

Traitements et améliorations des sols

JST DU 05/04/2023

Durabilité – Pérennité

Michel CHOPIN KF International SA

JST du 05/04/2023

Journée parrainée par KELLER:



1. Procédés et spécificités

Le mode d'amélioration de sols diffère selon les procédés, mais le principe demeure : il consiste à réduire l'indice de vides

- a) Réduire l'indice de vide par malaxage in situ ou densification, conduisant ainsi à augmenter la résistance au cisaillement.
- b) Réduire l'indice de vide par incorporation de matériaux (matrice cimentaire ou autre) afin d'augmenter la cohésion et de fait, la résistance au cisaillement.

Dans les deux cas la réduction de l'indice de vide, conduit à une diminution significative de la perméabilité du milieu granulaire ou de la conductivité hydraulique, dans le cas de porosité de fissures. La diminution de l'indice de vide conduit à un accroissement de la densité et du module de déformabilité.

→ La progression du taux d'incorporation conduit à une amélioration mécanique, qui évolue vers une réduction de la perméabilité, conduisant à un étanchement relatif.

Ce processus simple est opérationnel dans le cas des procédés fonctionnant réarrangement granulaire ou par incorporation in situ (Soil mixing), ou par semi substitution (Jet Grouting), mais beaucoup plus difficile à atteindre dans le cas d'incorporation par injection, car l'incorporation est toutes choses égale par ailleurs, dépendante des contraintes géostatiques s'exerçant au point d'injection.

Cet aléa inhérent au processus de diffusion des matériaux d'injection, imprégnation ou claquage imprégnation, complexifie l'évaluation qualitative de l'amélioration apportée et de la **pérennité du traitement**.

2. Facteurs de risques

Plusieurs facteurs de risques peuvent conduire à une détérioration des performances atteintes lors de l'amélioration des sols

- a) **Altération des matériaux d'apport en raison des propriétés des sols traités (présences d'éléments inhibiteurs de prise de liants hydrauliques).**
- b) **Altération des matériaux d'apport par lixiviation (destruction de la chaux (clinker) du ciment).**
- c) **Altération de la compacité des sols traités par érosion régressive (entraînement d'une fraction granulaire ERINOH) ou contrainte mécanique (fluage),**
- a) **Altération du milieu traité par dissolution des formations en présence (Dissolution des masses du gypse M&C et SB).**

4.Types d'ouvrages et exigences fonctionnelles

Les exigences fonctionnelles en termes de durabilité ou de pérennité dépendent de la nature des ouvrages et de la destination des travaux d'amélioration de sol.

Ainsi distingue-t-on:

Les travaux provisoires, dont la durabilité, doit atteindre quelques mois ou quelques années, à l'échelle du programme d'aménagement des sites.

Les travaux définitifs, dont la pérennité, doit être au moins égale à la durée fonctionnelle de l'ouvrage

4.1. Les aménagements hydrauliques, barrages – voutes et digues

Les dispositions constructives utilisées pour la réalisation des ouvrages et notamment le choix des matériaux constitutifs des coupures étanches (argile compactée et écrans de types slurry bento-ciment ou sol bentonite) avec voiles d'injection et de drainage.

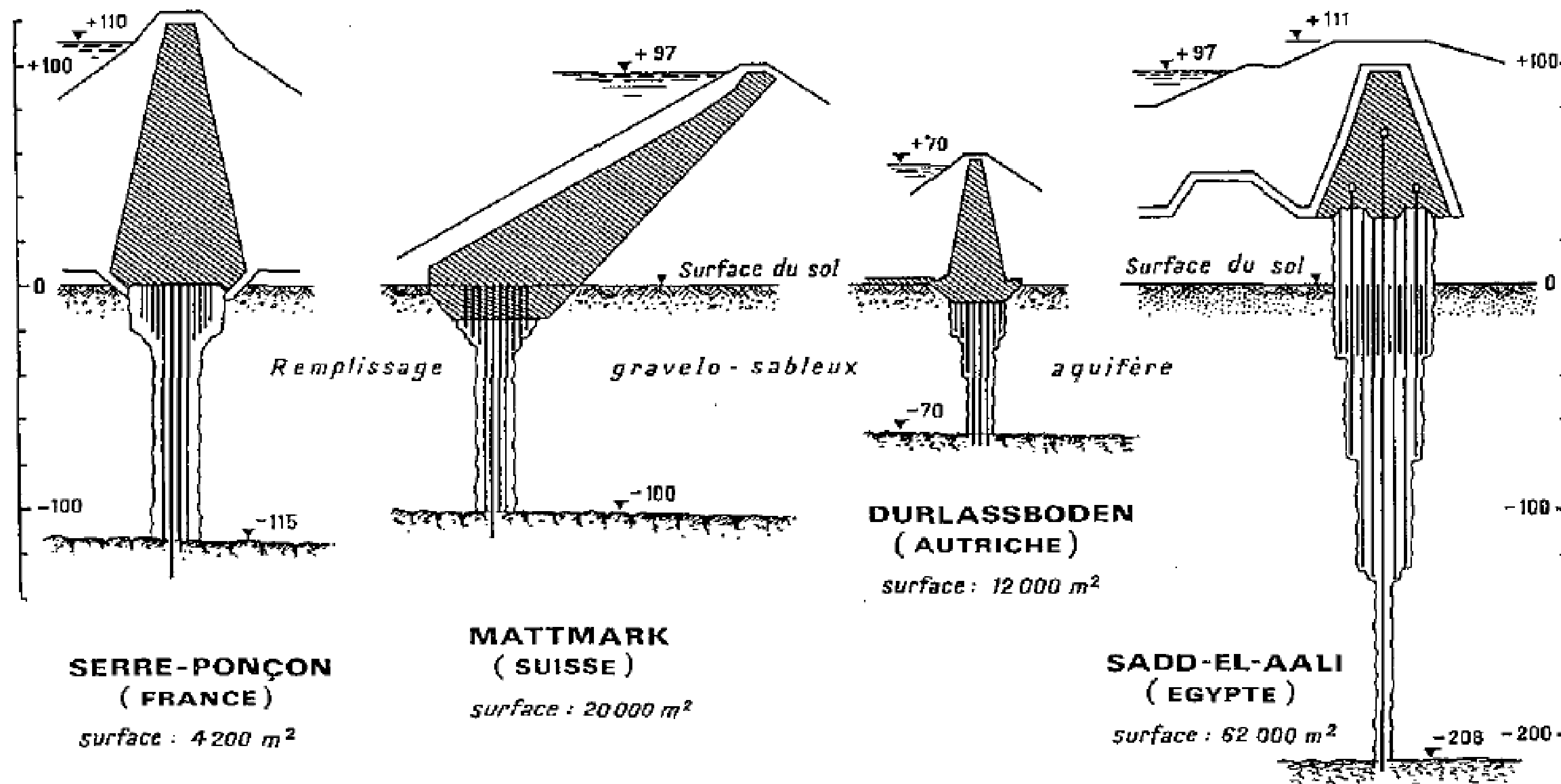
Ces travaux font l'objet de règles de l'art et d'une normalisation régulant à la fois le design et le mode de réalisation des différents procédés.

