

Risques de ruines de catiches, anthropisation des sols, essai de description de la suffusion exercée par l'énergie hydromécanique et hydrochimique des eaux d'infiltration menant à la dégradation des fantômes de roche

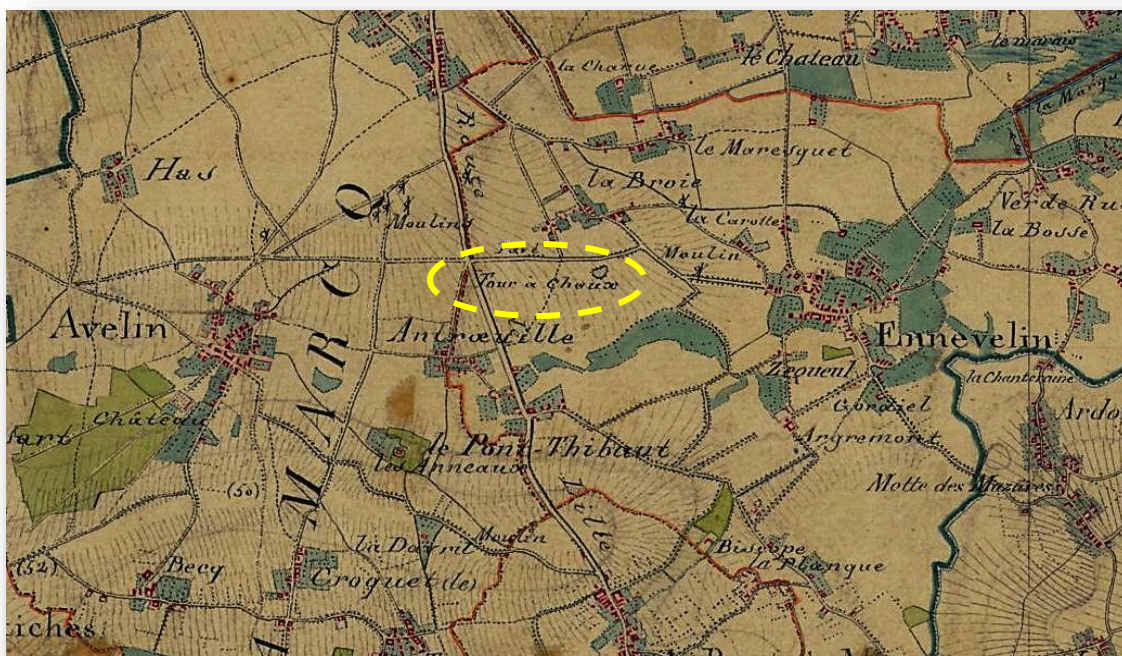
Synthèse d'investigations souterraines et photographies : Luc FRANCOIS, Thomas FRACZEK, Bastien LHERBIER, Franck MACIEJAK.



Fédération Française de
spéléologie

Version 2026

L'exemple de ruine de catiche (photo page 2) appartenant à un réseau de carrières souterraines d'extraction de craie destinée probablement à alimenter l'ancien four à chaux situé entre Avelin et Ennevelin (Cf. extrait de carte ancienne, ci-dessous). La craie extraite était acheminée jusqu'au four à chaux pour obtenir de la chaux vive par calcination. Par la suite, elle était transformée en chaux éteinte par hydratation pour produire du badigeon, des mortiers, modifier le pH du sol ...



Extrait de carte ancienne indiquant l'existence d'un four à chaux

Commentaire de la photo sur la ruine de catiche

La zone concernée appartient à la structure géologique crayeuse des collines du Mélantois qui sont recouvertes par les traces de la transgression de l'Eocène. Selon les sondages du BRGM, c'est une couverture argilo sablonneuse qui constitue l'essentiel de cette transgression.

Commentaire des phénomènes observables sur la photo de la ruine de catiche (Photo. page 2) :

1- Les sols argileux peuvent contenir de grandes quantités d'eau, du fait de leur porosité élevée. Cependant, l'eau ne peut y circuler librement du fait de la faible conductibilité hydraulique des argiles ; de l'ordre du milliardième de mètre par seconde. Par conséquent, les sols argileux ne peuvent donc pas abriter d'aquifères. Mais sous certaines conditions d'anthropisation, ils peuvent se saturer en eau et il est possible que localement se produise un phénomène de suffusion du sol lorsqu'il devient non cohésif. Alors, ce sol qui recouvre le substrat crayeux fissuré, peut produire une dislocation d'un fantôme de roche en contact avec un encorbellement de catiche.



Ruine de catiche entre Seclin et Avelin

2- Flanc de fissure brunâtre qui est la trace de la dégradation du fantôme de roche dans un couloir d'éponte karstique. Dans notre cas, au contact d'une catiche et sans forcément de signes, visible en surface. Initialement, les phénomènes de fantôme de roche se développent dans une anfractuosités de la craie sous la forme d'un couloir de décalcification et se remplissent d'altérite constituée de résidus de carbonates, de silice et d'argiles sous l'action des infiltrations d'eau au contact du sol. Puis, si les infiltrations s'accroissent, les énergies hydrodynamique et hydrochimique disloquent en blocs la roche fantomisée.

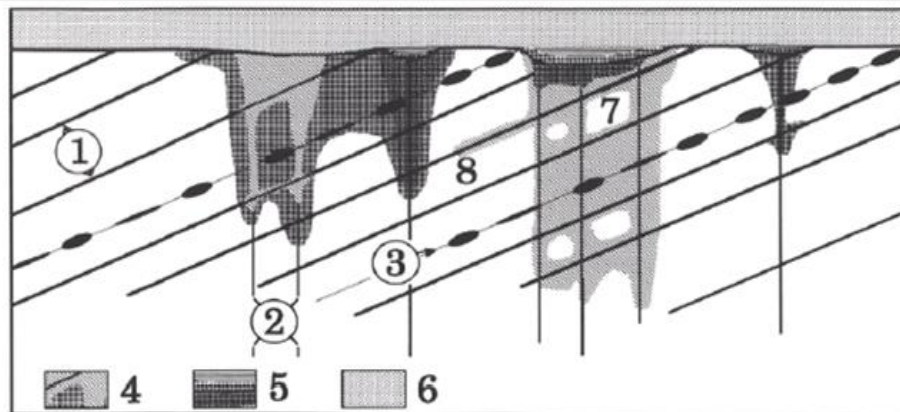
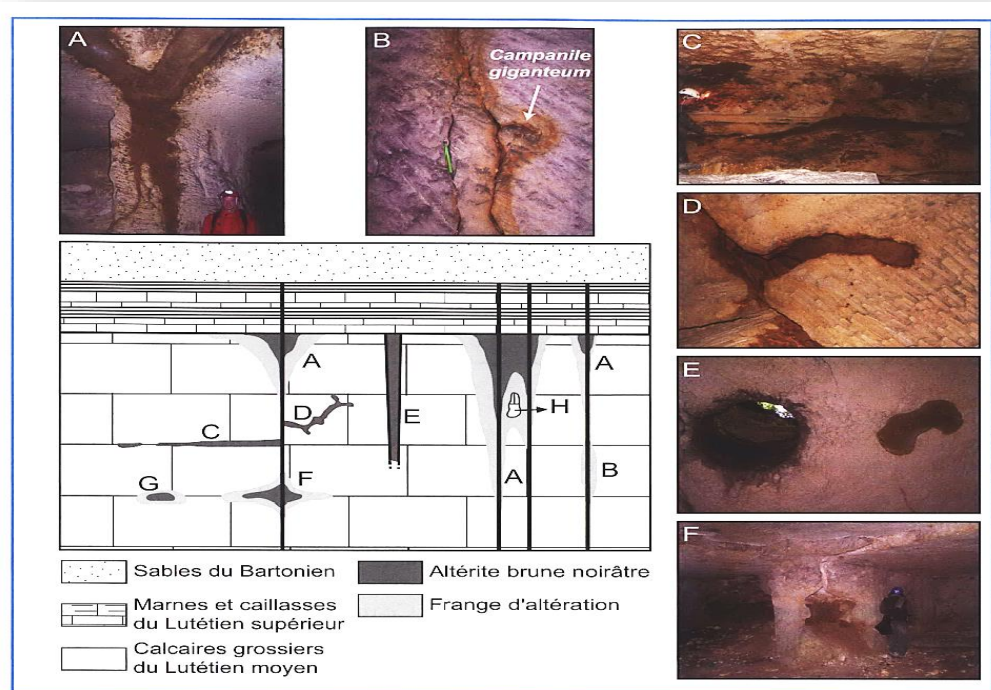
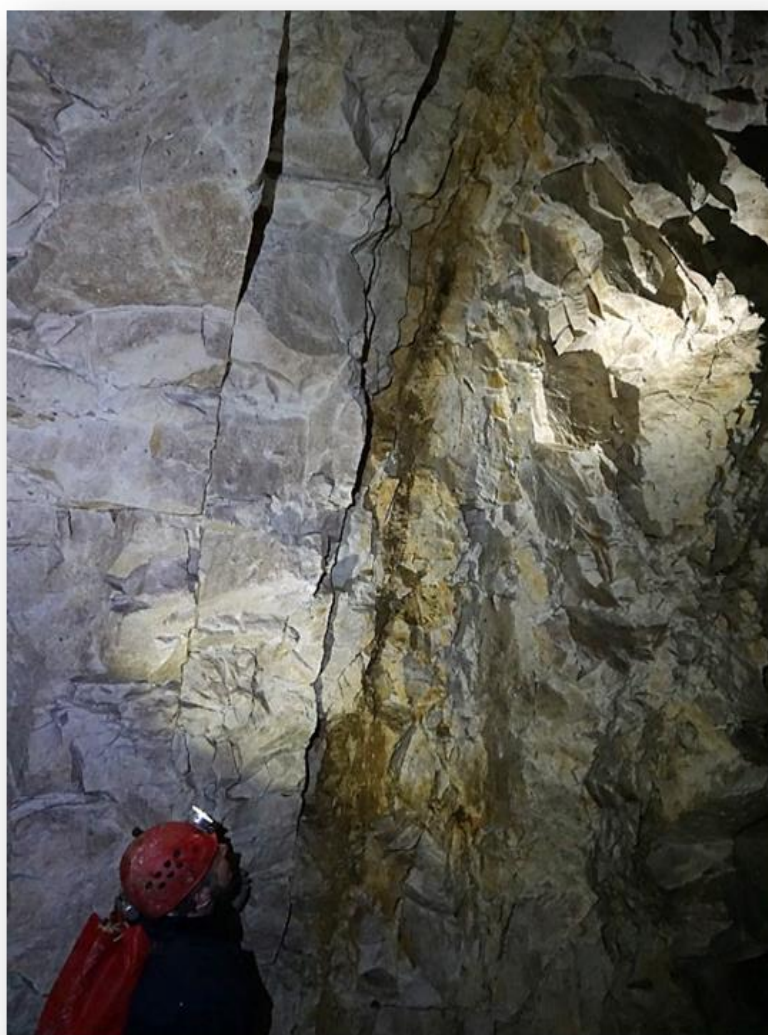
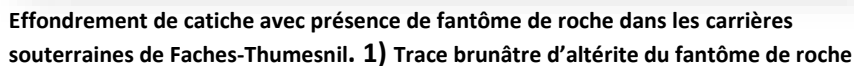


