

Tunnel de la Mine .

Cavité souterraine , aquifère et Risques .

Ci- dessous quelques éléments intéressants que j'ai pu trouver pour argumenter sur l'aspect technique du risque en lien avec la galerie souterraine de la Mine et le projet d'urbanisation, question qui n'est jamais abordée par Immobilis ou la commune .

INERIS= Institut National de l' Environnement Industriel et Risques.

Les risques générés par une cavité peuvent s'aggraver au fil du temps en fonction de nombreux facteurs : altération des roches, fissuration, dissolution, etc. et mettre en péril la sécurité des personnes et les installations non seulement souterraines mais aussi celles établies en surface. Les enjeux liés à l'urbanisation croissante ont conduit le ministère chargé de l'écologie à instaurer, avec l'appui de l'INERIS, le Plan national pour la prévention des risques liés aux effondrements de cavités souterraines. (PNA risques effondrement cavités souterraines 2013/2015).

Extrait Guide CEREMA « Gestion territoriale du risque cavités souterraine »Fevrier 2018

d'acteurs locaux de la prévention des risques. À noter que ce guide n'aborde pas la gestion des cavités d'origine minière.

Responsabilités sur le domaine public

Les responsabilités dévolues aux maires et collectivités découlent en premier lieu du régime juridique des cavités souterraines. Les cavités non minières relèvent principalement du code civil, et peuvent aussi relever partiellement, en fonction de leur origine et de leur ancienneté, du code minier voire du code de l'environnement.

Dans la majeure partie des cas, en accord avec le code civil, le propriétaire d'un terrain est également celui du sous-sol à l'aplomb. De ce fait, sur le domaine public, la collectivité est généralement propriétaire des cavités sous-jacentes. Selon les contextes, ce principe peut être mis à défaut, par exemple s'il existe une division horizontale de la propriété constatée par un acte authentique valide. Ce principe peut également se complexifier : une cavité peut passer sous plusieurs propriétés, avoir plusieurs entrées situées chez différents propriétaires, s'étendre sous des infrastructures, etc. Différents textes réglementaires peuvent donc s'appliquer, en fonction du type de cavité (naturelle, anthropique,

abandonnée, occupée), de son usage (passé et actuel), de son âge ainsi que de la nature du terrain (public ou privé) à l'aplomb. Le code civil régit également les droits et responsabilités du propriétaire d'une cavité : servitudes d'accès, engagement de la responsabilité en cas de dommages...

Le maire détient, vis-à-vis d'un risque, des responsabilités, en lien avec ses pouvoirs de police. Ces responsabilités peuvent relever, selon les cas, du droit administratif ou pénal. De par ses pouvoirs de police administrative générale, un maire doit prévenir

et faire cesser les accidents naturels. Il doit également prescrire les mesures de sûreté exigées par les circonstances. En cas de faute ou d'infraction commise par un maire dans le cadre de ses activités de police générale, sa responsabilité pénale peut être engagée. Selon le code de la construction et de l'habitation, un maire peut être amené à prescrire des mesures de sécurité sur des bâtiments menaçant la sécurité publique.

Dans le cas de phénomènes liés à l'existence de cavités souterraines, ce sont généralement les pouvoirs



QU'EST-CE QUE C'EST ?

Les mines, non traitées dans ce guide, relèvent d'une gestion administrative (réglementation, responsabilités, acteurs) différente.

Mines et cavités ont toutefois un point commun, celui d'affecter irrémédiablement le sous-sol.

COMMUNAUTÉ URBAINE DU GRAND REIMS

ÉTUDES GÉOPHYSIQUES POUR ÉLABORER UNE STRATÉGIE

En raison des nombreux effondrements survenus sur son territoire, comme celui de la rue du Docteur-Jacquin en juin 2016, le Grand Reims (Marne) a lancé début 2017 des études afin d'établir une stratégie de gestion des risques liés à la présence de cavités souterraines (crayères, caves instables...). Le BRGM a ainsi été sollicité pour réaliser diverses investigations géophysiques dans le but d'approfondir la connaissance sur ces cavités : microgravimétrie, topographie 3D centimétrique et diagnostic de stabilité. Ces travaux permettent de fournir à la collectivité les éléments techniques nécessaires à l'élaboration et la mise en œuvre de cette stratégie, qui devra, d'une part, prévenir le risque à l'occasion des travaux d'aménagement et, d'autre part, mettre en sécurité les personnes et les biens si besoin.

Source : BRGM

Gestion territoriale du risque cavités souterraines



© CEREMA

- de police administrative générale qui s'appliquent. Mais certaines cavités, comme les aménagements souterrains habités (habitations troglodytiques), peuvent relever des pouvoirs de police spéciale. Certains cas complexes ou des situations d'extrême

QUELS FINANCEMENTS POSSIBLES ?

Plusieurs outils financiers peuvent être mis à contribution. Le principal, le fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM), peut être sollicité, sous conditions, pour des actions de prévention ou pour mettre en sécurité les biens et les personnes. En cas d'événement catastrophique, des fonds de solidarité peuvent être mobilisés, à divers échelons territoriaux. D'autres outils peuvent aider à financer des actions : fonds européens, contrats de plan État/régions... Ces outils demandent que soient vérifiées au préalable l'éligibilité d'opérations sur les cavités souterraines à ces financements ainsi que les conditions à remplir pour en bénéficier.

urgence nécessitant d'évacuer des personnes menacées peuvent même faire coexister les deux pouvoirs de police.

Gestion communale du risque

Outre les responsabilités dévolues aux maires, la loi fixe également aux communes ou parfois à leurs groupements, des obligations relatives à la prévention des risques : ces missions s'appliquent à différents aspects de la prévention : connaissance et analyse du risque, prise en compte du risque dans l'aménagement du territoire, information préventive des citoyens, planification et gestion d'un événement.

Si l'État identifie une commune comme concernée par le risque cavités souterraines, cette commune doit rechercher les données afférentes (dont celles que lui aura transmises l'État dans le cadre de la procédure de transmission des informations aux maires) et les cartographier. Une commune peut être amenée également à approfondir la connaissance de l'aléa, sur l'ensemble ou une partie de son territoire, en mettant en œuvre des techniques adaptées. Il est fortement conseillé de faire appel pour ce faire à des bureaux d'études géologiques et géotechniques qualifiés.

Le risque cavités souterraines doit être pris en compte dans l'aménagement du territoire et l'urbanisme au

niveau communal voire intercommunal. À ce titre, les informations sur les cavités doivent être intégrées dans les documents d'urbanisme. Les autorisations d'occupation du sol doivent être délivrées en tenant compte de cet aléa. Le cas échéant, les prescriptions d'un plan de prévention des risques

Un effondrement survenu à l'intérieur d'une maison d'habitation constitue un risque pour les personnes et les biens.

naturels (PPRN) cavités doivent être appliquées. Enfin, la collectivité peut être amenée à procéder à l'acquisition amiable voire à l'expropriation de biens menacés.