L'antériorité des projets réalisés à ce jour qu'il s'agisse de coupures étanches ou de voiles d'injection permet de disposer d'un retour d'expérience >> 50 ans.



4.1. Les aménagements hydrauliques, barrages – voutes et digues

Parmi ces ouvrages figure le barrage de Serre Ponçon EDF, dont le corps de digue en remblai est complété d'un écran d'étanchéité multi linéaire injecté à l'aide coulis d'argile-ciment Le monitoring, de cet ouvrage achevé en 1959 et dont l'écran injecté date de 1951-1955 confirme la pérennité de l'écran injecté après 75 ans,



4.1. Les aménagements hydrauliques, barrages – voutes et digues

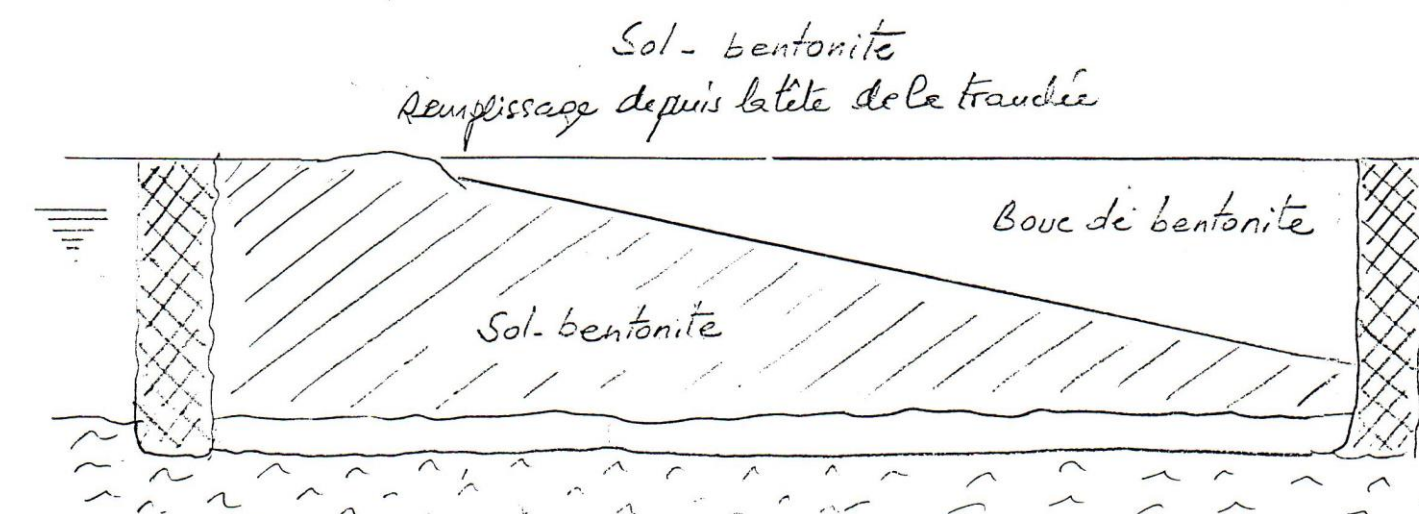
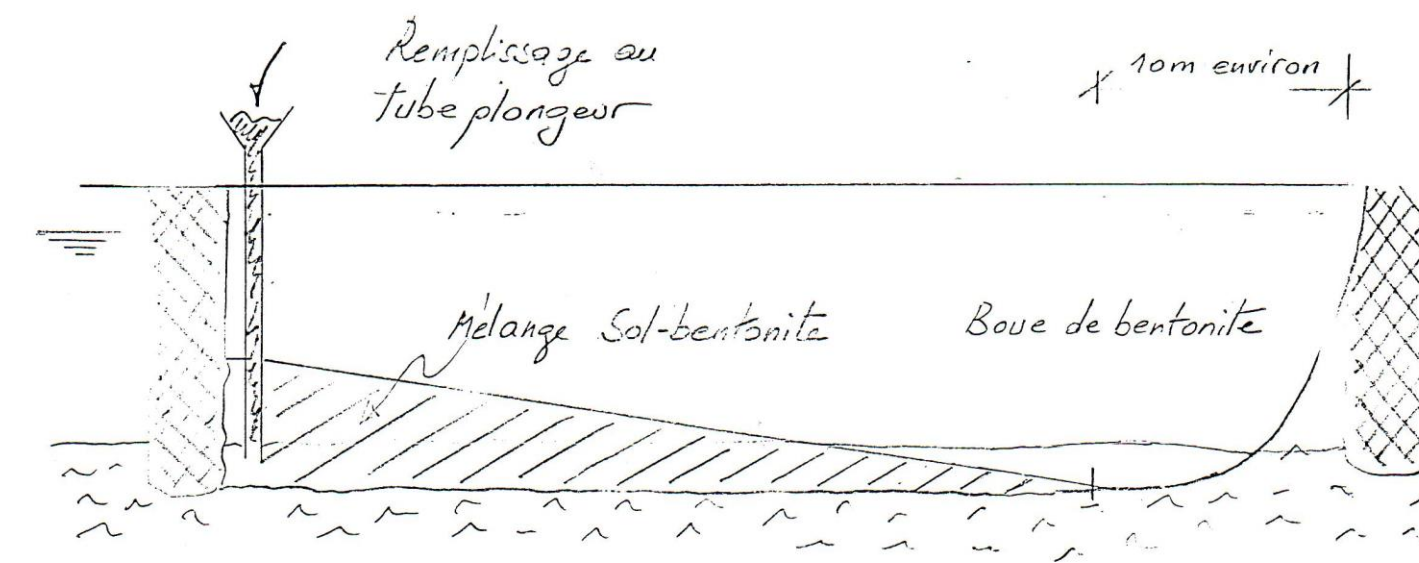
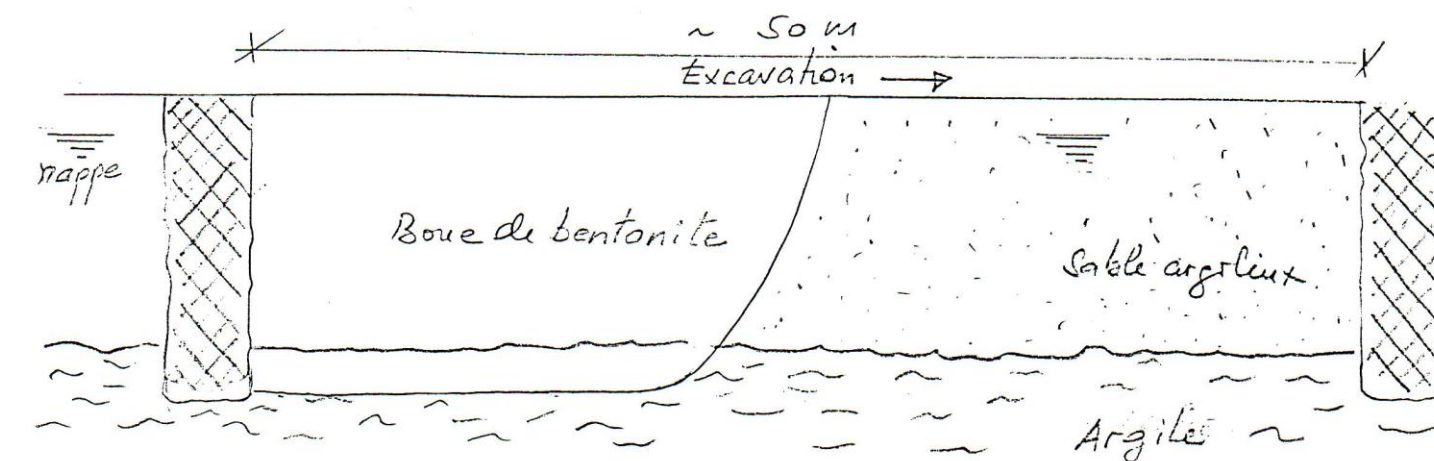
Au regard du nombre des ouvrages construits, les désordres conduisant à la rupture d'ouvrages hydraulique sont peu nombreux.