Figure 3 : Coupe d'un "fantôme de roche". Le fantôme de roche est un volume important de roche altérée dans la masse essentiellement le long des diaclasses verticales (2) mais aussi suivant les joints de stratification (1). La structure reste visible, comme par exemple les lits de cherts (3) mais la roche est dissoute dans la masse suivant des gradients qui dépendent notamment de la lithologie (4). Le carbonate de calcium peut être totalement ou partiellement dissous, laissant sur place les parties moins solubles avec une énorme porosité qui peut atteindre plus de 60 %. Dans les parties altérées, des blocs restent intacts (7), "flottant" dans la masse poreuse, ou restant sous forme de pitons enracinés. Les fantômes peuvent être scellés par des couvertures discordantes (5) piégées dans les dépressions creusées lors de la transgression. Une couverture transgressive postérieure (6) fossilise ici cet ensemble fantomisé. Remarquons que des racines fantomisées (8) peuvent se développer latéralement. Cette coupe schématique est inspirée des paléokarsts crétacés du Tournaisien dans le Hainaut (Belgique, Vergari & Quinif, 1997).



Les formes de fantômisation rencontrées en carrières souterraines des plateaux calcaires entre Soissons et Reims. A) racine d'altération, B) frange d'altération sur fissure, C) joint altéré ou « couchis », D) fistule, anastomose, E) tuyau d'orgue, F) pseudo-endokarst sur fissure, G) pseudo-endokarst, « crouillère » sur joint, H) bloc calcaire résiduel flottant dans l'altérite. La fantômisation des calcaires lutétiens du Bassin de Paris. Apport des carrières souterraines. A.DEVOS et all 2011.

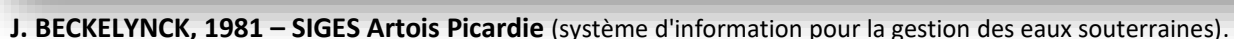




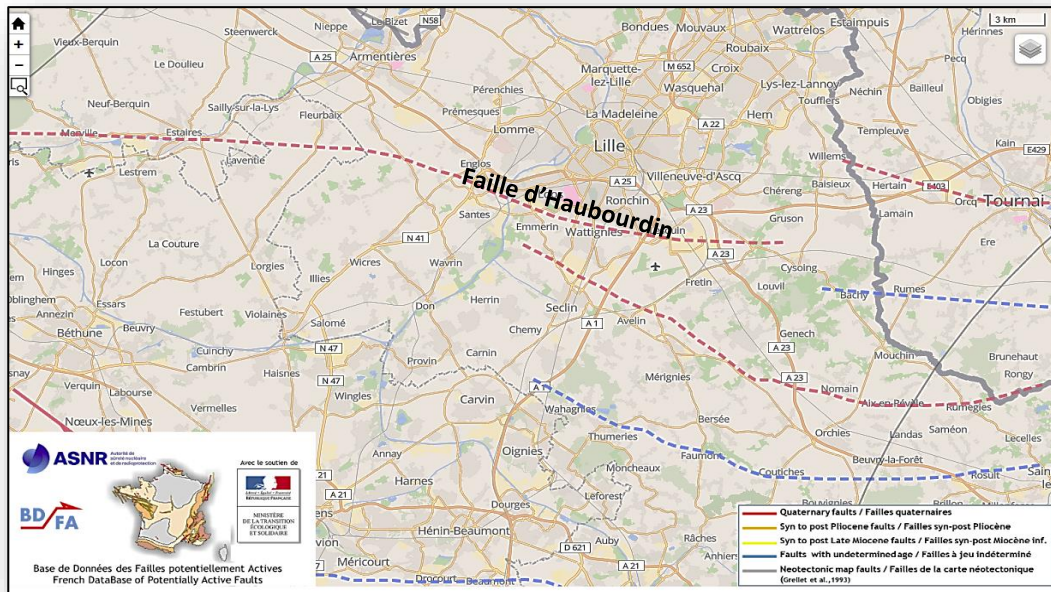
Comme établi par Y. QUINIF décrivant l'énergie qui caractérise un système karstique en corrélant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes en interaction avec lui. L'énergie joue un rôle essentiel dans la constitution du karst et pourrait être comparé à un système thermodynamique ouvert influencé par les quatre formes d'énergie suivantes :

Avec :

- Au Sud et Sud-Ouest de Lille, les affleurements crayeux Séno-Turonien forment une voute anticlinale à faible pendage entrecoupés de failles transverses. Cet anticlinal du Mélantois repose sur une structure sous-jacente discordante Paléozoïque Dévono-Carbonifère.



Durant nos investigations en carrière souterraine, nous avons remarqué de nombreuses traces de l'énergie mécanique résultant de ruptures tectoniques du dôme anticlinal. Les Miroirs de failles, rencontrés sous terre, témoignent de la rupture tectonique et de la variation d'énergie mécanique du système. A noter que les miroirs de faille sont peu dégradés par les eaux d'infiltration. On voit que les eaux d'infiltrations météoriques empruntent à peine ces fractures résultant directement de l'énergie mécanique de fracturation tectonique pouvant être à l'origine de la karstification.



Les miroirs de failles appartiennent au faisceau de failles orienté approximativement Est-Ouest qui longe la partie sud de la métropole Lilloise. Plus précisément, ces miroirs de failles sont associés à la faille de Lille-Hazebrouck (Haubourdin) qualifiée d'active au Quaternaire selon la BDFA (Base de Données des Failles Actives) ressource pour identifier et caractériser les failles actives au Quaternaire en France. La base de Données a été synthétisée entre 2010 et 2014 par l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) et le soutien du Ministère de l'Écologie, du MEDDE (Développement Durable et de l'Énergie). Cette base de données reflète l'état des connaissances en 2014 et propose une représentation cartographique des failles potentiellement actives, classées selon l'âge des derniers mouvements observés et un degré de confiance fondé sur les informations disponibles.

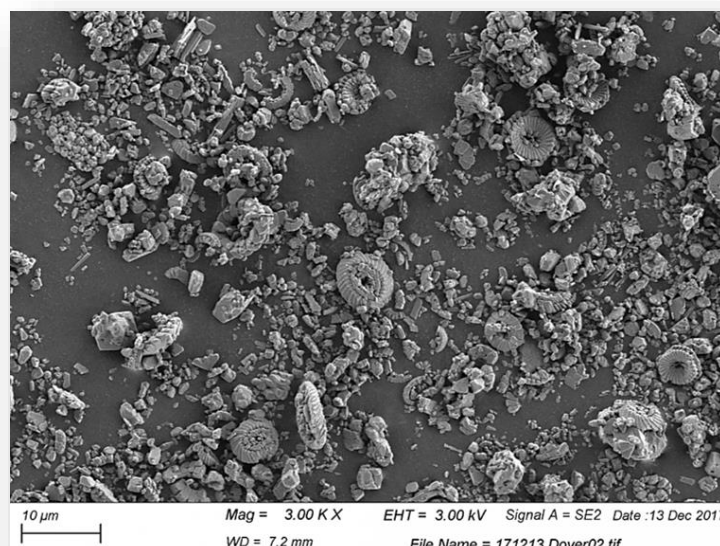




Miroirs de failles dans les carrières du Bon Dieu Noir. Le miroir de faille est un plan de faille dont le frottement produit un polissage mécanique de la roche mère (Craie) en créant des stries, des rayures ou des cannelures orientées dans le sens du déplacement. Morphologie des structures géologiques.

Les séries stratigraphiques crayeuses propices à l'énergie chimique de dissolution karstique

La craie est une roche sédimentaire calcaire blanche d'origine marine de type biomicrite (boue carbonatée), de texture mudstone à packstone (cf. ci-dessous classification de DUNHAM), à grain généralement très fin, tendre, marquante, poreuse et perméable. Elle est assez pure c'est-à-dire qu'elle est composée presque exclusivement du carbonate de calcium CaCO_3 (90 % ou plus) avec parfois un peu d'argile. Formée dans des mers chaudes et peu profondes, elle est constituée essentiellement par l'accumulation de minuscules particules de squelettes d'algues planctoniques (surtout des coccolithes), auxquelles s'ajoutent en quantité variable des fragments d'incérâmes, d'échinodermes ou de bryozoaires, ainsi que des foraminifères. Les principales accumulations de craie en Europe datent du Crétacé ; période géologique à laquelle la craie a donné son nom.



Les algues unicellulaires de type coccolithophores rejettent continuellement des coccolithes qui sont des plaques circulaires composées de carbonate de calcium. En expulsant leurs coccolithes, celles-ci s'accumulent sur les fonds marins et contribuent à la formation de la craie

Dunham	Mudstone	Wackestone	Packstone
Texture	Moins de 10 % de grains, plus de 90 % de boue	Plus de 10 % de grains, moins de 90 % de boue	Grains jointifs, liés par de la boue carbonatée (micrite)
Cimentation	Boue carbonatée (= Micrite)	Micrite > 10 %	Micrite < 10 %
Cémentation de dépôt	Les composants d'origine se sont pas liés ensemble pendant la phase de dépôt	Les composants d'origine se sont pas liés ensemble pendant la phase de dépôt	Les composants d'origine se sont pas liés ensemble pendant la phase de dépôt