La commune, éventuellement soutenue par l'intercommunalité, est chargée d'organiser et de mettre en œuvre l'information préventive des citoyens. En cas d'existence d'un PPRN cavités, une information communale périodique est obligatoire tous les deux ans ainsi que la fourniture de l'état des risques nécessaires aux transactions et locations immobilières. En l'absence de ce PPRN, une commune concernée par le risque cavités souterraines doit mener plusieurs actions, notamment réaliser son document d'information communal sur les risques majeurs (Dicrim), signaler les risques menaçant la sécurité publique et empêcher l'accès aux cavités dangereuses.

Opérations de sauvegarde et phase de post-crise

L'une des principales missions d'un maire, en lien avec ses pouvoirs de police, est de diriger, lors d'une crise, les opérations de sauvegarde sur sa commune. Sauf carence de sa part ou événement exceptionnel touchant plusieurs communes, le maire est en effet le directeur des opérations de secours. À ce titre, il doit non seulement appliquer ses pouvoirs de police si les circonstances le nécessitent mais également pourvoir aux besoins immédiats de la population, sans omettre d'informer l'État des mesures qu'il aura été amené à prendre. Le maire doit également préparer sa commune à un éventuel événement, en faisant surveiller les cavités souterraines dangereuses menaçant la sécurité publique et en élaborant le plan communal de sauvegarde, sur lequel

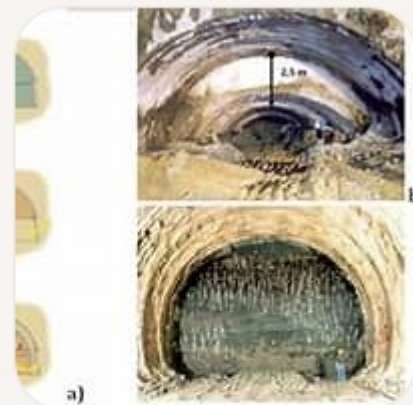
2.4.1. Les facteurs d'influence des écoulements au voisinage des tunnels

Le creusement d'un ouvrage souterrain perturbe les écoulements naturels au sein du massif. Il constitue un drain naturel pour la nappe de versant. L'analyse des facteurs influençant les venues d'eau au sein d'un ouvrage est importante pour comprendre l'hydrogéologie d'une nappe de versant, sa dynamique sur les instabilités gravitaires et les sections potentiellement les plus affectées de l'ouvrage.

Les tunnels proches d'un aquifère peuvent subir des pathologies liées à l'instabilité géotechnique et aux écoulements d'eau, nécessitant des mesures de drainage et d'étanchéité adaptées.

Mécanismes de pathologie

Les tunnels situés dans des terrains aquifères sont soumis à des **contraintes hydrauliques et géotechniques spécifiques**. Le creusement modifie l'équilibre initial de la nappe phréatique, ce qui peut provoquer des **tassements, des fissurations et des instabilités locales** de la structure du tunnel. Les pathologies observées incluent : [↔ CFMR | Comité Français de Mécanique des Roches +1](#)



- **Fissures longitudinales et transversales** selon la direction du tunnel par rapport aux mouvements du versant. [↔ 2](#)
- **Déformations en cisaillement** réparties sur le profil longitudinal et transversal.
- **Affaissements ou tassements locaux** dus à la dépressurisation de l'aquifère et à l'écoulement de l'eau vers le tunnel. [↔ 2](#)

3.2 - Notions sur les causes et la nature des désordres

Nature, structure et comportement du terrain encaissant

En tunnels non revêtus, les causes des désordres sont directement liées aux particularités géologiques du terrain encaissant : fléchissement de dalles rocheuses, masses de roche fracturée, décohésion superficielle... Les conséquences se divisent alors en deux catégories :

- **Les instabilités localisées**

Elles entraînent un risque direct sur la sécurité des usagers. Ce sont les plus fréquentes et doivent être gérées avec une approche "risque naturel" similaire à une voirie extérieure.

- **Les instabilités généralisées**

Elles entraînent un risque de ruine du tunnel. Elles sont peu fréquentes mais nécessitent une analyse sur le long terme.

Influence de l'eau

L'eau, qu'elle provienne du massif ou de fuites de réseaux en milieu urbain, est l'agent principal des désordres et du vieillissement des tunnels. Elle agit aussi bien au niveau physique (lessivage de bétons ou de joints en mortier, entraînement des fines des terrains meubles, gel, mise en charge) qu'au niveau chimique (dissolution, gonflement des terrains, attaques sulfatiques, concrétion dans les drains). Les ruissellements, le verglas, les stalactites de glace en voûte, les déformations de chaussée... apportent une gêne à l'utilisateur, mais entraînent aussi la dégradation des équipements (corrosion) ou leur dysfonctionnement (court-circuits). Ils peuvent conduire à des limitations d'exploitation importantes.

3.2.1.2 - Construction du tunnel

Le patrimoine de tunnels regroupe une diversité d'ouvrages réalisés à des périodes très différentes. Les techniques de construction, les matériaux, les méthodes et techniques de dimensionnement évoluent et progressent, profitant notamment des retours d'expérience des chantiers passés. Une technique défaillante ou une méconnaissance des comportements des matériaux et des terrains peuvent donc être une cause de désordre.

Méthodes de construction

Certains tunnels anciens ont été réalisés à une époque où on ne disposait pas des techniques et des moyens propres à stabiliser les terrains encaissants lors du creusement, comme le permettent les méthodes actuelles de soutènement. De plus, la connaissance limitée du terrain et de son comportement différait pouvait conduire à des structures sous-dimensionnées. Si les moyens d'études ont grandement évolué depuis lors, permettant de minimiser les incertitudes au niveau des projets, des aléas sont toujours possibles.

3.2.1.3 - Vie de l'ouvrage

Manque d'entretien

L'insuffisance ou l'absence d'entretien d'un tunnel est un facteur de vieillissement accéléré des structures, qui se traduit tôt ou tard par des désordres graves :

- soit par la mise en cause directe de la sécurité des usagers (à titre d'exemple, l'absence de purges préventives en sections non revêtues conduit parfois à des chutes de roches),
- soit parce qu'elles entraînent de gros travaux de réparation (à titre d'exemple, faute d'un entretien suffisamment fréquent, certains réseaux de drainage se colmatent très rapidement, générant des désordres en voûte ou en chaussée).

Accidents géotechniques des tunnels et des ouvrages souterrains[..] 2007 — Jamal Idris(thèse)

Pages 55 à 65 et 77 à 79. Extraits assez techniques mais des explications et des schémas très clairs. concernant le vieillissement et les contraintes géotechniques que subissent les tunnels .

NB : ne sont abordés que les tunnels qui possèdent un soutènement et un revêtement.

D'après l'auteur les ouvrages comme la Mine creusés dans la roche brute sans confortement ne sont pas censés supporter les contraintes géotechniques du milieu car cela représente une mal façon .

Je n'ai pour l'instant trouvé aucun document précis concernant ce type de situation ou d'ouvrage souterrain.

