,95°C pour la pièce la plus proche de l'extérieur (N1) et 20,55°C pour la pièce la plus profonde (N4) avec une température extérieure mesurée de 36°C, ce qui reflète la performance de cet habitat pour le refroidissement (courbe rouge figure 24). Durant l'hiver la température varie entre 15,00°C (N1) et 17,25°C (N4) avec une température extérieure mesurée de 3°C (courbe bleue figure 24). Les pièces les plus éloignées de l'extérieur, les plus enterrées, restent plus fraîches l'été et plus chaudes l'hiver que les pièces les plus proches de l'extérieur, la variation maximale de température atteinte est inférieure à 7°C ce qui démontre la capacité thermique naturelle.

L'humidité relative est maintenue entre 50% et 60% à l'intérieur de l'habitat (figure 24) alors qu'extérieurement l'humidité relative est de 40% en été et 72% l'hiver. Ce type d'habitat présente donc une valeur acceptable toute l'année.

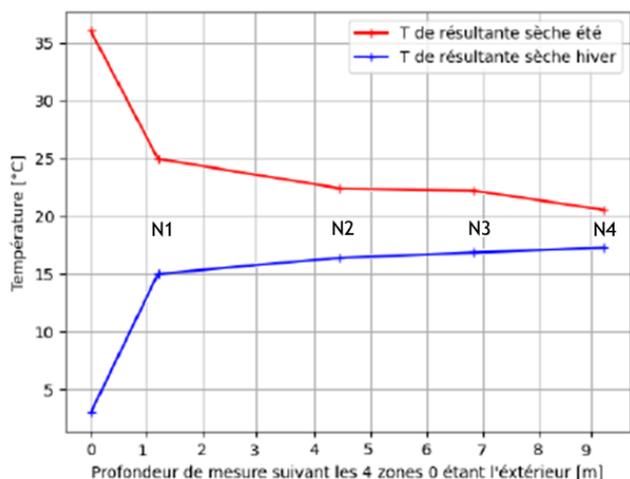


Figure 24 : Températures relevées lors des journées la plus froide en hiver (courbe bleue) et la plus chaude en été (courbe rouge)

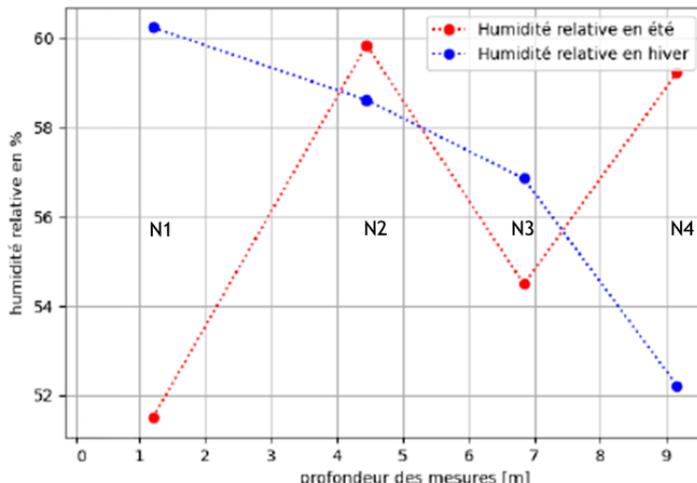
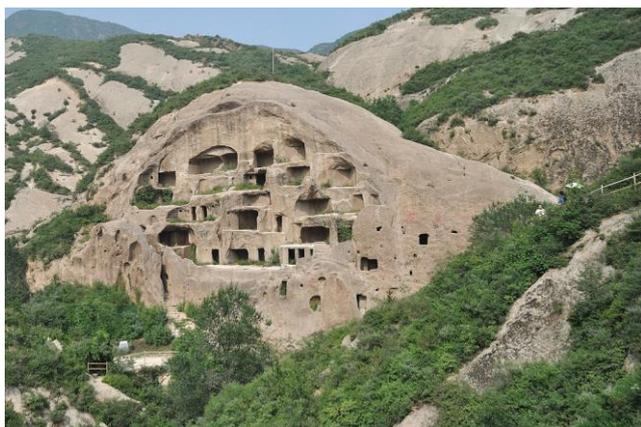


Figure 25 : Humidités relatives relevées lors des journées la plus froide en hiver (courbe bleue) et la plus chaude en été (courbe rouge)