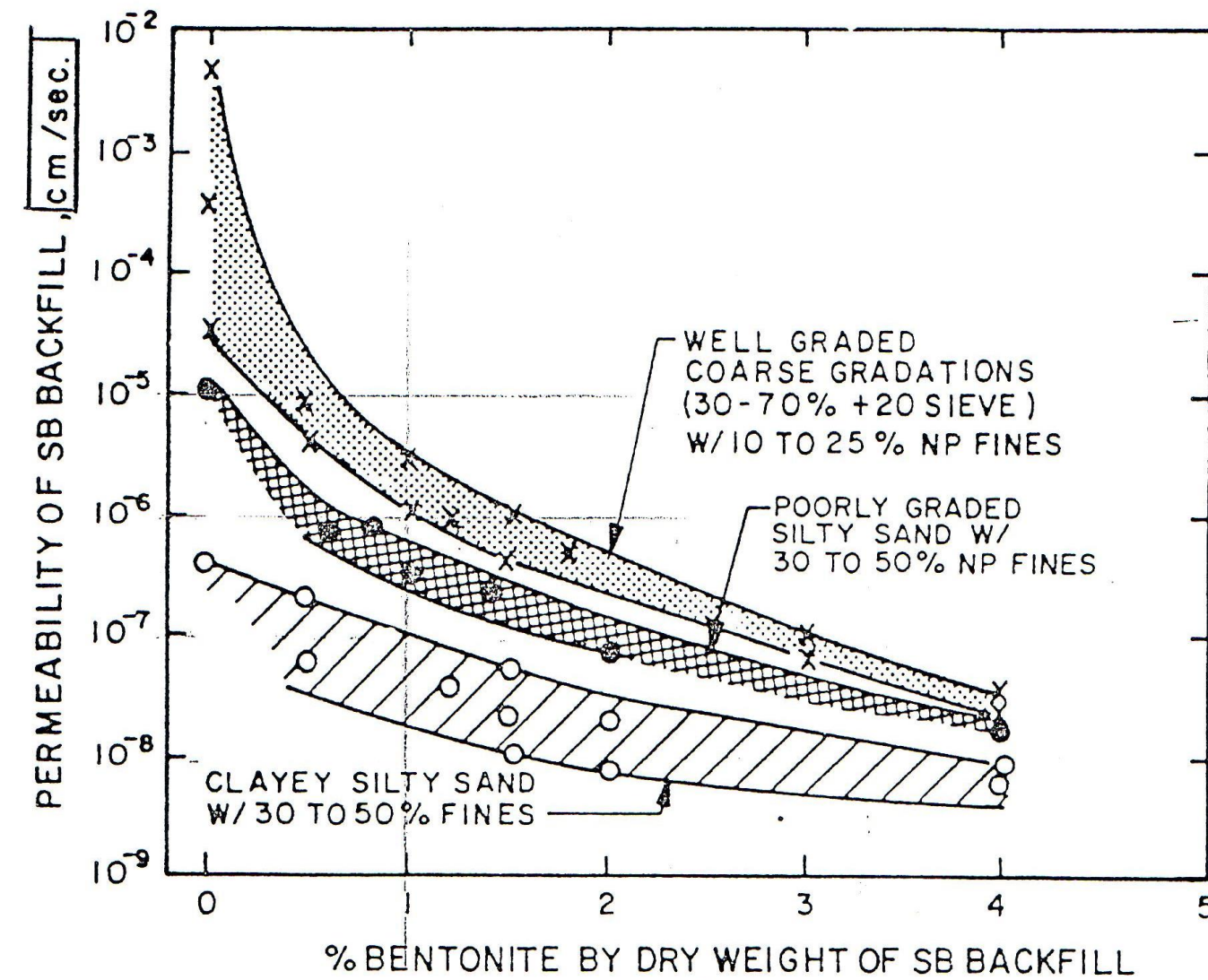
Les conditions de développement ou non de la rupture ont fait l'objet d'un projet de recherche national (ERINOH 2002-12) comportant une étude exhaustive des causes et origines recensées au niveau mondial, assortie de modélisation des séquences de développement du phénomène.