4.1 Introduction

Les roches, les matériaux de construction subissent plusieurs modifications et dégradations dans le temps sous la combinaison de plusieurs facteurs. Ces dégradations se développent selon plusieurs transformations ou processus : processus physiques, processus chimiques et processus biologiques.

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les changements et les modifications de propriétés mécaniques des matériaux de construction dus à ces processus afin de la traduire dans les simulations par la variation de certains paramètres physiques et mécaniques du soutènement des tunnels maçonnés.

Ce chapitre comporte deux parties principales, il aborde :

- ❖ Les différents processus du vieillissement des matériaux de construction et des roches, les mécanismes et les origines de ces processus, le comportement rhéologique et vieillissement des roches
- ❖ Une recherche bibliographique sur le vieillissement des tunnels maçonnés. Le but de cette partie est de faire le point sur l'état de l'art concernant les anciens ouvrages souterrains soutenus ou revêtus par maçonnerie, en abordant les différents types de désordres rencontrés dans ces ouvrages, en cherchant les causes et les mécanismes qui sont à l'origine de désordres.

4.2 Processus de vieillissement des matériaux de construction

Le terme « vieillissement » exprime l'ensemble des modifications et des transformations minéralogiques et des dégradations mécaniques survenues sur les matériaux de construction en fonction du temps.

Le vieillissement des roches est donc, le résultat de la combinaison de plusieurs causes qui engendrent à long terme plusieurs transformations, altérations et dégradations. Nous pouvons classer les causes responsables en deux catégories : les causes internes dépendant de la structure du matériau, sa composition chimique ou minéralogique et de ses propriétés physiques ; les causes externes traduisant les effets multiples de l'environnement et du climat.

Ces transformations se produisent selon trois différents types de processus que nous développons ci- après.

4.2.1 Processus mécanique (physiques)

Le matériau en place est soumis à des contraintes dues aux conditions de chargement. D'après Reiche, (1950) les changements du système de contraintes conduisent à des transformations de propriétés physiques ou mécaniques de la roche, entraînant une dégradation et une fragmentation de la roche. Ainsi, les processus mécaniques du vieillissement conduisent à une diminution des caractéristiques physiques des matériaux selon plusieurs mécanismes possibles :

Cycles dilatation-contraction :

À l'état libre de toutes contraintes, le matériau se dilate quand sa température augmente et se contracte dans le cas contraire. Cette propriété s'exprime par un coefficient de dilatation thermique (α) caractéristique du matériau. Ce coefficient de dilatation thermique (α) prend la forme suivante :

$$\alpha = \frac{\delta l}{l \times \delta T} \quad (1)$$

On peut donc écrire δl :

$$\delta l = l \times \delta T \times \alpha \quad (2)$$

Dans un matériau isotrope empêché de tout déplacement, la contrainte thermo-élastique σ_T qui se développe au sein de la roche peut donc s'écrire :

$$\sigma_T = E \times \varepsilon = \frac{E \times dl}{l} = \frac{E \times l \times \delta T \times \alpha}{l} \quad (3)$$

$$\sigma_T \cong E \times \alpha \times \delta T \quad (4)$$

avec:

α : coefficient de dilatation thermique ;

δl : variation de longueur parallèle à la direction de contrainte (L) ;

l : longueur de l'objet (L) ;

δT : variation de la température (°) ;

E : module d'élasticité longitudinale ou module de Young (MPa) ;

ε : déformation longitudinale ;

σ : contrainte normale (MPa).

En pratique les roches ont une texture minéralogique hétérogène, la dilatation thermique est souvent anisotrope, ce qui provoque des dilatations différentielles. Des contraintes intergranulaires de traction, de compression ou de cisaillement s'y développent dépassant les valeurs limites caractéristiques de la résistance à la rupture de la roche. Par conséquent, des fissures intergranulaires se produisent.

Dans les tunnels, les incendies peuvent augmenter énormément la température dans l'ouvrage. Dans les tunnels maçonnés, cette augmentation énorme de la température entraîne des ruptures intragranulaires dans les pierres de la maçonnerie et dans le mortier.

Les travaux de Houpert et Homand-Etienne sur les roches citées par Berest et Weber (1988) ont montré que la température a un effet non négligeable sur la résistance à la compression. La microfissuration observée par Microscopie Electronique à Balayage (MEB), générée par les sollicitations thermiques, semble être à l'origine de la diminution de la résistance mécanique.

Prenant en compte que la valeur du coefficient de dilatation thermique des roches est comprise entre $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et $3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, et que le module de Young change considérablement selon le type de roche (E est inférieure à 10 GPa pour les roches tendres et compris entre 10 et 1000 GPa pour les roches dures), on conçoit que les contraintes thermiques puissent être plus importantes dans les roches cristallines et les roches dures très compactes que dans les roches tendres.

Winkler et Singer (1975) ont montré le rôle de la présence de l'eau sur les processus thermiques. La dilatation de l'eau dans les capillaires est plus importante que celle de la roche, la variation rapide de la température (de l'ordre de 40°C) peut donc engendrer localement des surpressions d'eau interstitielle qui peuvent atteindre 26 MPa.

L'effet des cycles thermiques se propage à l'intérieur de la roche à cause de la conductivité thermique. L'évolution de la température dans un matériau en fonction du temps et de l'espace est exprimée par l'équation :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = k * \Delta T \quad (5)$$

avec :

$k = \frac{K}{\rho C}$ diffusivité thermique (m^2/s) ;

K : conductivité thermique ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$) (*watts par mètre-kelvin*) ;

ρ : masse volumique (kg/m^3) ;

C : chaleur massique spécifique ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$) (*Joule par kilogramme- kelvin*) ;

ΔT : opérateur Laplacien.

Du fait de la faible conductivité thermique des roches, l'effet des cycles thermiques n'agit que sur une zone limitée (superficielle) de la roche en contact avec l'atmosphère. Ce phénomène explique les désordres d'écaillage observés dans les tunnels maçonnés.

Cycles gel – dégel :

En absence d'étanchéité efficace dans les ouvrages souterrains anciens, l'eau arrive jusqu'à la maçonnerie. L'eau joue un rôle fondamental dans les cycles gel-dégel, avec la diminution de la température à moins de 0°C , l'eau contenue dans les pores, dans les fissures et les joints des roches se transforme en glace, son volume augmente en exerçant une pression qui peut atteindre 50 à 200 MPa, (Sorgi et al., 2004), ce qui provoque le développement de nouvelles fissures et l'éclatement de la roche.

Cycles hydratation – dessiccation :

Les variations du degré de saturation de l'atmosphère ambiante contrôle le transfert d'eau entre la roche et l'atmosphère, ce qui entraîne des cycles d'hydratation et de dessiccation. L'hydratation peut entraîner le développement d'une pression suffisante pour induire le phénomène du gonflement de certaines roches (les roches contenant de l'argile par exemple).

En cas de dessiccation, la roche restitue une partie de l'eau à l'extérieur subissant un phénomène de retrait ce qui provoque des contraintes de traction.

La succession de cycles de gonflement retrait dus aux cycles d'hydratation - dessiccation peut altérer mécaniquement la roche, en induisant des fissurations importantes qui peuvent entraîner à long terme la fragmentation des roches concernées.