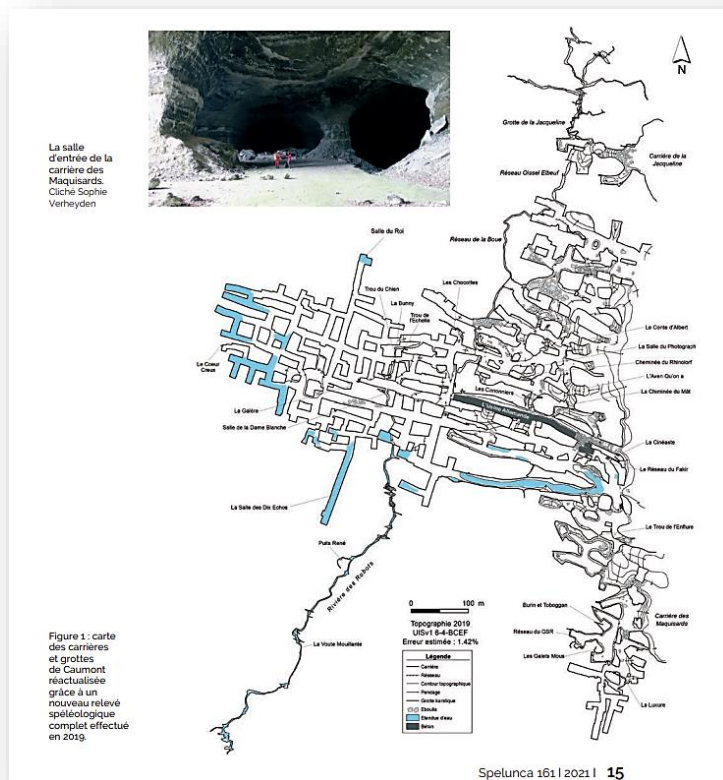
Classification de DUNHAM



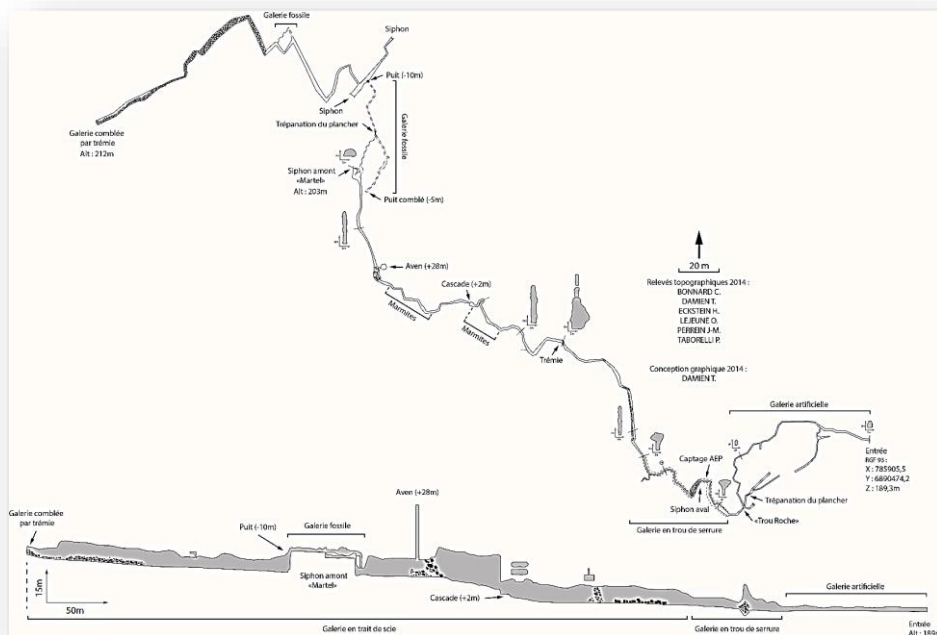
Fragments fossilisés d'incérâmes. Ils sont apparus au Jurassique et se sont développés et diversifiés au Crétacé. Leur taille s'est accrue passant de quelques centimètres à un mètre pour les plus grosses coquilles

La craie est une roche carbonatée karstifiable, c'est-à-dire que les phénomènes d'infiltration et de circulation des eaux à la faveur de fractures, de strates, de fissures ou de diaclases (issu de l'énergie mécanique de fracturation) peuvent générer des vides karstiques par dissolution de cette roche carbonatée comme à Trépail (Marne) ou à Caumont (Normandie). Pour ces deux karsts, les séries stratigraphiques concernées appartiennent à la transgression du Crétacé Supérieur ; comme celle des collines du Mélautois Les séries stratigraphiques se présentent sous les deux faciès suivants : craie blanche du Sénonien et celle du Turonien supérieur.

Nota : Le Sénonien est une subdivision de l'échelle des temps géologiques qui regroupe le Coniacien, le Santonien, le Campanien et le Maastrichtien.



Carrière de Caumont, Réseau karstique de la rivière des Robots et la grotte jacqueline

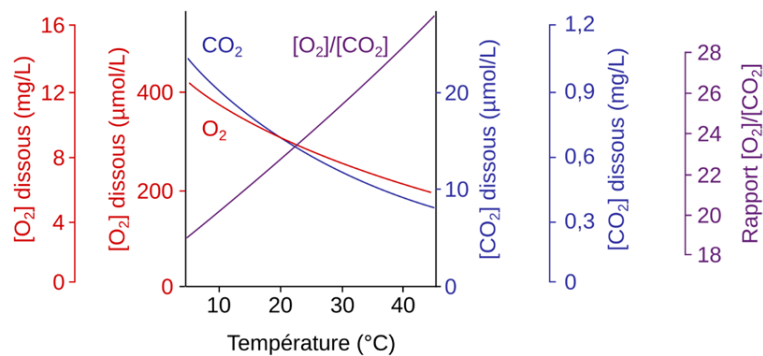


Energie chimique de dissolution du carbonate de calcium

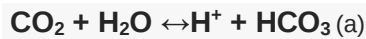
Le karst se développe parce que les roches carbonatées sont solubles dans l'eau pure. A titre d'exemple, le carbonate de calcium (CaCO_3), dans de l'eau pure à 16°C, sa dissolution est de l'ordre de 13 mg/l.



Mais la solubilité est bien plus grande lorsque l'eau contient du dioxyde de carbone dissous (CO_2). La solubilité augmente à mesure que la température décroît et augmente quand la pression s'élève. Au total cela donne un acide faible, l'acide carbonique (H_2CO_3).



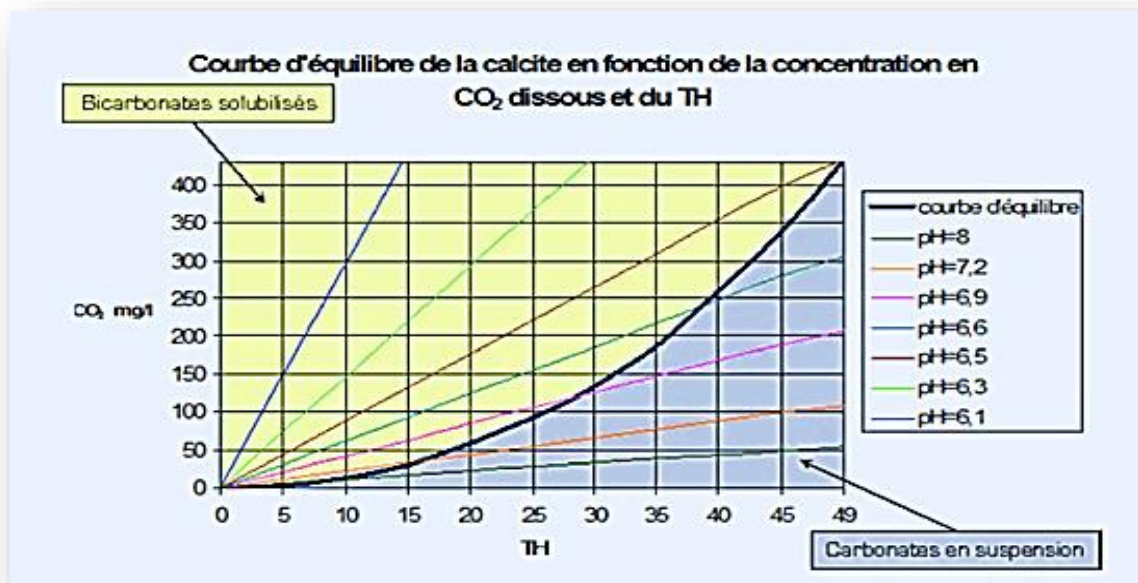
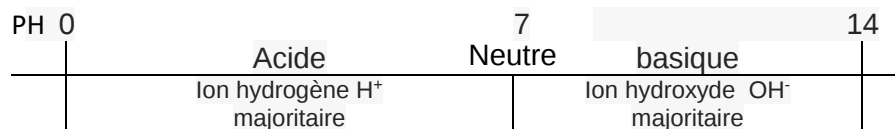
Le carbonate de calcium ionise pour donner un cation de calcium et un anion de carbonate.



Le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau en donnant de l'acide carbonique qui se dissocie en ions bicarbonate et hydrogène.

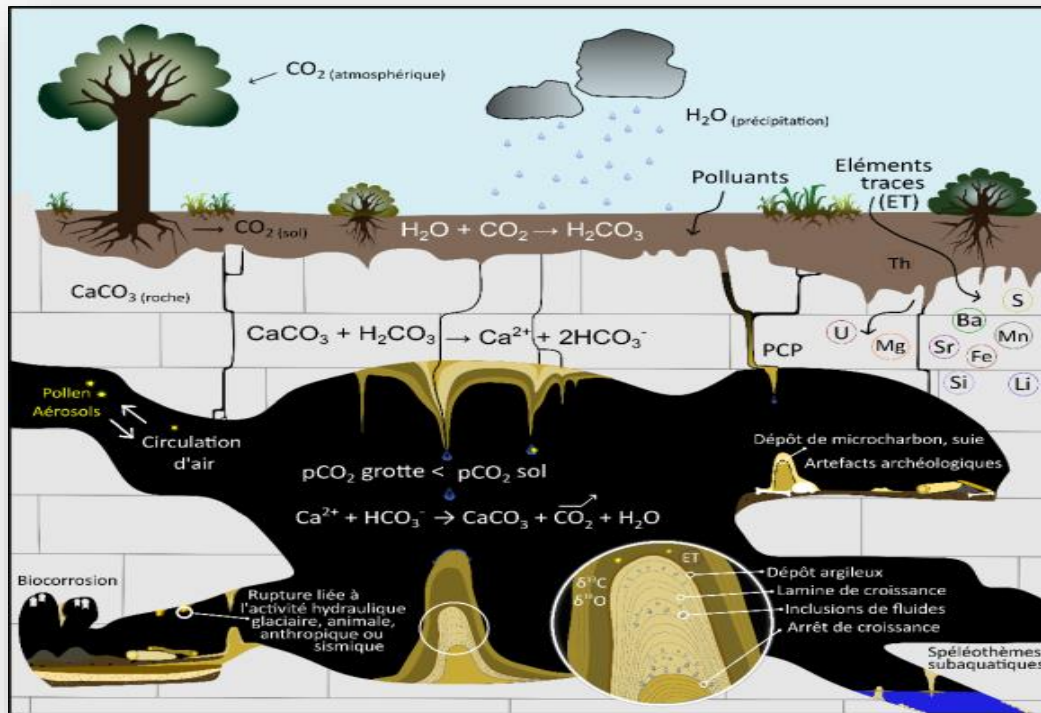


Les ions hydrogène (a), carbonates et bicarbonates et le CO_2 constituent un système dont les équilibres se modifient en fonction notamment du pH (b).