5 – Tour du monde et du temps de quelques habitats troglodytes



Habitat troglodyte de Guyaju (Chine), occupés durant la dynastie Tang (618-907) par le peuple Xiyi, source Siyuwj, CC BY-SA 4.0, [Wikicommons](#)



Habitat troglodyte de Uçisar (Région de Cappadoce, Turquie) développé du IVe au XIIIe siècle, source Claude Valette, CC BY-SA 4.0, [Wikicommons](#)



Troglodytes d'Undavalli (Inde), temple bouddhiste dans une grotte creusée aux IVe et Ve siècles, bas-reliefs sculptés du VIe et VIIe siècles, source Ramireddy.y, CC BY-SA 3.0, [Wikicommons](#)



Grottes de Jonas dans le parc des volcans d'Auvergne (Puy-de Dôme) site occupé par les celtes et jusqu'au XIIIe siècle, fresques du IXe siècle dans la chapelle, source BiacheB, CC BY-SA 4.0, [Wikicommons](#)



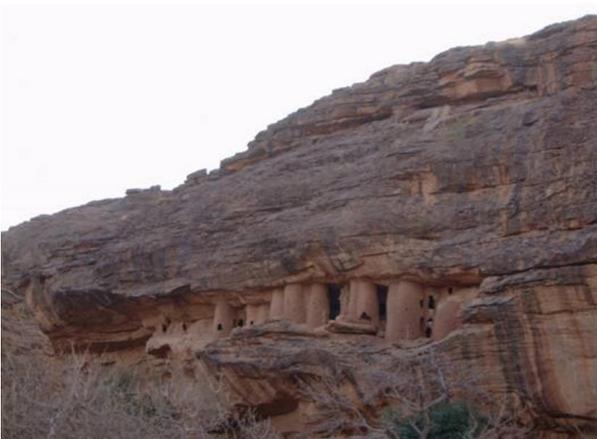
Château de Tayac aux Eyzies-de-Tayac-Sireuil (Dordogne) bâti au XIe et XIIe siècles, source 120 / V. Mourre, CC BY-SA 3.0, [Wikicommons](#)



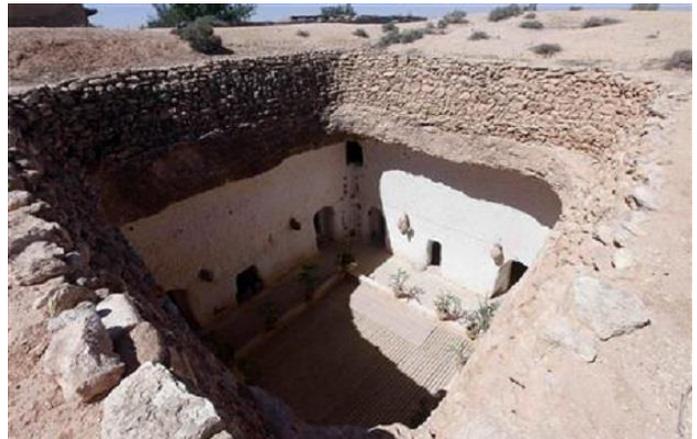
Ville troglodyte de Vardzia (Géorgie) fondée à la fin du XIIe siècle, source I. Wojciech Bijok, CC BY 3.0, [Wikicommons](#)



Cliff Palace dans le Parc national de Mesa Verde (États-Unis), bâtie dans une alcôve de grès construite de 1190 à 1260 et habitée jusqu'en 1300, source CC BY-SA 3.0, [Wikicommons](#)



Village troglodyte des Tellems abandonné au XIVe siècle, construit dans la falaise de Bandiagara (Mali), source Nerijp, CC BY-SA 3.0, [Wikicommons](#)



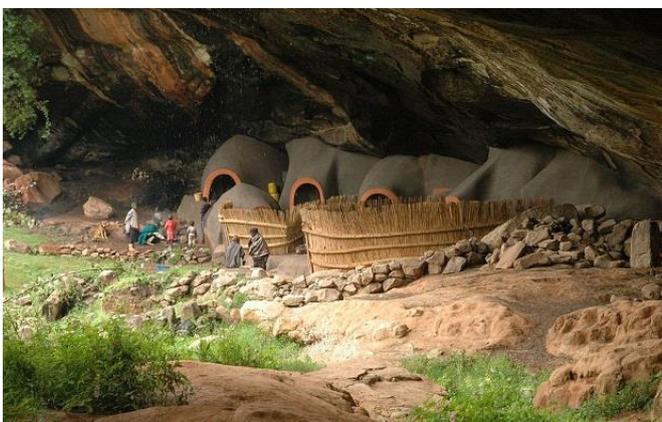
Habitat troglodyte à Gharyan (Libye) construite en 1666, source [Douce Cahute](#)