A l'inverse, la déshydratation ou la dessiccation du matériau entraîne un retrait généralement accompagné de fissures de tractions. Celles-ci augmentent la perméabilité de la roche, la rendant plus sensible aux autres mécanismes d'altération (Sorgi et al., 2004)

La répétition de cycles d'hydratation-dessiccation amplifie les processus de fragilisation et de fissuration de la roche (Van Eeckhout, 1976).

Plusieurs recherches dont celles de Wiid (1967) et de Watelet (1996) ont été consacrées à déterminer l'influence de l'humidité relative sur le module d'élasticité et sur la résistance à la compression de roches. Les résultats montrent une diminution de valeurs des deux paramètres qui atteint 40% entre l'état sec et l'état complètement saturé. Cette diminution du module d'élasticité peut s'expliquer par la fermeture des fissures en début de chargement des éprouvettes. Ainsi l'angle de frottement interne mobilisé à l'état sec, est progressivement réduit quand le degré de saturation augmente, cette diminution est due à l'évolution du comportement de la roche vers un comportement moins rigide avec l'augmentation du degré de saturation.

Les processus physiques sont considérés comme un facteur de développement d'autre processus de vieillissement. L'altération de roche due aux processus physiques augmente notamment la surface rocheuse qui devient la cible d'actions et d'altérations chimiques et biologiques.

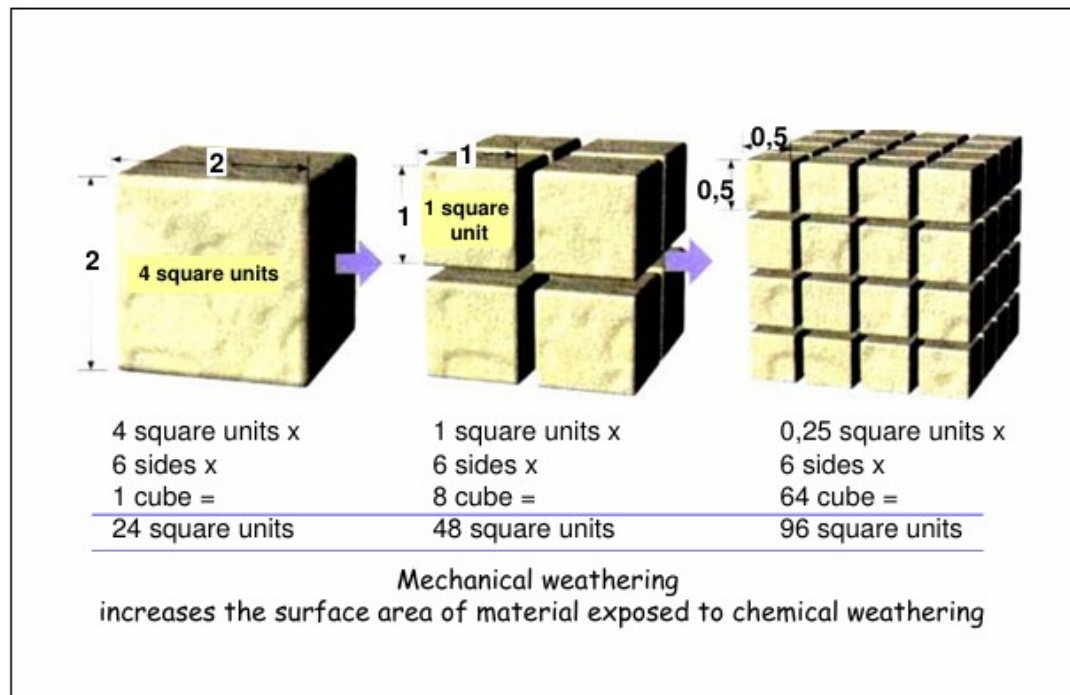


Figure 35. Augmentation de surface exposée aux actions chimiques et biologiques, due à l'action mécanique. (ESO, 2004)

La figure 35 montre le mécanisme selon lequel la surface rocheuse exposée à des actions chimiques et biologiques devient plus grande avec la succession des cycles de dégradations physiques.

4.2.2 Processus chimiques

L'eau joue un rôle fondamental dans toutes les réactions chimiques. La composition minéralogique de roches et de matériaux de construction détermine la nature des actions chimiques produites. La présence des fractures et des dégradations augmente l'ampleur de réactions chimiques. Selon Loughnan (1969), le vieillissement chimique est le résultat de trois processus qui peuvent intervenir simultanément :

- ❖ Rupture de structure et libération des éléments constitutants, comme les ions ou les molécules ;
- ❖ Mise en solution et transport d'une partie de ces éléments ;
- ❖ Réaction de la roche altérée avec les composants de l'atmosphère, avec la formation de nouveaux minéraux qui peuvent être dans un équilibre stable avec l'environnement.

Le vieillissement chimique est donc le résultat d'une série de réactions de surface entre la roche, l'atmosphère et l'eau. Toutes ces réactions dépendent essentiellement de la variation de

la température ambiante et du pH de l'eau. Le maintien de tels processus dans le temps dépend essentiellement des apports d'eau fraîche au système.

Nous pouvons distinguer plusieurs origines aux mécanismes de vieillissement chimique :

Cycles de cristallisation - dissolution :

Les cycles de cristallisation - dissolution dépendent de facteurs externes de l'eau, son pH et sa teneur en CO₂, de la température et des minéraux constituant la roche. Les recherches de Rauch et de White en 1970 sur des roches calcaires ont montré que l'altération de ce type de roche est souvent due à la succession de cycles de cristallisation et dissolution de sels dans les fissures, ce qui provoque une désagrégation mécanique granulaire de la roche. Ce phénomène est responsable de nombreux types d'altérations superficielles de roche (figure 36).