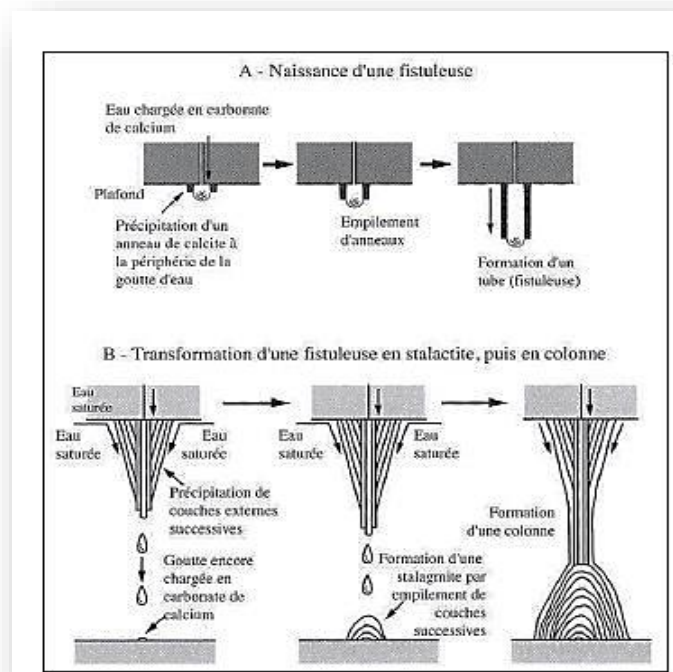


Ces équilibres chimiques conditionnent donc les proportions relatives des différents ions du système carbonaté. On peut résumer le processus comme suit :





Profil schématique illustrant la formation des spéléothèmes. Les principaux signaux géochimiques utilisés dans les spéléothèmes sont représentés par les isotopes stables des carbonates ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) et les éléments traces (ET) ; sont également illustrés les inclusions fluides et les dépôts argileux ou de pollen. Sont mentionnées les principales interactions entre les spéléothèmes et le milieu souterrain direct : submersion, rupture, biocorrosion. PCP est l'abréviation de Prior calcite precipitation (précipitation préalable de calcite). Charlotte Honiat et Dominique Genty 2025



Mode de croissance des fistuleuses, stalactites, stalagmites et colonnes (d'après Gilli, 1995). Le taux de croissance des stalagmites peut varier en général entre 0,01 et 1,0 mm/an en fonction de facteurs tels que la température, la concentration en Ca^{2+} des eaux de percolation (Dreybrodt, 1980, 1981),

La quasi-absence de concrétionnement indique que l'effet de la recimentation des fissures par le spéléothème est peu important dans les carrières souterraines du Mélantois.



Spéléothème limité avec de rares formation de petites fistuleuses

En résumé, les principaux facteurs qui favorisent la dissolution sont :

- la présence d'un couvert végétal dense sur manteau pédologique (ce qui engendre la production de CO_2 et d'acides d'origine biologique),
- le temps de contact important eau/roche carbonatée (sol jouant le rôle de compresse humide, manteaux neigeux, forte porosité, etc...).
- l'abondance de l'eau disponible (et surtout un flux abondant).

C'est donc l'abondance du flux d'eau et l'énergie mécanique qu'il représente qui reste l'élément déterminant de la karstification.

Energie mécanique de l'eau et perte charge exercée par le sol

L'énergie potentielle hydrostatique est liée à l'altitude d'une masse d'eau et à la force de la pesanteur, d'origine gravitationnelle et inertielle. Elle est définie comme l'énergie en réserve d'une masse d'eau emmagasinée, qui peut être transformée en énergie cinétique hydrodynamique lorsqu'elle se met en mouvement. Par exemple, lorsque la charge d'eau emmagasinée dans un sol et stagnant en surface se met en mouvement.

L'énergie mécanique de l'eau :

$$E_m = E_p + E_c$$

E_p , Energie potentielle avec deux composants :

- l'énergie liée, $E_{p1} = P$, lié à la pression atmosphérique $\pm 1013\text{hp}$
- l'énergie liée à l'altitude, $E_{p2} = \rho g z$.

E_c , énergie cinétique :

- l'énergie liée à la vitesse, $E_c = \frac{1}{2} \rho v^2$.

Ainsi l'énergie totale de l'eau peut s'exprimer :

$$E_m = P + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2$$

La perte de charge représente la dissipation de l'énergie mécanique de l'eau circulant entre deux points.

Vitesse de décharge d'écoulement ou de percolation

- débit d'eau s'écoulant au travers une surface d'aire totale S (grains + vides)
- vitesse fictive ou apparente

Mouvement global de l'eau dans la relation entre la vitesse (V), le débit (q) et la section transversale (S) :

$$V = \frac{q}{S}$$

Dans un sol, l'eau ne circule que dans les interstices entre les grains selon

- trajectoires tortueuses
- une vitesse moyenne réelle en ne considérant que la section des vides

$$V' = \frac{q}{S_v} = \frac{q}{nS} = \frac{V}{n} \quad ; \quad V_v = n \cdot V = n \cdot S \cdot H$$

$V' \geq V$
(n = porosité)
(n.S = S_v)

La perte de pression totale entre deux points (ΔP) s'exprime par la perte de hauteur totale (ΔH) exprimée en mètre de colonne d'eau ; équivalente avec la relation :

$$\Delta P = \rho g \Delta H$$

- la perte de pression totale en Pa ;
- la différence de hauteur totale en m ;
- ρ , la masse volumique du fluide en kg m^{-3} ;
- l'accélération de pesanteur en m s^{-2} .

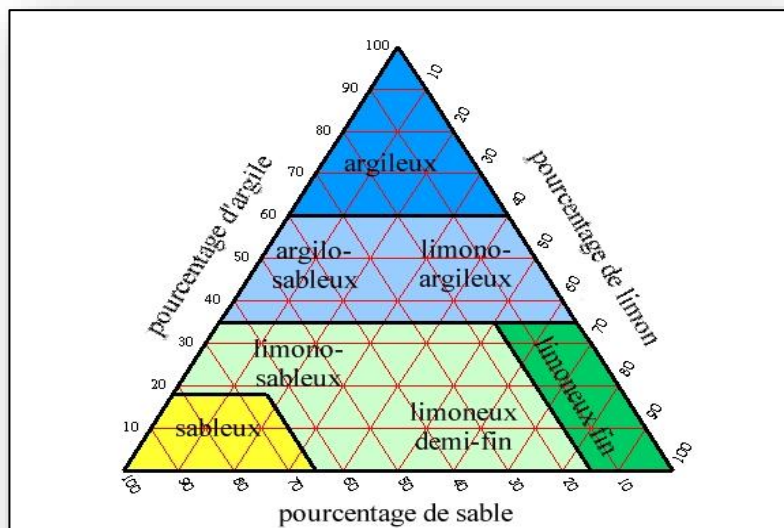
La relation entre 10 mètres d'eau et 1 kg/cm² est fondée sur la pression hydrostatique. En effet, une colonne d'eau de 10 mètres de hauteur exerce une pression d'environ 1kg/cm².

Texture et granulométrie d'un sol

La texture du sol résulte de la transformation en surface de la roche-mère sous-jacente qui se dégrade superficiellement. Ces matières de dégradations minérales sont enrichies en apports de matières organiques (végétaux, animaux, champignons et autres décomposeurs dont les micro-organismes) qui aboutissent à la formation des sols ; ces sols sont plus ou moins riches. C'est ce qui qualifie leur fertilité qui est leur capacité à fournir aux plantes les nutriments dont elles ont besoin pour se développer.

La granulométrie concerne le classement par catégorie de grosseur selon la nature minérale ; les matières organiques ne sont donc pas concernées :

- argiles : < 2 μm
- limons : de 2 μm à 50 μm
- sables : de 50 μm à 2000 μm

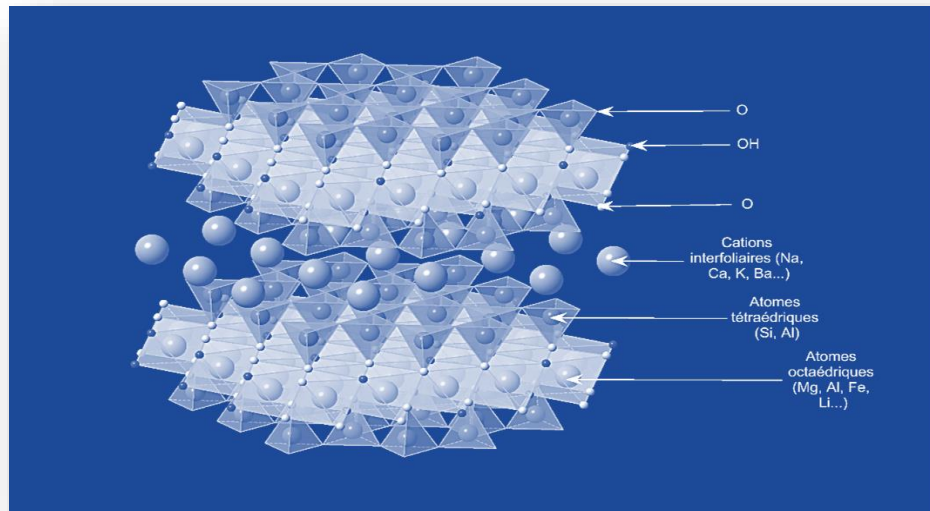


Composition des sols argileux

Les sols argileux sont principalement constitués de particules très fines (plaquettes), dont la taille est inférieure à 0,002 millimètres. Les argiles sont issues de la dégradation minérale et sont composées principalement de phyllosilicates qui sont des minéraux de composition

chimique cristalline du groupe des sels de dioxyde de silicium (SiO_2) et d'oxydes métalliques d'aluminium, magnésium, fer, calcium, potassium, sodium dont le squelette est assemblé par empilement de couches (plaquettes). Les plaquettes d'argile ont une structure en feuillets superposés, ce qui leur confère des propriétés uniques telles que l'absorption et l'échange ionique.

On différencie les argiles par leur type de combinaison d'empilement des feuillets tétraédriques et octaédriques, le cation de la couche octaédrique, la charge de l'argile et le type de matériel interfoliaire.