Habitat troglodyte dans le village de Brhlovce (Slovaquie) construit aux XVIe et XVIIe siècles, source [Douce Cahute](#)



Habitat troglodyte à Kinver Edge (Angleterre) habité depuis le Moyen-Age jusqu'aux années 1960, source Mjr74, Public Domain, [Wikicommons](#)



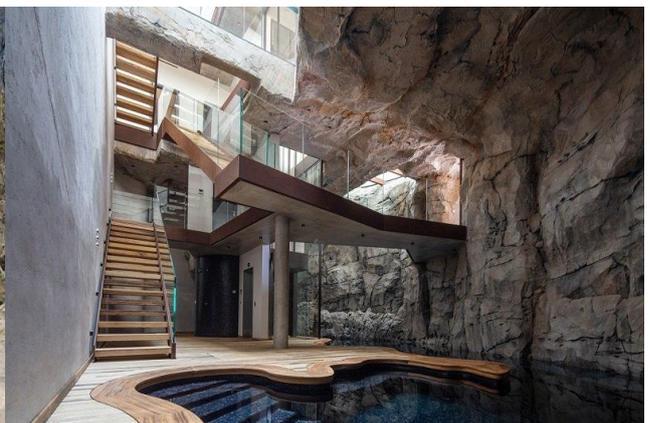
Habitat troglodyte au cœur des grottes de Kome (Lesotho) depuis le début du XIXe siècle et encore habité de nos jours, source [Douce Cahute](#)



Habitats troglodytes ('Dugouts') à Coober Pedy (Australie) depuis le début du XXe siècle, source [Douce Cahute](#)



Habitat troglodyte contemporain construite dans une grotte d'extraction de grès à Festus (Missouri, États-Unis), source [Douce Cahute](#)



Habitat troglodyte contemporain à Monaco (architecte Jean-Pierre Lott), source [Douce Cahute](#)

6 – Conclusion

L'habitat troglodyte se retrouve à l'échelle mondiale et dans de nombreuses régions climatiques, leur habitabilité est éprouvée. Ils dépendent des reliefs, pentes des collines ou montagnes ou des cavernes présentes naturellement, qui servent de structures et d'enveloppe à l'habitat et de la facilité de construction (type de roches).

L'inertie thermique du sol naturel est l'une des caractéristiques influençant la performance thermique de l'habitat. L'habitat troglodyte répond aux principes de la bioclimatique avec une architecture qui s'adapte aux conditions extérieures environnementales pour réduire consommation d'énergie, entre autres avantages.

À noter qu'il est préférable pour atteindre une performance hygrothermique intéressante de privilégier une orientation de la façade principale de façon à obtenir un maximum de rayonnement solaire et d'éclairage naturel. Les fenêtres doivent être prévues d'une taille suffisante pour obtenir une ventilation correcte et pour éviter une forte humidité, et également obtenir une circulation d'air acceptable jusqu'au niveau le plus profond. Les pièces les plus proches de la façade bénéficient de meilleures conditions d'éclairage, de ventilation et de rayonnement solaire, ce sont d'ailleurs souvent les plus utilisées. L'excès de soleil l'été peut être géré par des arbres à feuilles caduques afin de capter le rayonnement solaire en hiver.

D'autres avantages peuvent être avancés comme l'utilisation de ressources naturelles à faible impact environnemental :

- Le sol creusé peut être réemployé (création de l'accès à l'habitat par exemple) ce qui minimise ainsi déchets de construction ;
- Le coût environnemental, mesurable lors de l'analyse de leur cycle de vie (voir sections 2 et 3 de la ressource « L'Eco-production, produire sans détruire » [31]), est minimal : pas de coût environnemental de production, ni de transport vers le site, ni de recyclage !
- De nombreux matériaux peuvent être économisés comme les matériaux de construction de la structure, de l'enveloppe ou encore d'isolation par exemple ;
- Le toit naturel, généralement végétalisé, absorbe les eaux de pluie, évitant ainsi les ruissellements et les phénomènes d'inondations, ainsi que l'érosion des sols. C'est l'exemple naturel de solutions constructives de toit végétalisé (voir aussi la section 2 de la ressource « Des plantes dans le bâtiment » [32]) ;
- L'intégration dans le paysage peut également être considérée comme un avantage, ainsi que la sureté de cet habitat lors de tempêtes ou tornades ou encore la protection contre les incendies.