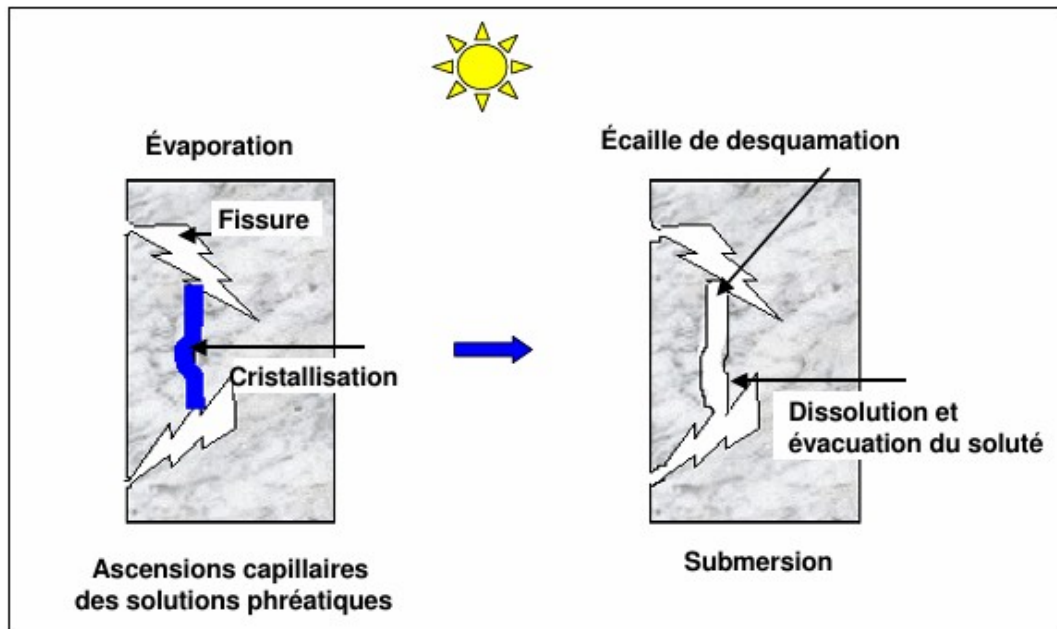


Figure 36. Schéma du processus d'écaillage par alternance de cycles dissolution / recristallisation (Martinet, 1992)

Ce phénomène s'active lors de la dessiccation d'une roche suite au départ d'eau à la surface.

La vapeur subit une migration par diffusion du cœur de la roche vers l'extérieur. La teneur en eau diminue progressivement et les sels cristallisent lorsque la concentration de saturation est dépassée. La croissance des cristaux entraîne de nouvelles contraintes mécaniques dans la roche (Chene et al., 1999). Lors de nouvelles vagues d'humidification, le phénomène de dissolution se développe entraînant une désagrégation par décohésion granulaire.

Selon Pauly (1990), du fait que la roche (quelle que soit l'échelle choisie) est un milieu hétérogène, les concentrations de sels dans la texture rocheuse ne sont pas homogènes. Le mécanisme de désagrégation se développe avec un léger surcreusement dans les zones les plus riches en sels.

Les hétérogénéités des minéraux et des fissures dans la roche soumise à un état de contrainte naturel conduisent à des hétérogénéités de contraintes : certaines zones peuvent être soumises

à des contraintes plus élevées que d'autres. Ce gradient de contraintes local se traduit par un gradient de potentiel chimique. Ce dernier occasionne une dissolution de la matière à un endroit donné et sa recristallisation ailleurs.

Par exemple, les roches carbonatées sont parmi les roches les plus sensibles aux phénomènes de dissolution (Sorgi et al., 2004) et nous rappelons que la plupart des pierres de maçonnerie sont issues de roches calcaires. Le processus de dissolution de ce type de roches peut être résumé par la formule suivante:



Dioxyde de carbone + eau + carbonate de calcium \Leftrightarrow cation de calcium + ion de carbonate d'hydrogène

Dans cette réaction chimique, le rôle du dioxyde de carbone est fondamental. Sa présence dépend de la présence de bactéries et de racines, de la température de la roche et de la décomposition organique.

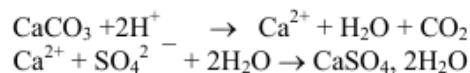
La conséquence mécanique directe des cycles de cristallisation-dissolution est le développement de vides et l'augmentation de la porosité de la roche. Même si le remplissage des vides par des éléments fins peut conférer à la roche une cohésion plus importante, un nouveau cycle de dissolution-cristallisation dans le temps peut conduire à la mobilisation de ces éléments et à une diminution des caractéristiques de résistance du matériau.

Oxydation :

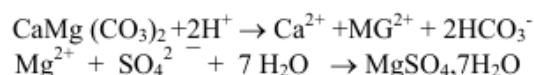
Le phénomène d'oxydation concerne les composés du fer souvent présent dans les silicates et les carbonates à l'état réduit Fe^{2+} . Parvenu dans l'hydrosphère oxygénée, il prend la forme oxydée Fe^{3+} . L'équilibre du réseau cristallin s'en trouve alors rompu (Millot, 1964).

Nous présentons comme exemple l'oxydation de la pyrite initiée par l'oxydation de la nappe phréatique. Ce processus se traduit généralement par la formation de sulfate ferreux et d'acide sulfurique. La formation d'acide sulfurique provoque la dissolution des espèces minérales voisines, surtout si elles sont carbonatées, les carbonates jouent alors le rôle de tampon. Ceci peut conduire à :

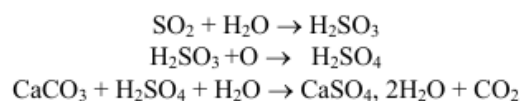
- Une décalcification avec néoformation de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) :



- Une dédolomitisation avec néoformation d'epsomite ($\text{MgSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$) :



On peut observer des phénomènes de décalcification même en absence de pyrite. Le dioxyde de soufre, présent dans l'atmosphère, peut réagir avec l'eau puis avec l'oxygène pour donner de l'acide sulfurique. Cet acide provoquera alors la dissolution des carbonates :



La néoformation de sulfates s'accompagne d'une importante augmentation de volume. Ce qui peut entraîner des fissures et l'éclatement de la roche.

4.2.3 Processus biologiques

Le développement d'une macro ou micro flore dans une roche entraîne une série de processus physiques et chimiques qui peuvent être à l'origine d'une dégradation mécanique du matériau.

Carrol (1970) explique les effets les plus marquants du développement de la macroflore :

- ❖ Fracturation de la roche favorisant la circulation d'eau et d'air ;
- ❖ La matière organique produit les acides qui contribuent à l'attaque chimique des roches ;
- ❖ Production de CO₂ et d'acide carbonique, ce qui implique une augmentation de l'acidité des eaux et de leur agressivité vis-à-vis de l'altération des roches.

Les différents groupes de microorganismes (bactéries, champignons, algues etc.) consomment le carbone et l'azote produit par les plantes et les animaux morts ainsi que l'oxygène présent dans le sol, en augmentant ainsi la concentration de CO₂.

4.3 Sensibilité des matériaux aux processus de vieillissement

Du fait de la diversité de structure minéralogique des roches, les différents types de roche présentent une sensibilité différente face aux différents processus de vieillissement. L'INERIS a proposé une hiérarchisation de la sensibilité au vieillissement en fonction de différents types de roche (Sorgi et al., 2004). Cette hiérarchisation donne une tendance assez globale mais des cas particuliers peuvent faire exception notamment en fonction de la minéralogie de la structure ou de la texture de la roche (tableau 16).

	Processus Physique			Processus Chimique		Processus Biologique
	Processus Thermiques	Processus Hydriques	Processus Mécaniques	Cristallisation Dissolution	Oxydation	
Gypse	+	+++	+++	+++	++	++
Craie	+	+++	+++	+++	++	+++
Calcaire	+	+++	++	+++	++	+++
Grès	+	+++	+++	++	++	++
Marne	+	+++	+++	-	+++	++
Argiles	+	+++	++	-	+++	++
Charbon	+++	++	+++	-	+	++
Gneiss	+++	+	++	-	+	-
Granite	+++	+	++	-	+	-
Basalte	+++	+	++	-	+	-
Marbre	++	+	++	-	+	-

(+++)= très sensible; (++)=moyennement sensible; (+)= peu sensible ; (-)= non sensible.