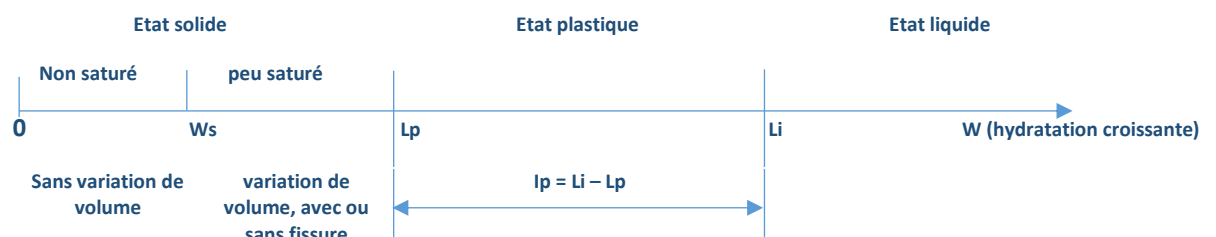


Structure atomiques d'une argile TOT

Les minéraux argileux :

- Les minéraux argileux TO, constitués d'un feuillet tétraédrique surplombant une couche octaédrique,
- Les minéraux argileux TOT, constitués de deux feuillets tétraédriques encadrant une couche octaédrique,
- Les minéraux argileux TOTO, constitués de deux feuillets tétraédriques encadrant une couche octaédrique, l'espace interfoliaire est rempli par un feuillet octaédrique,

Limites d'ATTERBERG concernant les sols argileux



Ws : limite de retrait, Lp : limite de plasticité, WL : limite de liquidité, Ip : indice de plasticité

L'indice de plasticité (Ip) indique la plasticité d'un sol. Il est calculé avec la formule suivante :

$$Ip = Li - Lp$$

Un Ip supérieur à 40 indique que le sol est très plastique, tandis qu'un Ip entre 0 et 5 indique une certaine rigidité. L'Ip est déterminant pour évaluer et prédire le comportement du sol dans différentes conditions d'humidité.

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

La plasticité est une propriété caractéristique des éléments très fins ou argileux du sol, en relation avec l'eau adsorbée. On conçoit donc que les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec son assemblage en plaquettes argileuses mais également avec la composition des minéraux argileux.

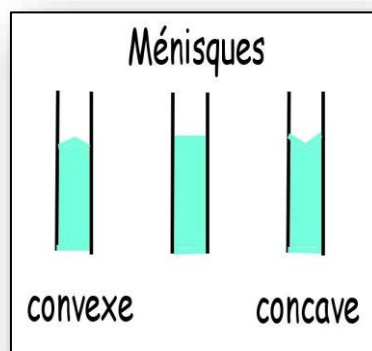
Effet de capillarité des sols

La tension capillaire est un phénomène physique qui se produit lorsque l'eau monte dans un tube ou les interstices du sol, en raison de la tension superficielle et des forces d'adhésion entre les molécules d'eau et les surfaces des grains du sol. A la lecture du tableau ci-dessous, on retiendra que dans les sols grossiers de type gravier, la hauteur de remontée capillaire est quasi nulle, alors que dans les sols argileux, elle peut être très importante si le milieu est continu.

Hauteur de remonté capillaire, par Hansbo (1975)

Sols	État lâche	État compact
Sable grossier	0,03 – 0,12 m	0,04 – 0,15 m
Sable moyen	0,12 – 0,50 m	0,35 – 1,10 m
Sable fin	0,3 – 2 m	0,4 – 3,5 m
Limon ou Silt	1,5 – 10 m	2,5 – 12 m
Argile	> 10 m	> 10 m

Dans les argiles, la tension capillaire peut être très importante, surtout si les grains sont uniquement argileux, ce qui permet à l'eau de remplir totalement les interstices entre les plaquettes argileuses dont le ménisque est concave.



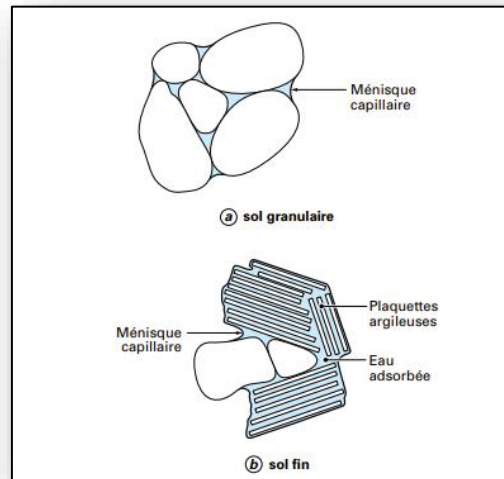
La succion est définie par la forme du ménisque entre les grains

La succion du sol correspond à la force d'attraction s'exerçant entre les grains du sol non saturé en eau. Elle est exprimée en unités de pression (Pa, kPa) ou en hauteur d'eau (cm ou m). Elle résulte principalement deux phénomènes :

- d'absorption capillaire, l'eau des interstices du sol, au contact des grains, exerce une tension superficielle plus ou moins forte, créant des ménisques d'eau entre les grains (concave ou convexe),
- d'adsorption par ponts de colloïdes, comme pour les colloïdes électronégatifs d'argile et de l'humus, l'ajout de cations du calcium CA^{2+} crée un pont calcique permettant aux colloïdes électronégatifs de ne plus se repousser entre eux.

Les représentations ci-après représentent schématiquement :

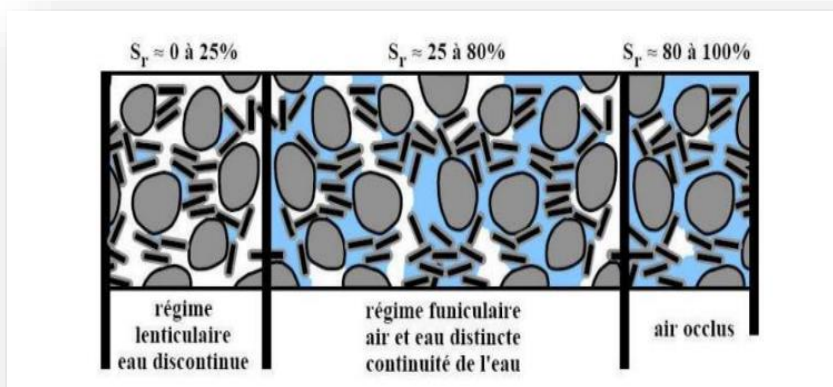
- en haut, le mécanisme capillaire d'un sol granulaire,
- en bas, l'agrégat de plaquettes argileuses d'une dizaine de micromètres de diamètre, au contact d'un grain de limon.



Mécanisme capillaire selon les grains

Les régimes d'infiltration de l'eau :

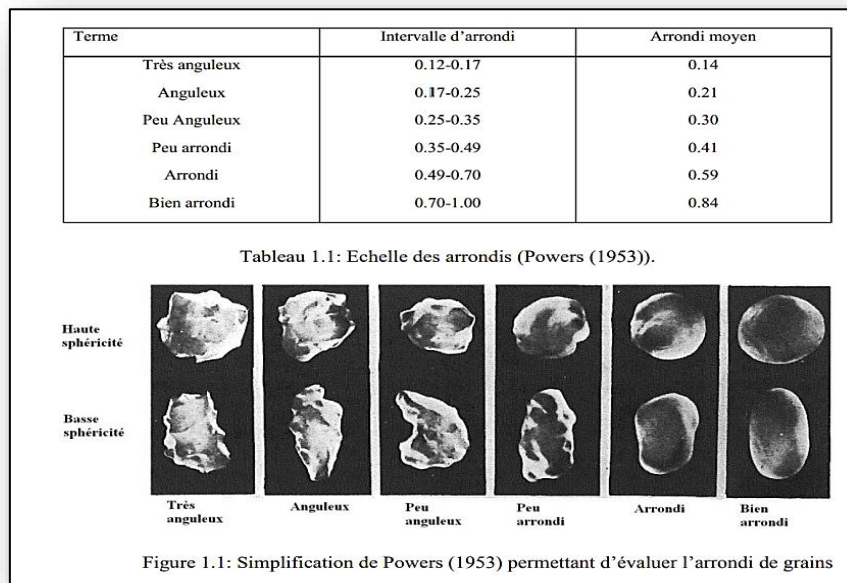
1. Régime lenticulaire, l'air occupe l'essentiel des pores et l'eau est bloquée : c'est le cas des sols non saturés avec un faible degré de saturation ($S_r = 0$ à 25%).
2. Régime funiculaire, l'eau et l'air peuvent se déplacer librement ($S_r = 25$ à 80%) : les deux phases sont continues. Il s'établit un profil d'équilibre de la pression de l'air et de la teneur en eau
3. Régime d'air occlus, l'eau mouille la surface des particules en les entourant, elle ne se déplace que lentement. L'air constitue une phase continue, mais sans aucun déplacement. L'eau domine et l'air ne peut se déplacer librement : c'est le cas d'un sol presque saturé ($S_r = 80$ à 100%). L'eau constitue une phase continue et se déplace sous l'effet de la gravité. Par contre, l'air est discontinu;



Forme de capillarité selon la teneur en eau (Disly 1997)

Angulosité des grains pour les sols à granulométrie plus élevée

Pour les grains de limon et sable (de 2 µm à 2000 µm) la cohésion dépend aussi de la forme des grains. Si les grains sont anguleux alors l'angle de frottement augmente ainsi que sa capacité à résister aux forces de cisaillement.



Charge géostatique et tassement des sols

Le sol possède une masse volumique qui, sous l'effet de la gravité terrestre, génère un poids volumique noté γ (gamma). Ce poids volumique s'exprime en kilo newtons par mètre cube (kN/m³). A la profondeur z donnée, chaque élément de sol supporte le poids de toute la colonne de terre située au-dessus de lui. Cette compression permanente crée une contrainte verticale qui augmente linéairement avec la profondeur la charge géostatique. Le tassement du sol se produit lorsque la pression exercée sur le sol diminue les interstices et diminue sa porosité en réduisant la circulation d'eau et d'air.

$$\sigma_v = \gamma z$$

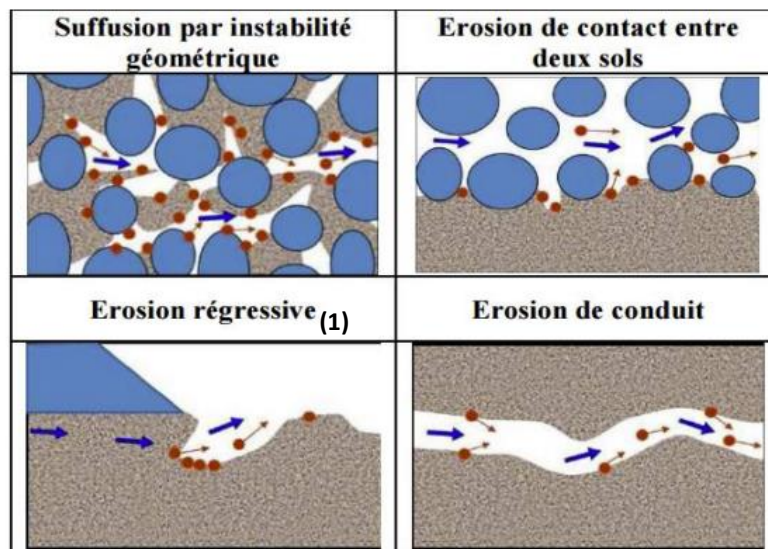
(Charge géostatique = poids volumique $\times$ profondeur)

Dans des sols de type grenus, le tassement du aux charges est un phénomène rapide, voire quasi immédiat. En effet, les réarrangements entre les grains de sol, s'effectuent aussitôt que les charges sont appliquées. Les tassements ainsi obtenus sont généralement considérés comme un comportement quasi élastique. Par contre, les mêmes charges appliquées à des sols cohérents à grains fins et saturés (argiles, limons,...), vont provoquer un tassement à plus long terme. En effet, l'eau présente dans le matériau mettra beaucoup de temps à être évacuée. Elle subira d'abord un phénomène de surpression avant de s'évacuer par les pores du sol et de permettre à la structure du terrain de se déformer. Ces tassements à long terme des sols cohésifs sous des charges constantes, sont appelés tassements de consolidation. Les sols fins présentent une faible perméabilité, par conséquent l'évacuation des pressions interstitielles est un processus très lent, qui peut s'étendre sur une durée relativement importante selon la distance à parcourir.