4.2. Les ouvrages d'aménagement industriels - Grandes fouilles - Coupures étanches & voiles d'étanchéité.

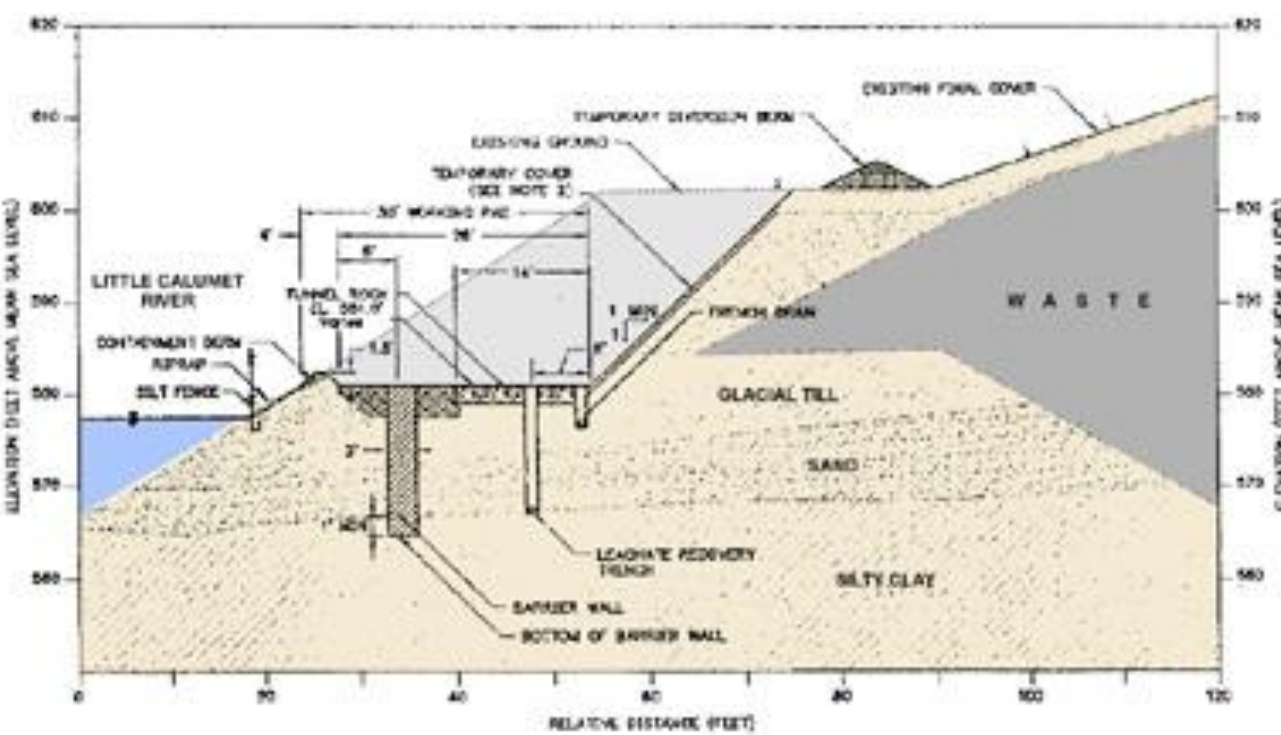
TEMPE Land Remediation - Waste Management SYDNEY Airport AU - Slurry trench Permanent Cut off (soil-bentonite slurry wall)



4.2. Les ouvrages d'aménagement industriels - Grandes fouilles - Coupures étanches & voiles d'étanchéité.



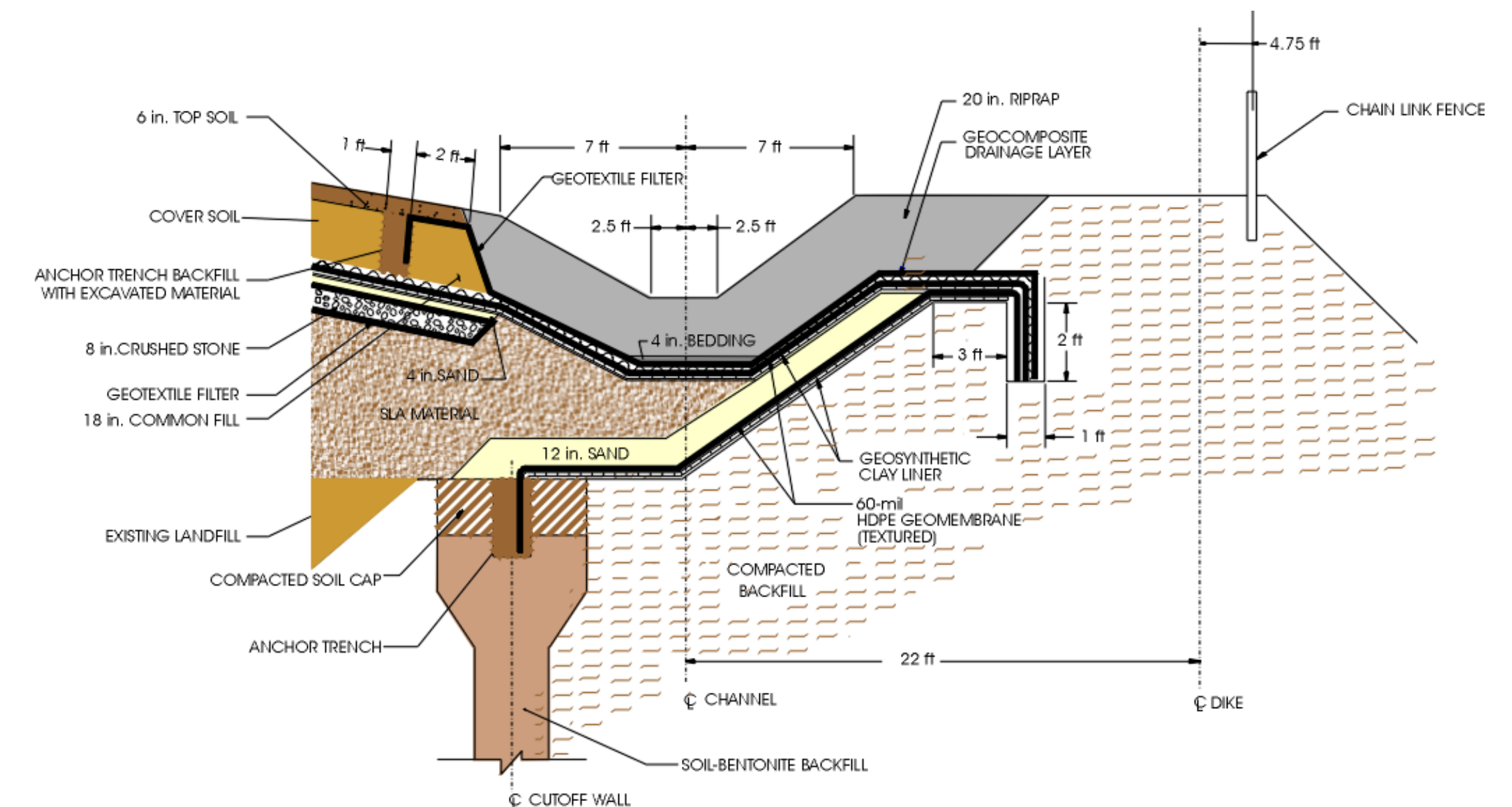
- RELATIONSHIP BETWEEN PERMEABILITY AND QUANTITY OF BENTONITE ADDED TO SB BACKFILL



138th Street Facility is an inactive municipal solid waste landfill Chicago, Illinois
Slurry trench - Permanent cut off