Tableau 16. Hiérarchisation de la sensibilité de différentes roches aux processus de vieillissement d'après Sorgi et al. (2004)

Du tableau 16, il ressort que les roches sédimentaires sont particulièrement sensibles aux processus hydriques et biologiques (tant sur le plan physique que sur le plan chimique), notamment dans le cas où la roche présente un réseau interconnecté de vides. Dans ce cas, les agents du vieillissement (en particulier l'eau) pourront plus facilement atteindre des parties profondes de la roche, entraînant des dégradations importantes. La faible sensibilité des roches sédimentaires au processus thermique est expliquée par sa faible conductivité thermique.

Par contre les roches volcaniques et métamorphiques présentent une tendance opposée. Ce type de roches présente une texture minéralogique très stable, caractérisée par une infime microporosité. Ainsi, seulement les processus hydriques impliquant un effet mécanique sur la macroporosité produisent des réelles conséquences sur leur vieillissement. En revanche, grâce à leur structure homogène, les roches volcaniques et métamorphiques sont plus sensibles que les roches sédimentaires aux processus thermiques.

4.4 Conséquences mécaniques du vieillissement des roches

Castellanza (2002) interprète le vieillissement d'un matériau par un affaiblissement généralisé des propriétés mécaniques du matériel original, avec le temps. Ainsi, les dégradations peuvent transformer une roche dure comme le granite en sol incohérent.

Les travaux de Chigira et Omay (1999) sur la stabilité des pentes montrent que les processus du vieillissement agissant sur la surface d'une masse rocheuse induisent aussi une réduction remarquable de la résistance au cisaillement du terrain.

Plus généralement, la société internationale de Géologie (Anon, 1995) donne une classification descriptive de roches dégradées dans le temps. Cette classification hiérarchique repose sur des observations morphologiques de roches et des investigations mécaniques. Le tableau 17 récapitule les caractéristiques principales de cette classification.

Catégorie	Description	Caractéristiques
I	Roche fraîche	Aucun changement évident
II	Légèrement dégradé	Décoloration légère et affaiblissement
III	Modérément dégradé	Affaiblissement et décoloration considérables
IV	Fortement dégradé	Grands morceaux cassés à la main
V	Complètement dégradé	Considérablement affaiblie même si la texture originale est préservée
VI	Sol résiduel	Mélange de sol sans texture rocheuse

Tableau 17. Caractérisation de vieillissement-dégradation, catégories modifiées (Anon 1995)

La classification d'Anon propose donc une échelle à six degrés de dégradation de roches entre le niveau de la roche intacte et celui du sol résiduel.

Dans l'objectif d'estimer les impacts mécaniques du phénomène d'hydratation, Wiid (1967) et Watelet (1996) ont montré à travers une série d'essais de compression uniaxiale sur différents types des roches en fonction du degré de saturation (figure 37), que l'augmentation du degré de saturation de la roche entraîne une diminution de ses propriétés mécaniques (résistance à la compression en particulier).

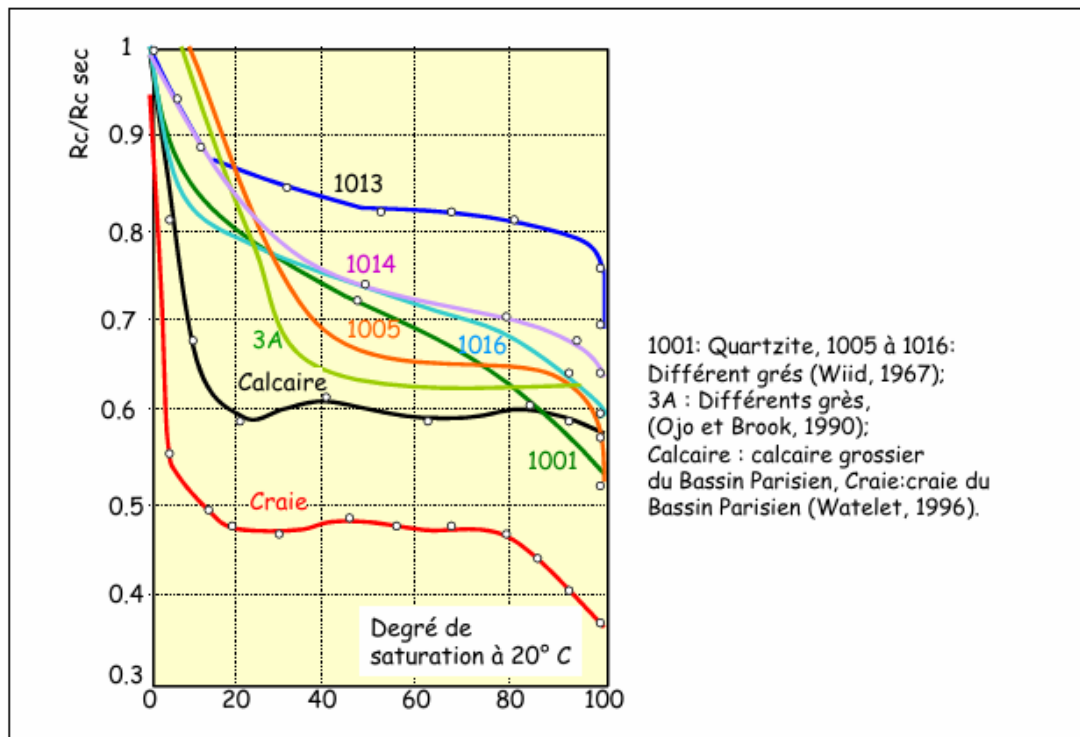


Figure 37. Résistance à la compression en fonction du degré de saturation (Wiid,1967 et Watelet,1996)

Le tableau 18 donne quelques précisions à ce sujet.

Échantillon	Chute de RC entre l'état sec et le degré de saturation 75%
Quartzite	35%
Grès	19% -38%
Calcaire	40% note : le calcaire est une pierre souvent utilisée dans les tunnels maçonnés
Craie	53%

Tableau 18. Chute de la résistance à la compression en fonction du degré de saturation

Même si cette étude a été menée dans des conditions très spécifiques sur des échantillons précis, il apparaît clairement que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du degré de saturation.

Les processus du vieillissement peuvent modifier le régime de pores dans la roche, ce qui entraîne une évolution du degré de saturation en fonction des changements liés au régime d'eau. Parailleurs, l'évolution du degré de saturation engendre une modification de la masse volumique du matériau concerné (Baynes et Derman, 1978).

Hencher, Ebuk, Abrams et Lumsden (1990), Stead, Coggan et Howe (2000) ont étudié également les paramètres exprimant la résistance mécanique de la roche (comme la résistance à la compression, le module de Young, le coefficient de Poisson et la résistance à la traction) ainsi que d'autres paramètres tels que la vitesse de pénétration des ondes ultrasoniques et la perméabilité de différents types de roches dégradées. Ces paramètres subissent des évolutions en fonction de temps. L'ampleur des variations des paramètres dépend de la nature de la roche, du type de processus de vieillissement et de leurs fréquences en fonction de temps.