Les érosions du sol par infiltration d'eau

Quatre types d'érosion, présentés sur la figure ci-dessous, à savoir:

- la suffusion ;
- l'érosion de contact entre deux sols ;
- l'érosion régressive ou boulangue (1);
- l'érosion de conduit par écoulement localisé.



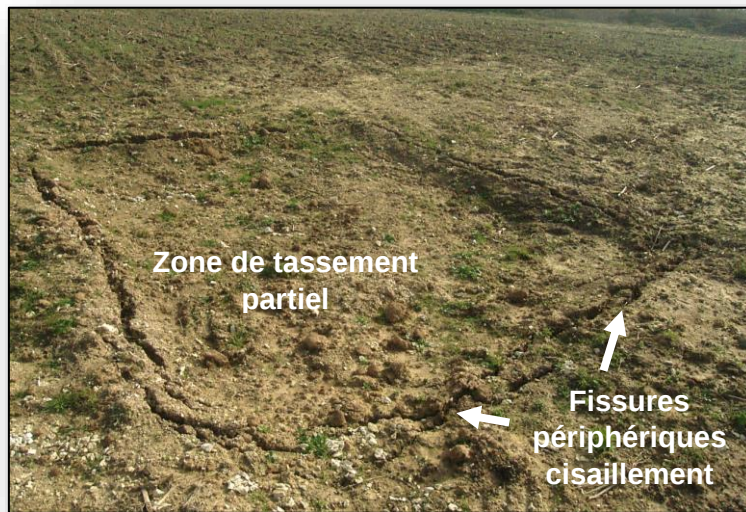
Quatre phases d'érosion des sols proposée par BONELLI 2013



L'érosion régressive ou boulangère est un phénomène qui est à l'origine de la karstogenèse de la grotte de la halte de Boursonne Coyolles (1) (Aisne). Les calcaires du lutécien reposent sur un sable rubéfié. Les infiltrations d'eau au travers des strates rubéfiées créent l'érosion régressive et l'effondrement des dalles de calcaire ; représentant une forme d'énergie mécanique de karstification.



Les dalles ou radiers de béton utilisés pour remplacer les encorbellements de catiche peuvent provoquer des tassements partiels du sol. En période sèche, des fissures peuvent se développer dans le sol argileux en périphérie d'un tassement partiel (état solide peu saturé avec variation de volume gonflement, retrait). Ces fissures peuvent être superficielles, fines ou profondes.



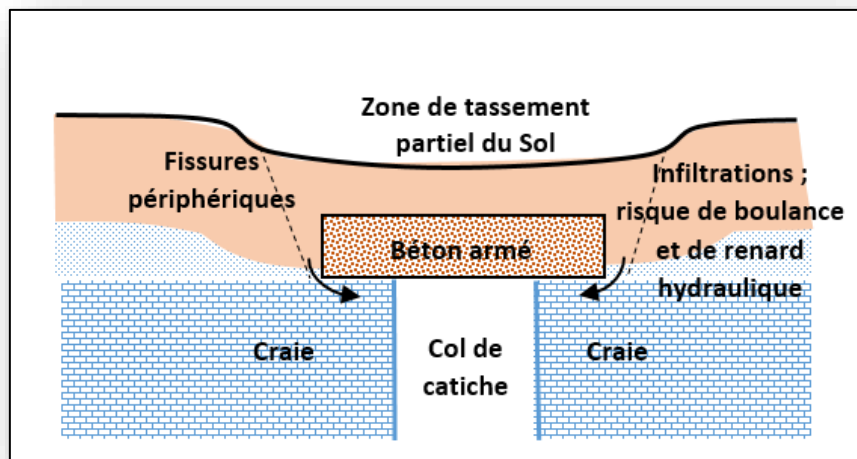
Tassement partiel, fissures périphériques siège d'infiltrations dont les effets sont accentués par la rétention d'eau dans la dépression et par l'érosion régressive ou boulangue en cas de présence de dalle béton ou d'encorbellements de catiche



Coffrage perdu sur contreplaqué marine (baké). Sans une protection adéquate telle que des revêtements spécialisés. Le contre-plaqué marine finit par montrer des signes d'usure sous les conditions extrêmes. Des agents entraîneurs d'air peuvent être mélangés au béton pour améliorer son imperméabilité



En période d'averses, elles sont le siège d'infiltrations qui sont accentuées par la rétention d'eau de la dépression de la zone de tassement partielle et des effets d'érosion régressive (boulance, renard hydraulique) exercés par la masse de béton. Les infiltrations répétées risquent de produire des épaufrures du béton par carbonisation.



Le ciment du béton au contact de l'eau d'infiltration et par une réaction chimique, abaisse son pH ainsi le ciment du béton se dégrade par carbonatation. Lorsque ce front de carbonatation atteint les aciers de son armature, ce dernier s'oxyde et gonfle.

Le gonflement de l'armature produit de l'éclatement de surface du béton (épaufrures). En exposant les armatures à l'oxydation de l'eau d'infiltration. Les épaufrures accélèrent le processus de corrosion de l'armature, ce qui peut conduire à une réduction significative de la capacité portante de la dalle. Dans les cas extrêmes, cela peut compromettre la stabilité même de l'ouvrage

Le renforcement géosynthétique

Les géosynthétique, tels que les géogrilles, les géotextiles et les géomembranes, sont utilisés pour renforcer les sols en augmentant leur capacité portante et en réduisant les tassements. Ils peuvent également servir de protection contre les déformations locales en répartissant les charges sur une plus grande surface et en augmentant ainsi la résistance au cisaillement des sols voisins.

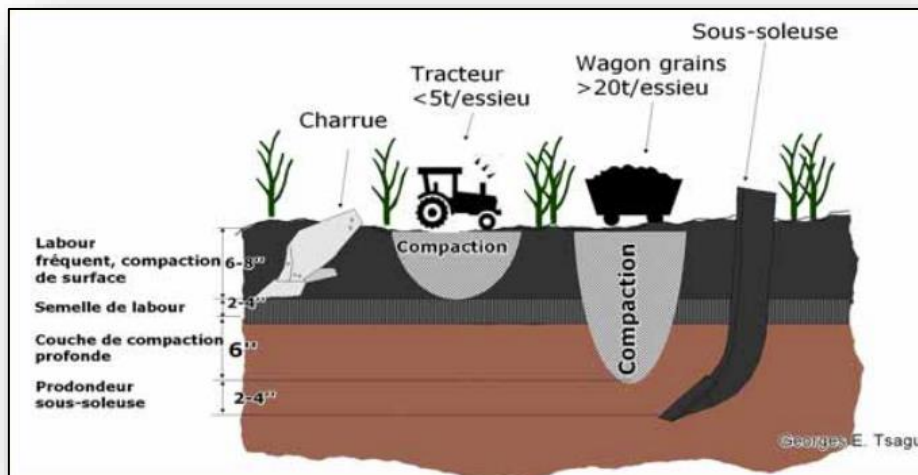
Le géotextile est un matériau perméable utilisé pour filtrer, renforcer et stabiliser le sol, tandis que la géomembrane est une membrane imperméable destinée à contenir les liquides et prévenir les fuites. La perméabilité des géomembranes est un aspect crucial pour garantir leur efficacité dans la préservation de catiche. Les géomembranes doivent avoir une certaine imperméabilité, cela signifie qu'ils peuvent résister à infiltration d'eau sous une pression de 100 kPa, ce qui est essentiel pour la protection des ouvrages contre les infiltrations. La résistance mécanique des géomembranes, mesurée par la résistance maximale à la traction unidirectionnelle, variant de 8 à 50 kN/m, selon le type de géomembrane.

Actuellement, il semblerait qu'aucune étude de portant sur le renforcement géosynthétique (GSY) prenant en compte le fantôme de roche au contact de catiches n'ait été effectuée. (Cf. Limitation par renforcements géosynthétiques des risques liés aux effondrements des toits de catiches par M HASSOUN et al 2017),

Tassement partiel et particularité du sol travaillé en agriculture

Les sols à texture fine ayant une teneur élevée en argile et limon sont plus sensibles au tassement ou compactage alors que les sols à texture grossière le sont moins. La teneur élevée en eau augmente l'effet de compactage car l'eau chasse l'air (air occlus) interstitielle et favorise le resserrement des grains et la saturation en eau. Les sols humides à forte teneur en argile sont généralement plus collants. La limite inférieure de plasticité (L_p) marque la transition entre un état solide et un état plastique. Cette limite indique la teneur en eau optimale

pour travailler un sol mais favorise la compaction par les engins agricoles. En dessous de cette limite, le sol est friable donc plus facile à travailler. Ainsi le sol décompacté produit les tassements différentiels consécutifs au mouvement d'enfoncement des engins dans une zone décompactée. Le compactage partiel ce fait provoquer des gouttières d'écoulement de l'eau vers des zones de stagnation d'eau.