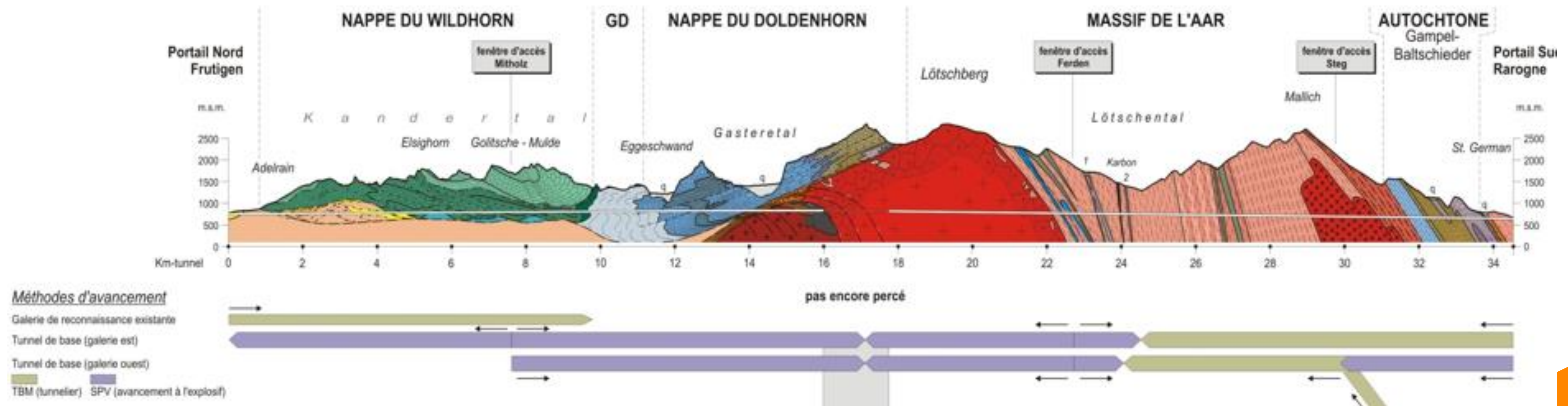
4.2. Les ouvrages d'aménagement industriels - Grandes fouilles - Coupures étanches & voiles d'étanchéité.

The Sinclair Refinery Superfund Site in Wellsville, New York.

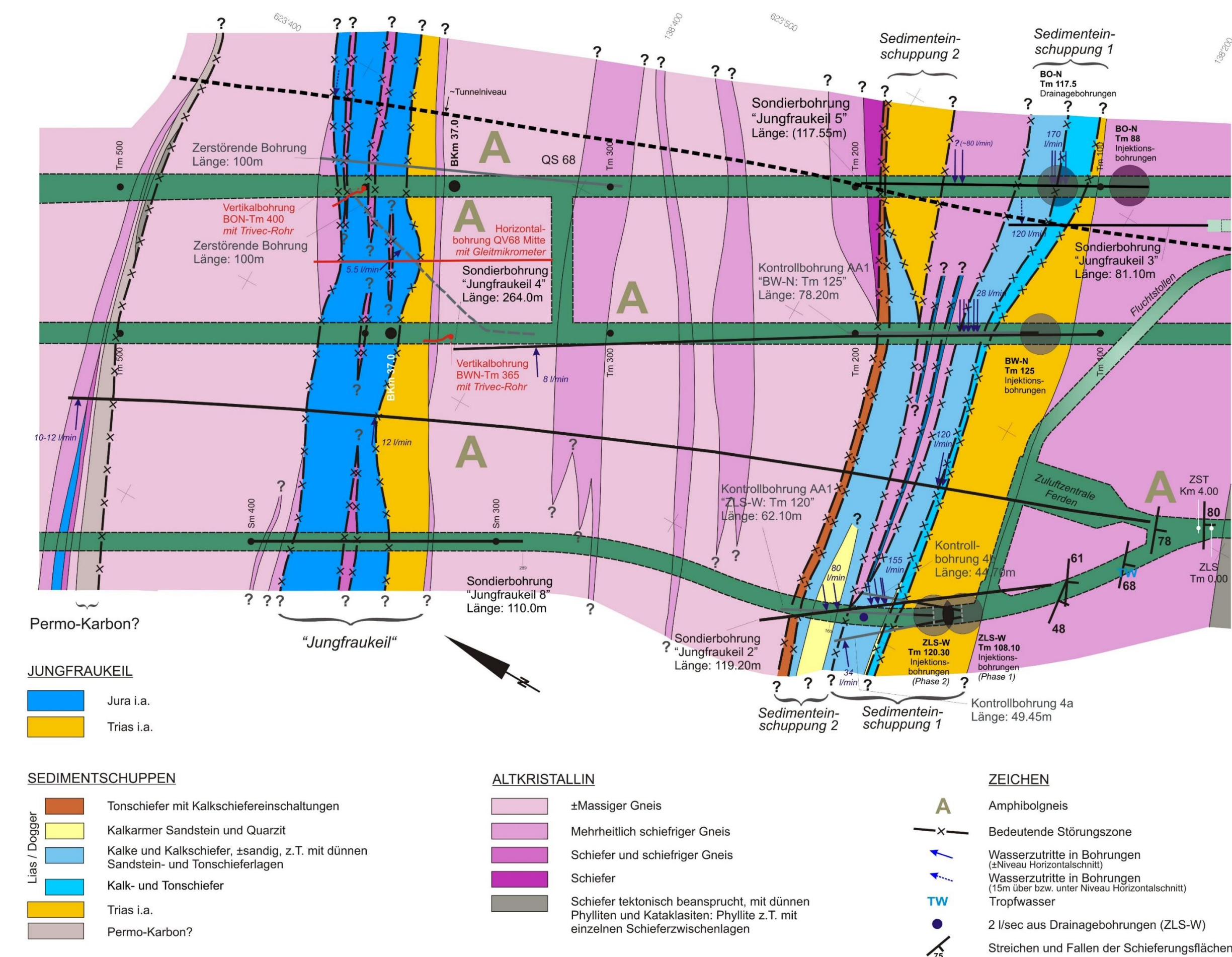


4.3. Les ouvrages de tunnels profonds présentant des conditions hydrostatiques extrêmes et permanentes

Depuis ces vingt dernières années, plusieurs ouvrages de tunnel profonds ont été réalisés et à cet effet des travaux de traitement de sols et de roches ont été réalisés pour en faciliter la construction ou répondre à des problématiques spécifiques.