Dans le tableau 19, nous classons les principaux paramètres rocheux variables en fonction du temps sous l'influence des processus de vieillissement et leur tendance d'évolution.

Abréviation	Paramètre	Tendance
E	Module de Young	-
ν	Coefficient de Poisson	+
Rc	Résistance à la compression	-
R	Résistance à la traction	-
C	Cohésion	-
ρ	Masse volumique	+ -
ϕ	Angle de frottement	-
τ	Résistance au cisaillement	-
P	Porosité	+
Sr	Degré de saturation	+ -
Pr	Perméabilité	+
+ : Tendance à augmenter - : Tendance à diminuer		

Tableau 19. Paramètres mécaniques variables en fonction de temps

Irfan et Dearman (1978) ont testé la résistance à la compression du granite correspondant à différents stades de dégradation. Le tableau 20 évoque les principaux résultats obtenus.

tremblements de terre, de tirs de mines et de vibrations des moyens de transport. Les tunnels situés à faible profondeur sont également sensibles aux projets de construction civils comme les tunnels voisins, les ponts, les grands bâtiments, les routes etc.

Le développement d'un ou plusieurs de ces facteurs dans le temps mène à des modifications de l'état de contraintes dans les tunnels concernés puis à des déformations de plusieurs types dus à différents modes ou mécanismes de déformations.

4.9 Mécanismes de déformation de tunnels

Les tunnels subissent plusieurs déformations dues à différents modes de changement de la distribution du champ de contraintes autour du tunnel. L'analyse du système de contraintes autour des tunnels permet d'identifier plusieurs mécanismes de déformations des tunnels, (Kerisel, 1975, Peck, 1969).

Déformation due aux forces horizontales asymétriques

Dans le cas des tunnels situés à proximité d'une vallée, une modification de la pente par la construction d'un autre ouvrage (une route par exemple) ou par un éboulement important peut engendrer une déformation du tunnel, la déformation est souvent due aux forces horizontales asymétriques. Les forces horizontales sont clairement plus grandes du côté amont que du côté de vallée, la distribution des contraintes provoque la déformation du tunnel, souvent aggravée par un pivotement général dû au tassement des fondations du côté le plus bas, figure 51.

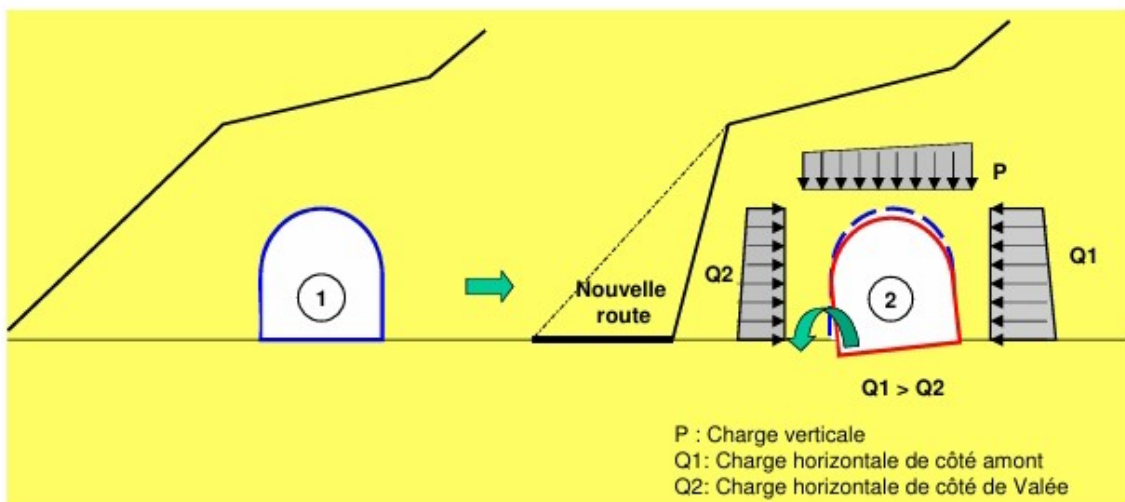


Figure 51. Déformation due aux forces horizontales asymétriques

Déformation due au manque de pression passive horizontale

Ce type de déformation se produit dans les tunnels et les ouvrages souterrains creusés dans des sols et des terrains meubles. Les terrains encaissants subissent des altérations importantes souvent dues à une charge supplémentaire au-dessus du tunnel, par exemple à l'implantation de nouveaux ouvrages, un remblai etc, figure 52.

Les dégradations lentes peuvent, à long terme, modifier les conditions d'équilibre de l'ouvrage à partir de plusieurs mécanismes dont nous citons les principaux :

- ❖ Entraînement d'éléments fins avec modifications des vides dans les terrains meubles ;
- ❖ Diminution des caractéristiques mécaniques de certaines roches et des argiles quand leur teneur en eau augmente ;
- ❖ Gonflement de terrains par hydratation (cas de certaines argiles, roches contenant de la serpentine, de l'anhydrite..). Ces gonflements peuvent produire des pressions supplémentaires et souvent dissymétriques de 10 à 100 tonnes par m² et des déformations importantes (Dartevél, 2001) ;
- ❖ Dissolution (affectant les roches carbonatées, le gypse) ;
- ❖ Action chimique (oxydation de sulfures par l'air, altération des minéraux de roches granitiques ou cristallophylliennes).

La figure 50 résume l'action de l'évolution du terrain encaissant qui peut conduire à augmenter les pressions sur le soutènement en maçonnerie, ce qui entraîne la déformation de la structure en maçonnerie. Les déformations se développent au cours du temps menant à la rupture du soutènement.