Références :

[1]: Le troglodyte, cet inconnu, Jacek Rewerski, Le courrier de l'UNESCO - pages 10 à 14, 1995, <http://fr.1001mags.com/parution/le-courrier-de-l-unesco/numero-1995-11-decembre/page-10-11-texte-integral>

[2]: Patrimoine souterrain creusé, H.A.D.E.S, consulté en février 2022, http://hades.troglodyte.free.fr/patrimoine_souterrain.htm

[3]: Berthold Werner – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8625976>

[4]: Me (w>User:pfctdayelise) – Image taken by me using Casio QV-R41, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=427378>

[5]: Axcordion sur Wikipédia anglais, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31854822>

[6]: Actaris41 – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29357189>

[7]: Les habitations troglodytiques, Wiki-Anjou, consulté en février 2022, https://www.wiki-anjou.fr/index.php/Habitations_troglodytiques

[8]: GerardM at nl.wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3256845>

[9]: 1914-1918 : les guerres souterraines, europeenimages, consulté en février 2022, https://www.europeenimages.net/video-1914_1918_les_guerres_souterraines-id-3099.html

- [10]: Cédric Puisney, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59218>
- [11]: Du minéral à la roche, Pierre-André Bourque, Faculté de Laval, département de géologie et de génie géologique, 2010, <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/r.sedim.html>
- [12]: Andrew Shiva / Wikipedia, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52229043>
- [13]: Andrew Shiva / Wikipedia, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52229041>
- [14]: Tuffeau, wikipédia, consulté en février 2022, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tuffeau>
- [15]: Jeannot19889 – Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=97927435>
- [16]: Original uploader was Philippe COSENTINO at fr.wikipedia – Transferred from fr.wikipedia; transferred to Commons by User:Bloody-libu using CommonsHelper., CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18139725>
- [17]: Travertin, Wikipédia, consulté en février 2022, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Travertin>
- [18]: Lalupa – Travail personnel, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=821761>
- [19]: Andreas Gruschke – Andreas Gruschke (selbst fotografiert), CC BY-SA 2.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7686282>
- [20]: C.m.b, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6631510>
- [21]: Ursus – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32700223>
- [22]: Formation des dépôts archéologiques en grotte, D. Sordoillet, 1997, <https://books.openedition.org/alpara/1475?lang=fr%20>
- [23]: Carbonate de calcium, Wikipedia, consulté en février 2022, https://fr.wikipedia.org/wiki/Carbonate_de_calcium
- [24]: L'aménagement de l'habitat troglodytique, A. Bruneteaux, P. Arnault, B. Duquoc et C. Léotot, Cavités 37, 2008, http://cavites37.com/wp-content/uploads/2014/03/CS37-lettre_n-9.pdf
- [25]: Comment faire une dalle en béton sur hérisson ? béton expert, consulté en février 2022, <https://www.betonexpert.fr/blog/dalle-beton-sur-herisson/>
- [26]: Tirant d'ancrage acier scellé au coulis de ciment, A. Philippe, octobre 2013, http://cavites37.com/wp-content/uploads/2014/03/tirant_passif.pdf
- [27]: Qu'est-ce qu'un tirant d'ancrage ? Tout pour le forage, consulté en février 2022, <https://www.toutpourleforage.com/quest-ce-quun-tirant-dancrage/>
- [28]: Analysis of bioclimatic measures on the energy performance of dwellings from a case study of troglodyte architecture, 5th International Conference on Sustainable Development, 2017, <http://ecsdev.org/images/conference/5thICSD2017/Book-of-Proceeding-5ICSD-2017.pdf#page=62>
- [29]: Ingeniería Geológica Ronda 71 S.L, <https://www.ingenieriageologicaderonda71.es/es/>
- [30]: Belerda en su splendor por gadix, consulté en février 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=wcdoMCq44w4>
- [31]: L'éco-production, produire sans détruire, B. Anglade, H. Horsin Molinaro, mai 2020, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/ecoproduction-produire-sans-detruire
- [32]: Des plantes dans le Bâtiment, M. Alecian, S. Capdevielle, H. Horsin Molinaro, mars 2020, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/des-plantes-dans-le-batiment