4.3. Les ouvrages de tunnels profonds présentant des conditions hydrostatiques extrêmes et permanentes

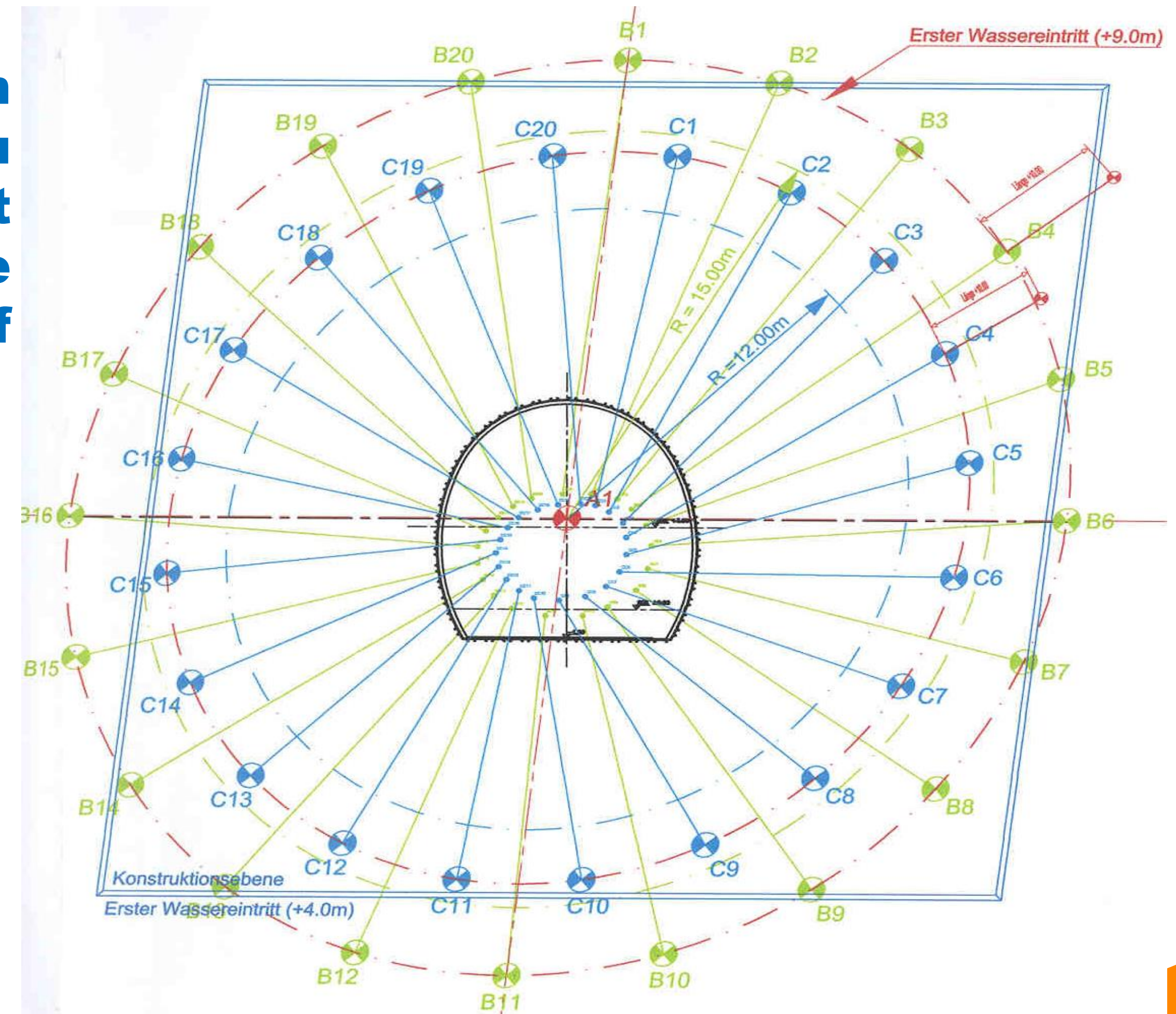


Parmi ces travaux singuliers, le traitement de l'accident géologique de la Jungfrau, (2000/02) tunnel du Lötschberg sud ApItransit CH,

4.3. Les ouvrages de tunnels profonds présentant des conditions hydrostatiques extrêmes et permanentes

Ces travaux constitue un exemple de réduction pérenne de la conductivité hydraulique du massif rocheux, au passage des deux tubes et galeries aux interfaces du Trias sous une charge statique de 11 Mpa et un objectif d'exhaure de 2lit/s global, en ouvrages drainés.

Ces exigences techniques imposées à la construction, en raison d'exploitation thermique en surface ont été obtenues grâce à la mise en œuvre d'un projet d'injection atypique et l'usage de matériaux à base de nano-silices, dont les performances demeurent en l'état.



4.4. Les ouvrages courants, tunnels, tranchées couvertes, excavations, situés au niveau de la nappe.

Ces ouvrages courants, qui justifient des travaux d'amélioration de sol temporaires, sont fréquemment traités par injection en raison de la nature des terrains en présence (formations alluvionnaires) sans nécessairement considérer les conditions de faisabilité et limites du procédé.

Les travaux d'amélioration de sol par injection constituent une technique efficace utilisée couramment comme moyen palliatif provisoires pour terrassement sous nappe,

Ces travaux qui peuvent comporter une ou deux phases peuvent présenter une efficience et une durabilité variable en fonction du contexte. Deux conditions sont nécessaires pour atteindre un résultat abouti:

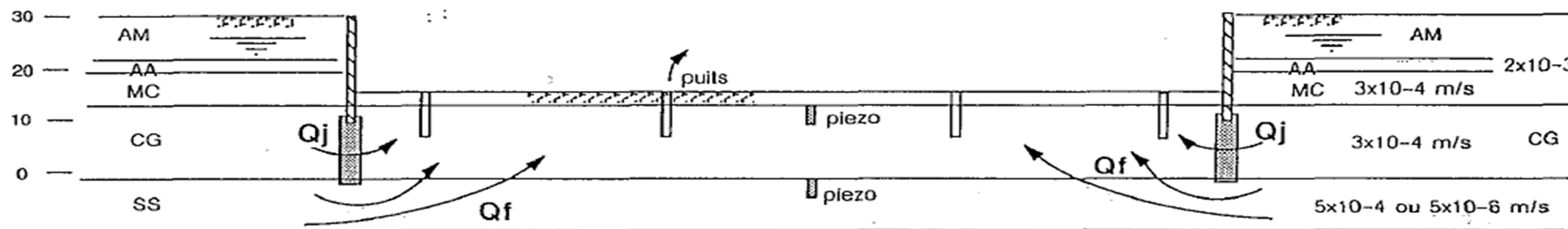
- a) Employer des matériaux appropriés à la granularité des terrains à traiter**
- b) Respecter des critères d'injection compatibles avec les contraintes géostatiques in situ**

Ainsi, la durabilité du traitement limitée généralement à quelques mois voire une année peut se révéler défaillante et ceci en raison de l'inadéquation de la méthode au contexte.