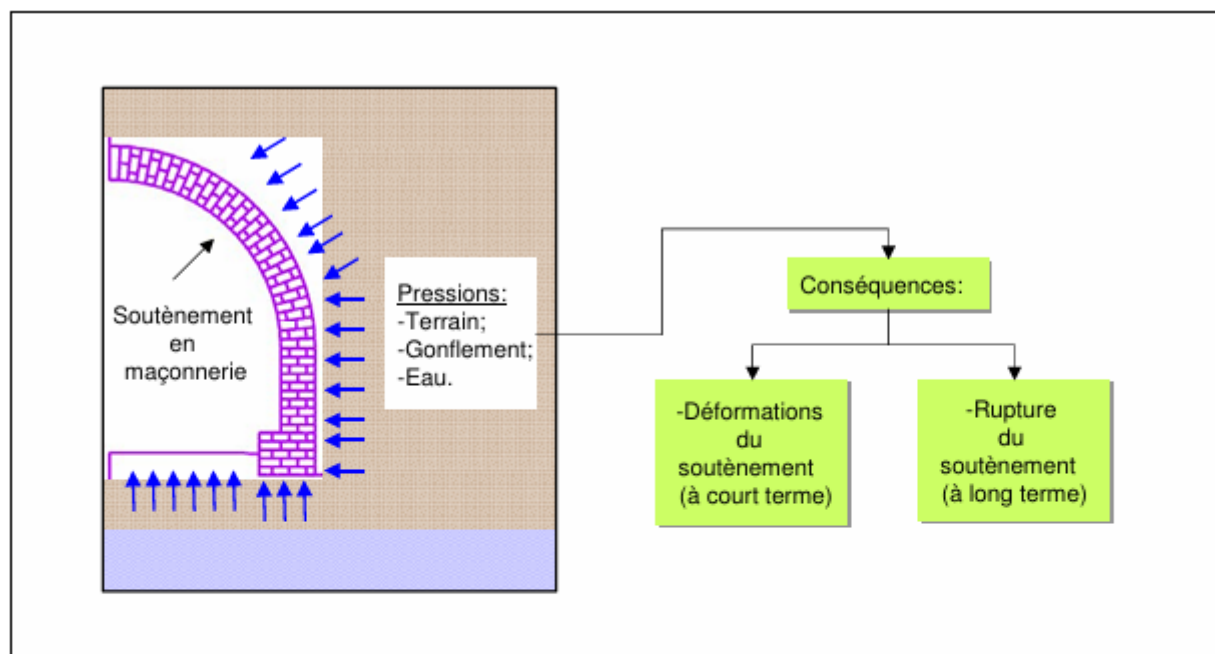


Figure 50. Action de l'évolution du terrain encaissant sur le soutènement en maçonnerie

Autres actions

Quand le tunnel est creusé dans un milieu me connu, la présence de cavités naturelles, de cavités de constructions ou de cavités de dissolution modifie le comportement de l'ouvrage au cours du temps. Les tunnels peuvent subir également des effets dynamiques à cause de

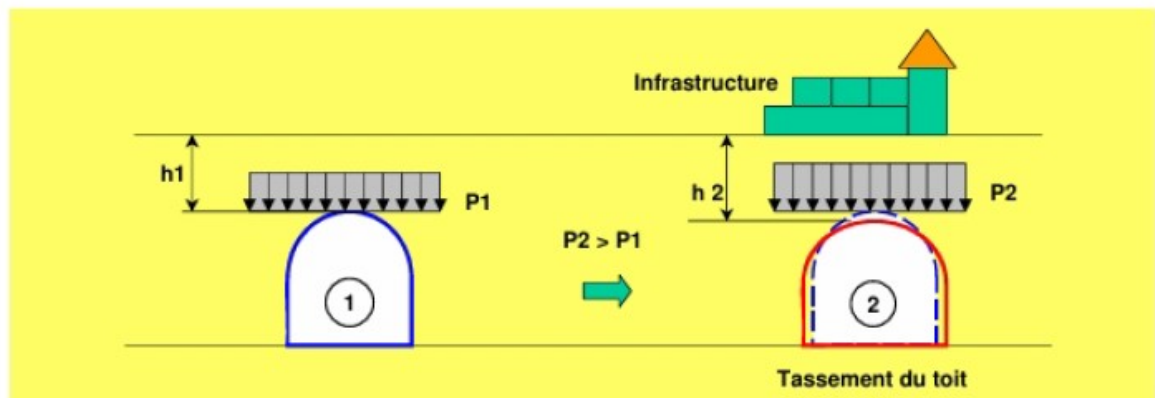


Figure 52. Déformation due au manque de pression passive horizontale

Déformation due aux pressions horizontales (latérales) et verticales excessives

Ce cas est un exemple typique d'un terrain encaissant gonflant, les conséquences sont l'élévation de voûte et le soulèvement de radier, figure 53, 54.

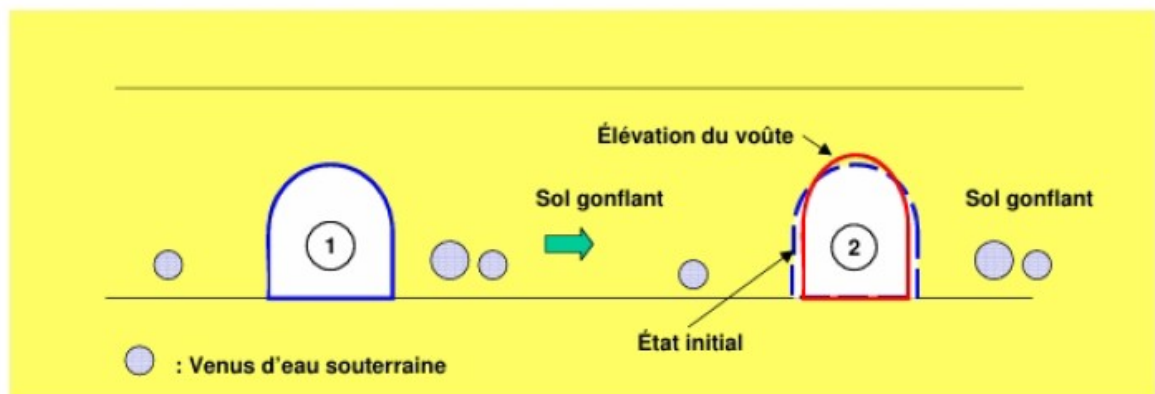


Figure 53. Déformation due aux pressions latérales excessives

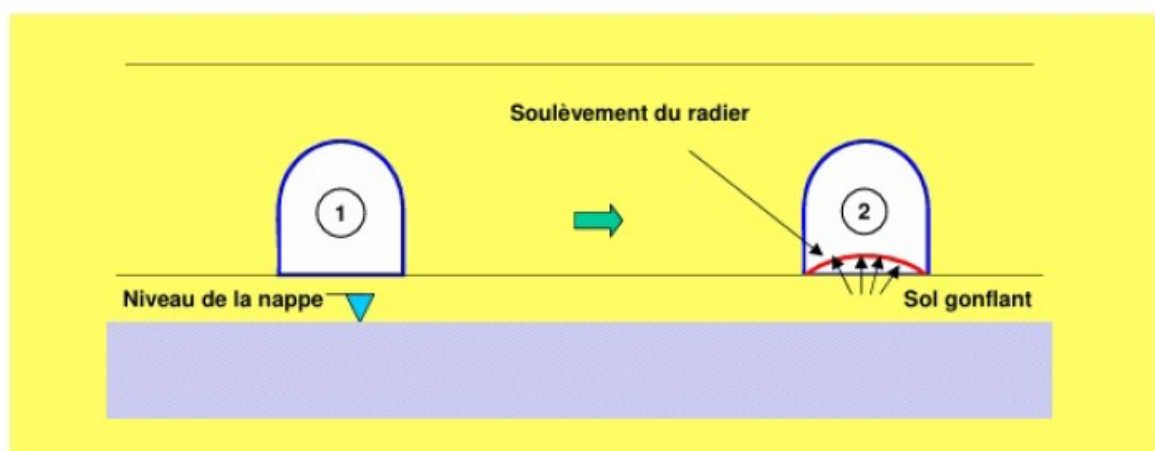


Figure 54. Déformation due aux pressions verticales excessives