La sous-soleuse est un outil agricole qui décompacte le sol en profondeur pour améliorer le drainage du sol et favoriser la pénétration racinaire. Le dégagement produit par l'outil peut atteindre près d'un mètre. Georges Erick TSAGUE, La compaction des sols : Les causes et les solutions – 2005



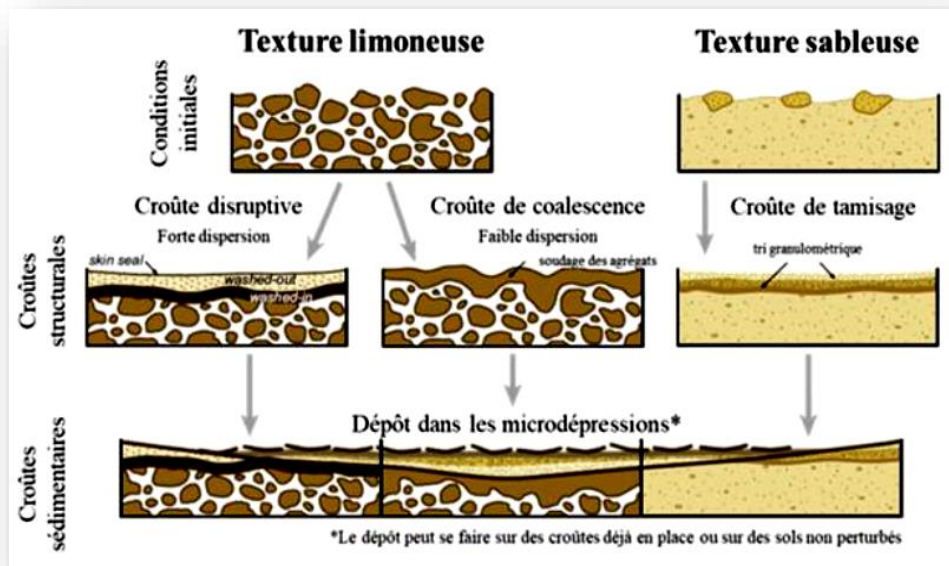
Exemple de tassement de roues d'engin formant une gouttière, collectant vers une stagnation d'eaux et de lisier en concentration excessive pouvant générer de la lixiviation dans les carrières sous-jacentes

La lixiviation est le processus au cours duquel l'eau de surface passe au travers des pores du sol (percolation) en entraînant des polluants solubles (lixiviats). Le lixiviat est le soluté résiduel qui percole au travers du sol et de la roche poreuse (craie). La lixiviation concerne les éléments solubles polluants qui sont entraînés verticalement par infiltration. Le lisier, un mélange de déjections d'animaux d'élevage et d'eau peut participer à l'eutrophisation. L'eutrophisation des nappes souterraines en alimentant des milieux aquatiques peut créer un déséquilibre du milieu qui est provoqué par l'augmentation de la concentration dans ce milieu. Si les eaux ne sont filtrées par le sol, les eaux de restitution de l'aquifère contribueront donc à une croissance excessive des plantes et des algues due à la forte disponibilité des nutriments.

La battance du sol, le ruissèlement et la formation de cuvettes d'eau

La battance est le phénomène qui se produit lorsque que sol est dépourvu de couvert végétal et par lequel un sol tend à se désagréger sous l'action de la pluie en formant une croûte

superficielle. C'est un phénomène qui se produit principalement dans les sols à structure fine (argiles, limons) et appauvris en matière organique. La croûte se forme lorsque les gouttes de pluie frappent la surface du sol, provoquant un tassement des grains du sol et la formation d'une croûte tassement en surface. Ce processus est souvent accentué par des pratiques agricoles inadéquates, comme un travail trop fin du sol. En effet, les sols nus et travaillés sans couvert végétal sont particulièrement sensibles à la battance.



Évolutions possibles des croûtes du sol en fonction de la texture et de l'environnement du milieu. Modèle adapté de Williams et al. (2018) à partir des travaux de Valentin et Bresson (1992), West et al. (1992) et Anderson et al. (2002).



Micro dépression inondée par des ruissellements de la zone de battance. Dans la zone de micro dépression, la croûte de battance n'est pas morcelée par la végétation et les semis n'ont pas levé. Alors que plus haut dans le champ, les semis se sont développés et leur système racinaire a morcelé la croûte de battance.

Ainsi les croûtes de battance et le tassement des engins (tassements différentiels) peuvent conduire à des ruissèlements avec éventuellement des ravinements (écoulement localisé, érosion de conduit Cf. Quatre phases d'érosion des sols proposée par BONELLI 2013) s'écoulant vers des zones de stagnation dans des micro-dépressions et consécutivement produire des saturations sur un sol ameubli ce qui favorise l'instabilité cohésive des grains du sol.

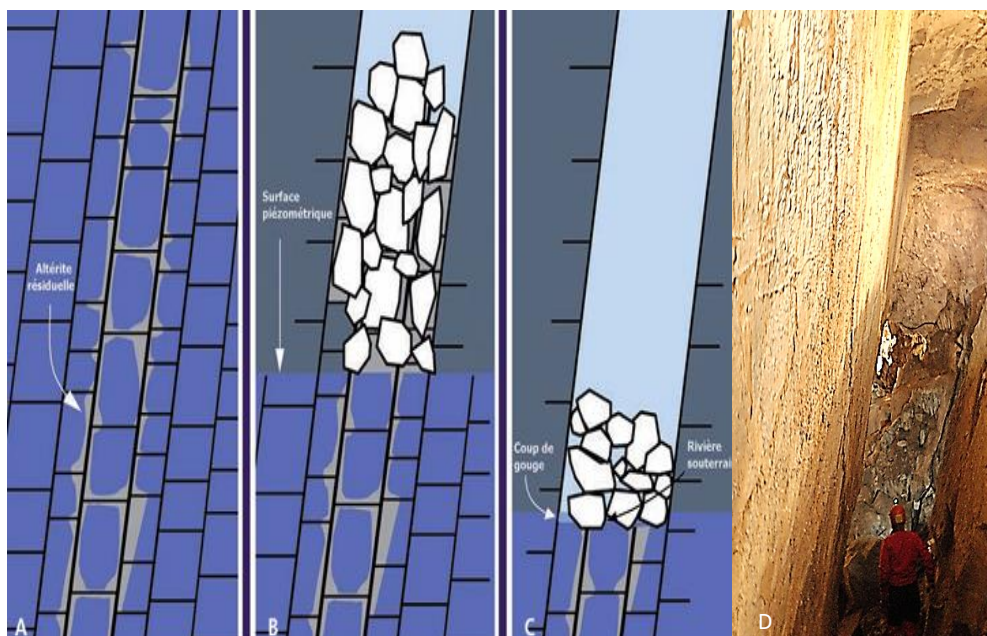


Malaxage du sol par passage répété sur une micro dépression qui se surcreusée

Dans les zones de micro-dépression, s'il se produit des passages répétés d'engins lourds alors des malaxages du sol se constituent. Ainsi cette zone de malaxage peut créer des cuvettes d'eau stagnante et plus ou moins boueuses qui accentuent la suffusion en profondeur par instabilité cohésive des grains du sol.

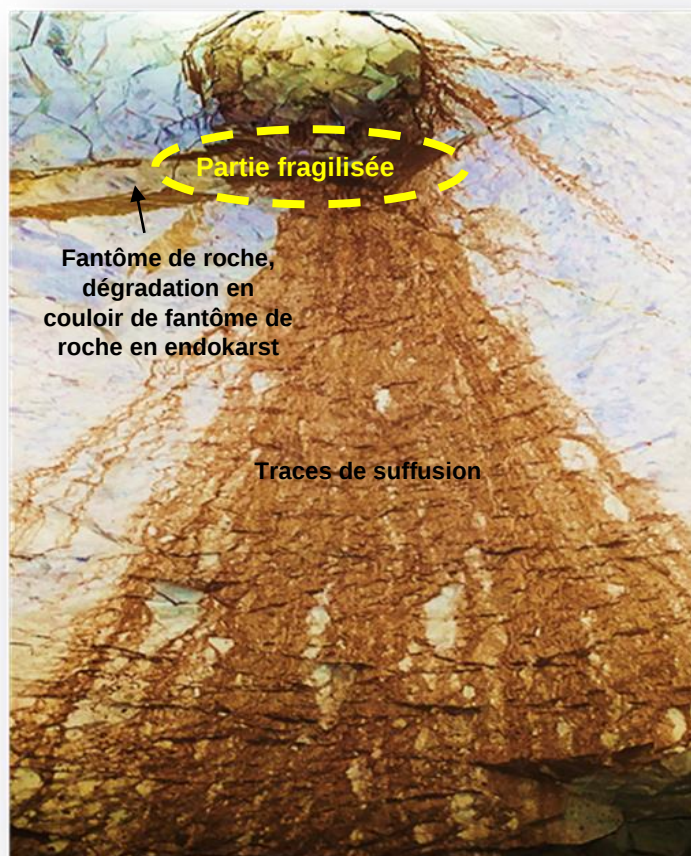
Infiltration d'eau dans la roche carbonatée, effets hydrochimique et hydromécanique menant à la dégradation du fantôme de roche en formant des blocs dans un couloir de fantôme de roche en endokarst.

Lorsque l'eau d'infiltration pénètre l'altérite des anfractuosités fantomisées, l'action hydrochimique et hydromécanique disloquent en blocs la roche fantomisée. Ainsi les blocs ont tendance à s'effondrer par effet gravitaires dans un couloir de fantôme de roche en endokarst.



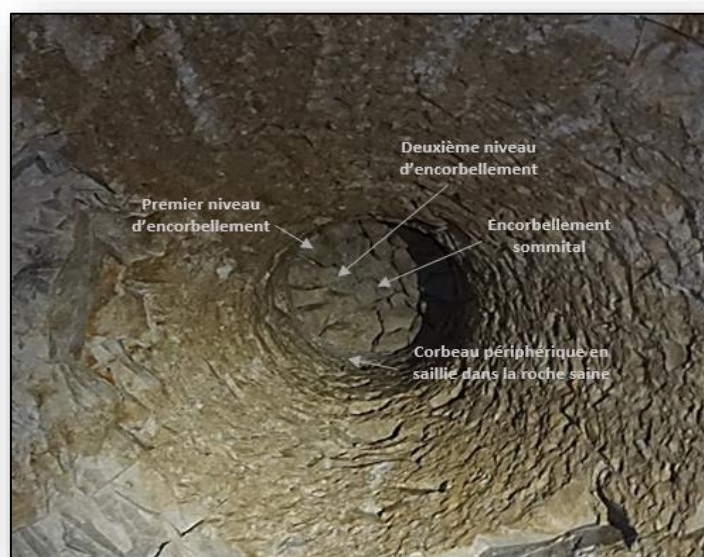
Exemple d'évolution schématisée d'un couloir de fantômes de roche en endokarst (partie souterraine). A) deux joints sont altérés par infiltration. B) l'altérite est mobilisée au niveau piézométrique effondrement des blocs résiduels qui se tassent ou se coincent entre les parois du couloir. C) Les circulations actives dissout les blocs, ce qui conduit à la formation d'un vide important (Les couloirs endokarstiques Éléments structurants d'une cavité ; Y QUINIF 2017). D) Couloir endokartique à la grotte de Nichet (Fromelennes, Ardennes)

Le corbeau du col de catiche, le point faible de l'encorbellement



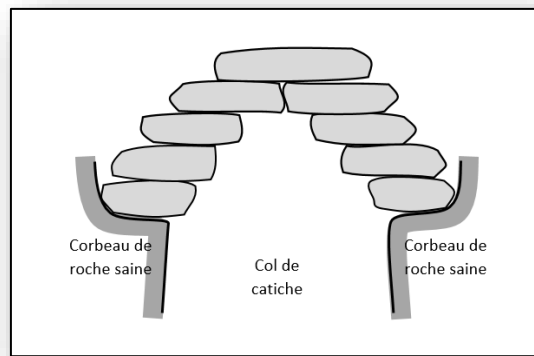
Traces de suffusion ayant provoquées le déplacement des particules fines provenant du sol. Zone de conjonction entre un fantôme de roche et une suffusion pouvant entraîner la rupture d'un corbeau et la ruine de l'encorbellement

L'extraction de la craie souterraine par catiche consiste à creuser un puits depuis la surface dans le sol puis la roche altérée et de poursuivre sur quelques mètres dans la craie saine (col de catiche) pour enfin élargir et obtenir un épaulement (cf. Coupe verticale schématique).