4.4. Les ouvrages courants, tunnels, tranchées couvertes, excavations, situés au niveau de la nappe.

L'injection permettant de réduire efficacement la conductivité hydraulique des formations cohérentes et des roches tendres constitue une alternative crédible à l'approfondissement des écrans d'étanchéité

L'écran injecté constitue une option attractive dans le Lutécien (en l'absence de discontinuité majeure traversant la fouille). De nombreuses références ont confirmé l'efficacité de ce type d'ouvrage en termes de maîtrise des conditions hydrauliques



SIAAP Station de pompage - Colombes 92, Excavations # 60 000 m²

SYCTOM Issy Moulineaux 92, Ecrans # 80 000 m²

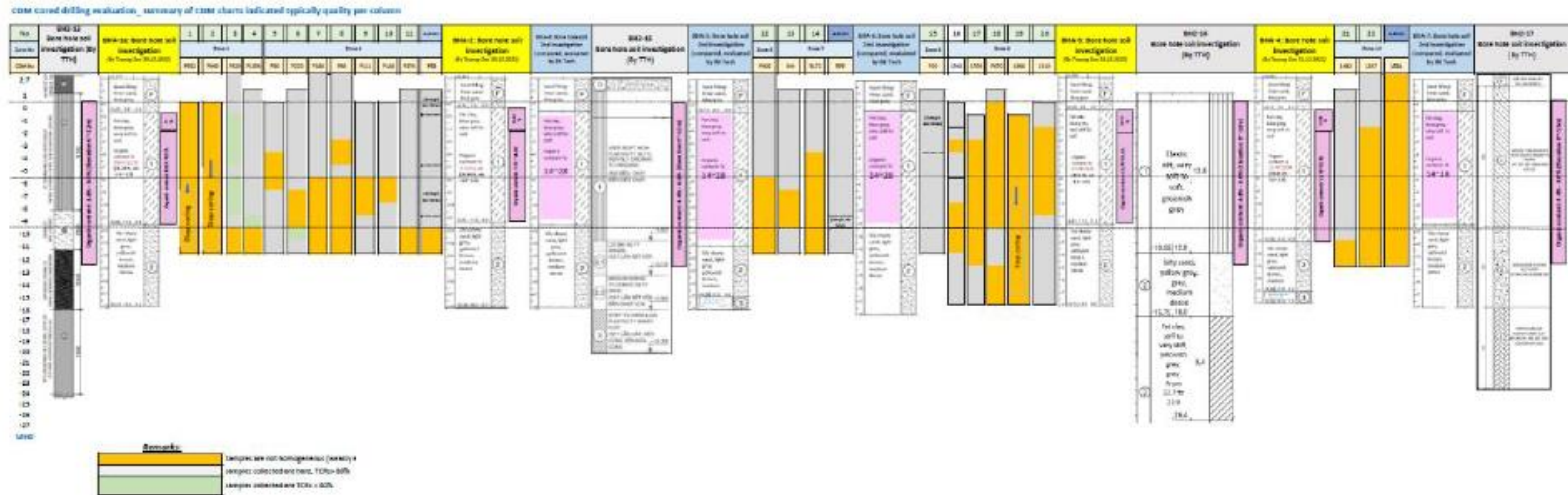
5. Conditions limites d'exécution – Conduisant à l'échec

Quel que soit le procédé d'amélioration de sol employé, le non respect des règles de l'art et/ou des normes régissant l'exécution des travaux, conduit à une amélioration incomplète voire inexistante, aggravant le facteur d'hétérogénéité souvent à l'origine d'aléa de traitement.

Pour illustration voici quelques exemples de défaut ou d'absence de durabilité constatés dans le domaine de l'amélioration de sol:

5.1. Inclusions – Soil Mixing - Jet Grouting

a) Soil Mixing - Constat – Traitement discontinu – Causes - Design et méthode inappropriée – Argiles / # tourbes



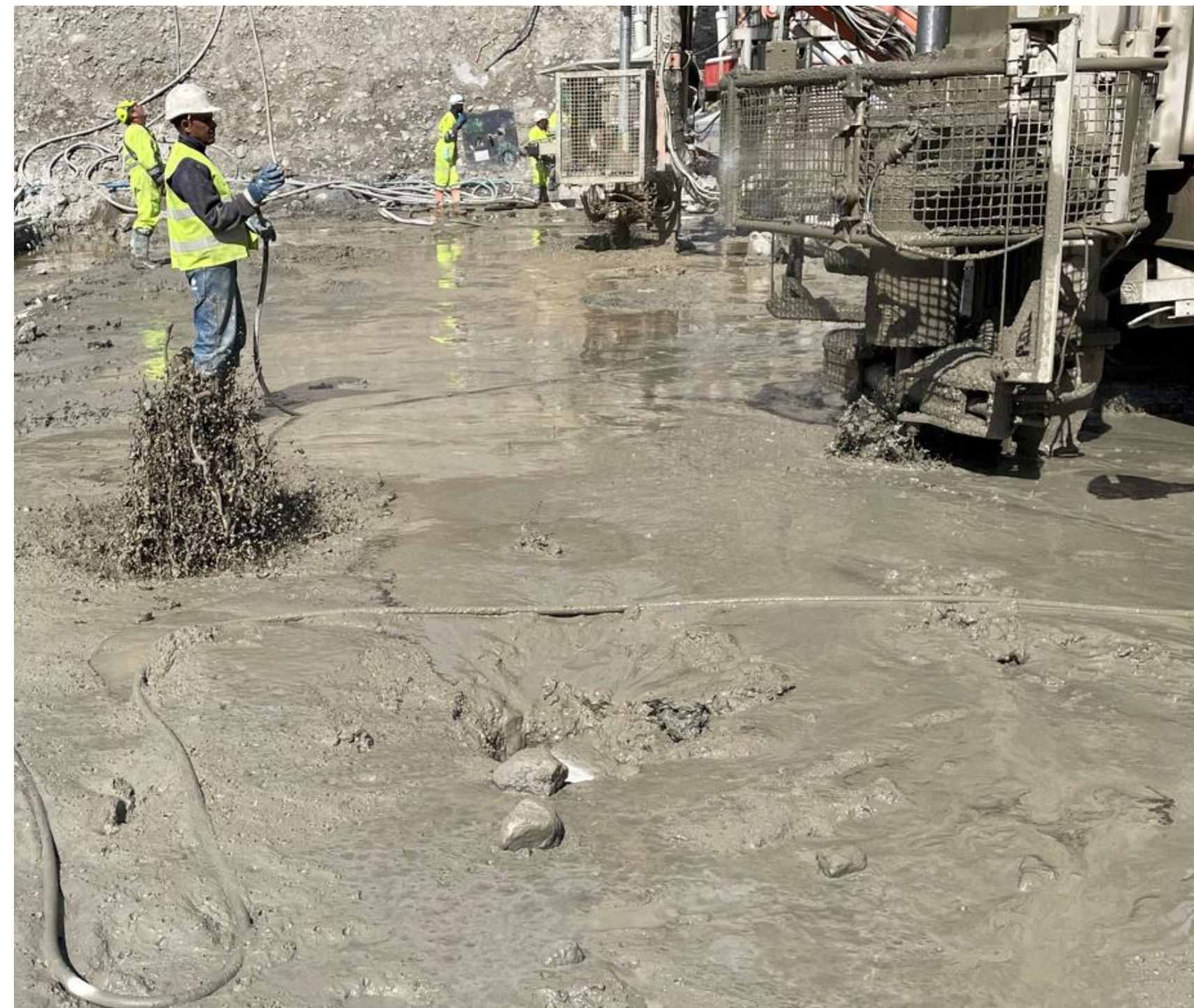
Défaut d'homogénéité 70% - Défaut de résistance objectif 40%