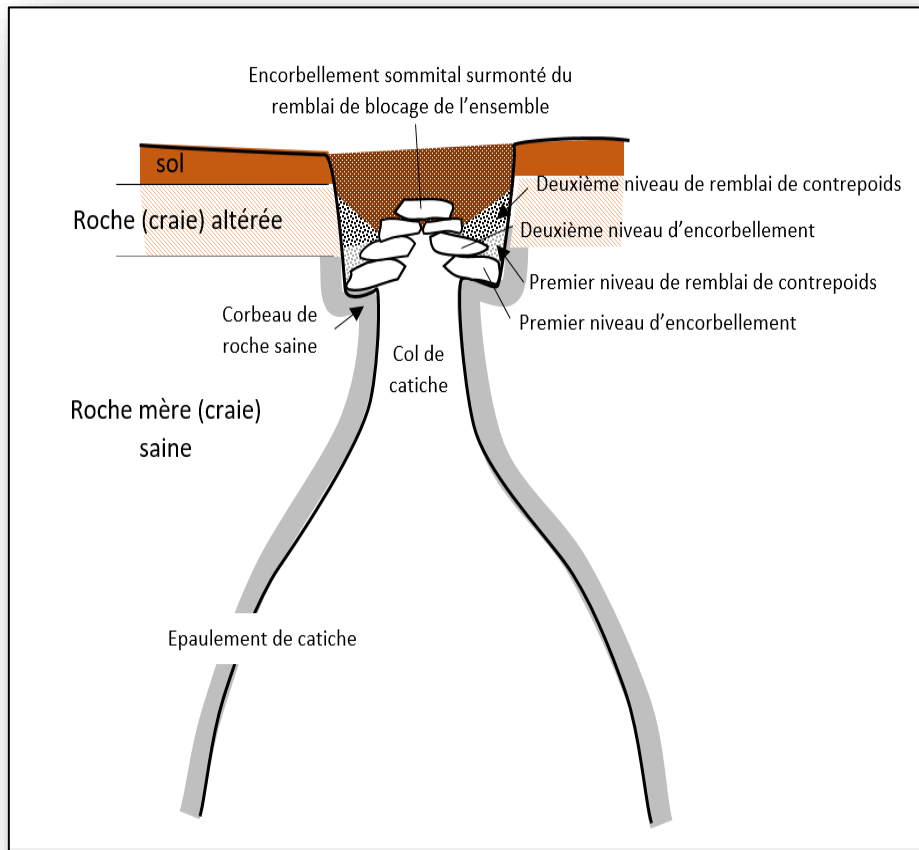


Encorbellement d'une catiche sans suffusion

Une fois l'extraction terminée, la catiche était refermée selon la technique de l'encorbellement avec des pierres sèches en craie déposées depuis la surface. Les blocs de craie étaient superposés avec un léger porte à faux à partir de la roche mère crayeuse saine taillée en saillie (corbeau). Le col de catiche était refermé progressivement par ces blocs de craies par un appareillage en pierre sèche mais contrebalancé au fur et mesure avec un remblai argileux.



Appareillage d'encorbellement en pierre sèche. (La pierre sèche est un appareillage sans mortier de jointoiment)



Coupe verticale schématique du col de catiche et de l'encorbellement de fermeture



Effondrement au contact de l'encorbellement et du fantôme de roche

On voit sur la photo (page 20) que le point faible d'une catiche est la corniche périphérique sur laquelle repose l'encorbellement. Si une dégradation du fantôme de roche se développe à la jonction du corbeau et du fantôme de roche sans recimentage par le spéléothème alors les éléments sont réunis pour précipiter un effondrement de l'encorbellement de catiche. Cette rupture partielle du corbeau entraîne une réaction en chaîne qui conduit à une ruine catastrophique en surface. Ce type d'effondrement est caractéristique lorsqu'il y a présence, au niveau de la roche crayeuse, d'un pan de fracture brunâtre qui sont les traces de dépôts des particules de météorisation (altérite)



Exemple de ruine de catiche entraînant l'effondrement du bâti en surface.

Synthèse des risques d'effondrement en carrière souterraine

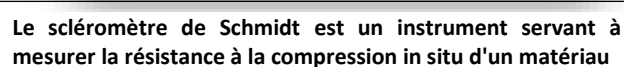
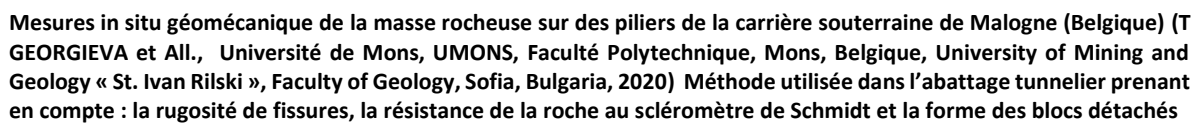
L'impact de l'anthropisation des sols (compactage, décompactage, érosion...), sus-jacents aux carrières souterraines, a pour effet de produire des troubles de cohésion favorisant l'action de l'énergie hydromécanique ($E_m = E_p + E_c$) et consécutivement la diminution de la perte de charge du sol. En premier lieu, les grains du sol gorgés d'eau perdent leur cohésion interstitielle et se détachent emportés par le flux d'eau exerçant l'énergie cinétique sous forme de suffusion. Puis, s'ajoute l'énergie potentielle qui accentue les mouvements cinétiques suite à la libération des rétentions résultantes des ruissellements d'eau en surface. Ainsi, peu à peu, la suffusion se propage à la matrice d'altérite du fantôme de roche en contact avec la catiche. L'action hydromécanique et hydrochimique disloque en blocs le fantôme de roche et cela sans que forcément n'apparaissent de désordres sus-jacents importants.

Pour sa part, l'énergie chimique de dissolution du carbonate de calcium reste limitée ; comme elle l'était initialement (karstification par un fantôme de roche). De plus, les observations in situ montrent que le spéléothème se développe insuffisamment et ne peut recimenter la fissure délaissée par le fantôme de roche.

La substitution de l'encorbellement de pierre sèche par une dalle ou un radier béton peut également être fragilisée suite aux infiltrations dont l'effet est accru par la boullance exercée par la masse de béton. Si l'imperméabilité du béton n'est pas améliorée par des adjuvants pour matériaux cimentaires, de type entraîneur d'air, alors les infiltrations répétées au contact du béton risquent de produire des épaufrures du béton résultant de la carbonisation du ciment. La carbonisation du ciment active le processus de corrosion de l'armature, ce qui conduit à une réduction significative de la capacité portante de la dalle.

Si au fil du temps des traces de coulées de suffusion apparaissent au col de catiche et qu'il y a présence de fantômisations. De fait, c'est le signe avant-coureur que le fantôme de roche, au

Les ruines de catiches n'ont pas forcément un caractère imprévisible. Comprendre et interpréter les signes avant-coureurs sont cruciaux pour éviter des conséquences catastrophiques. Dans le cadre des ruines de carrières souterraine et au même titre que les remontés de voûtes, les contre-foisonnements de remblais ou géomécanique de masse rocheuse sur des piliers, le fantôme de roche et les traces de suffusion au contact d'un corbeau d'encorbellement du col de catiche sont des indicateurs clés pour évaluer la stabilité d'un encorbellement de fermeture de catiche.



26

Préservation d'un patrimoine matériel

L'extraction de la craie en catiche concernait plutôt l'exploitation destinée à la chaufournerie et au marnage des champs. Pour sa part, l'extraction en galerie filante alimentait la filière de la pierre de taille pour le bâti. D'autres galeries plus basses, se développant au niveau de bancs de silex, pourraient être d'anciennes minières à silex. L'extraction du silex a vécu son apogée lorsqu'il était éclaté pour produire des lames au Néolithique. Mais il a été supplanté par l'émergence de métallurgie et relégué pour le bâti et le remblai des voies vicinales.



Dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, la croissance du chemin de fer, en facilitant le transport de la pierre, a scellé le sort de l'extraction de la craie destinée à la pierre de taille au profit des Pierres de Paris (calcaire du lutécien non gélif). Seule restait l'exploitation en catiche pour approvisionner la chaufournerie. Mais à la fin du XIX^{ème} siècle, la filière s'industrialise avec la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents dits aujourd'hui ciments Portland. Le ciment allant de pair avec une architecture autour du béton coffré et du béton armé. Parallèlement les tombereaux attelés lourdement chargés de pierres qui défonçaient les chemins environnants, sont abandonnés au profit des voies ferrées pour wagonnets attelés. A Loos, une voie ferrée, dédiée aux wagonnets chargés de blocs de craie, est ouverte entre la carrière à ciel ouvert de Loos et la Société des Ciments et Chaux Hydrauliques du Nord à Haubourdin. Ainsi l'extraction en catiche est délaissée et fait place à l'extraction à ciel ouvert avec l'utilisation de l'excavatrice à godets. C'est donc depuis un peu plus d'un siècle que l'extraction de la craie par creusement de catiches est abandonnée. Espérons qu'elles survivront à la voracité de l'anthropisation et resterons longtemps le témoin du dur labeur des carriers et d'un mode de construction anciens utilisant à bon escient les matériaux locaux.



La spéléologie permet d'étudier les processus géologiques, biologiques et environnementaux qui façonnent les systèmes souterrains.