5.1. Inclusions – Soil Mixing - Jet Grouting

b) Jet Grouting –

Constat - 1 Intrusion aquifère et matériaux – Causes – Design (traitement point triple) – Exécution - Choix de l'énergie

Constat – 2 Retour Spoil aléatoire et dispersion – Défaut de contrôle et maîtrise du procédé – Cause diamètre forage incompatible (f) Q



5.2 Amélioration de sol par injection

a) Injection à proximité de la surface - Constat 1 - absence de pression d'injection constat 2 soulèvements ouvrages de surface – Cause : non respect des critères d'imprégnation (Ajustement Q f Sigma h/v) – Claquage et dispersion des matériaux mode claquage.

La relation (Qc) est applicable en règle générale pour limiter la formation de claquages non contrôlés et néfastes à la qualité du traitement. A toute pression de claquage correspond un débit critique, dont on peut déterminer la valeur d'après l'équation suivante :

$$P = dh(1 + \sin\Phi)v$$

$$Q = \frac{2\pi k_e d h (1 + \sin\Phi) v}{\omega \eta \ln R/r}$$

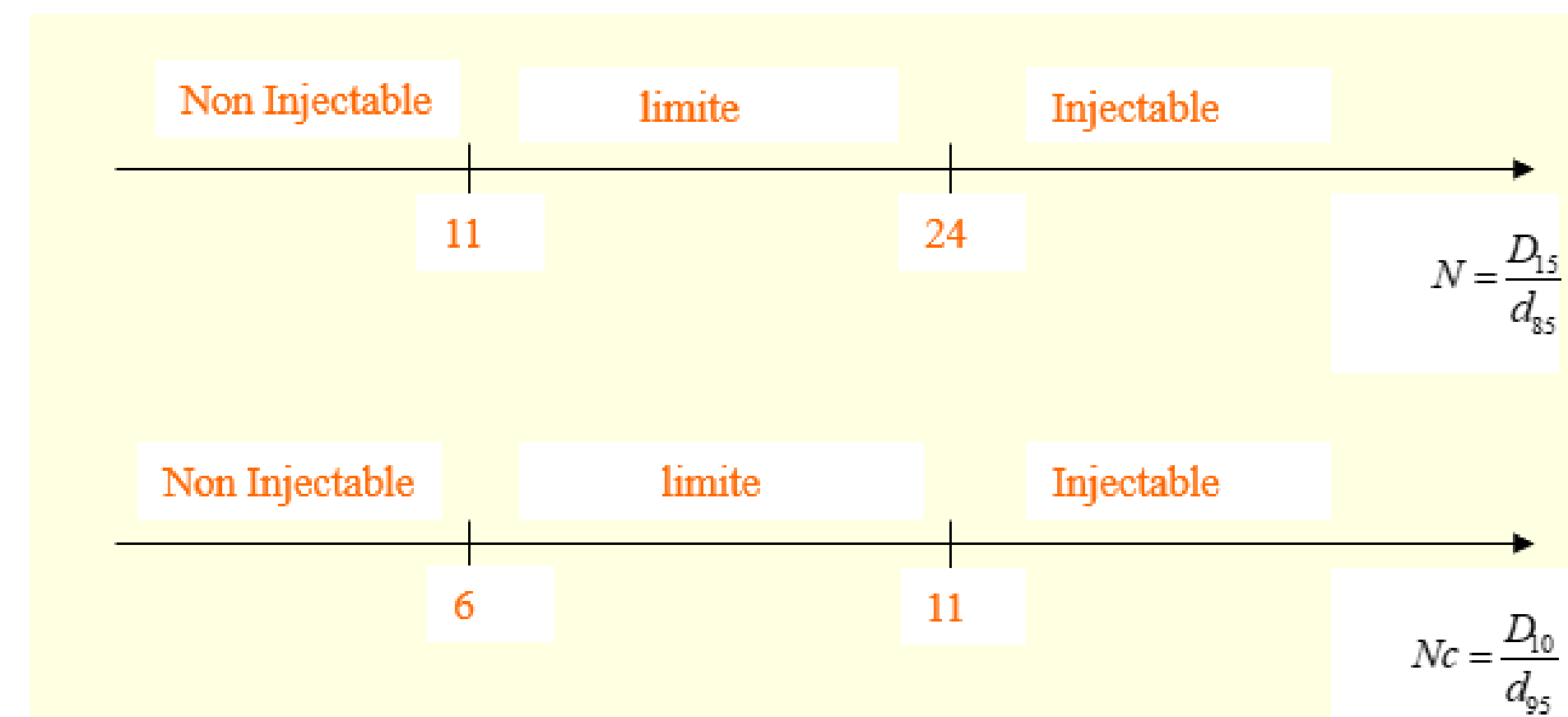
η = viscosité cinématique ; ω = poids volumique coulis ; γ_h = Poids volumique terrain

Ainsi dans le cas d'un traitement de sables fin $k \# 10^{-4}$ m/s, avec un gel fluide, à 10m de profondeur, le débit d'injection doit demeurer < 500 lit/heure / point d'injection, tandis que si la perméabilité devient $k \# 10^{-5}$ m/s, le débit d'injection doit, toutes choses égales par ailleurs, être réduit à 50 lit /h.

5.2 Amélioration de sol par injection

a) Injection de formation sablo- argileuses ou marno-argileuses:

- **Constat 1 Anomalie de pression en cours d'injection**
- **Constat 2 Réduction partielle ou provisoire de k (m/s)**
- **Constat 3 Accroissement de K(f)**
- **Constat 4 effondrement et venues d'eau en cours d'excavation.**
- **Cause : inadéquation du choix des matériaux d'injection & non respect des critères d'imprégnation ($Q \gg k$ initial ou résiduel)**
- **Claquage et dispersion des matériaux d'injection - coulis de ciment BC, imprégnation partielle et dispersion des matériaux d'injection - coulis de ciment ultrafin. Confère règles d'injectabilité MITCHELL's corelation, voie Annales ITBTP CARON – 1992.**



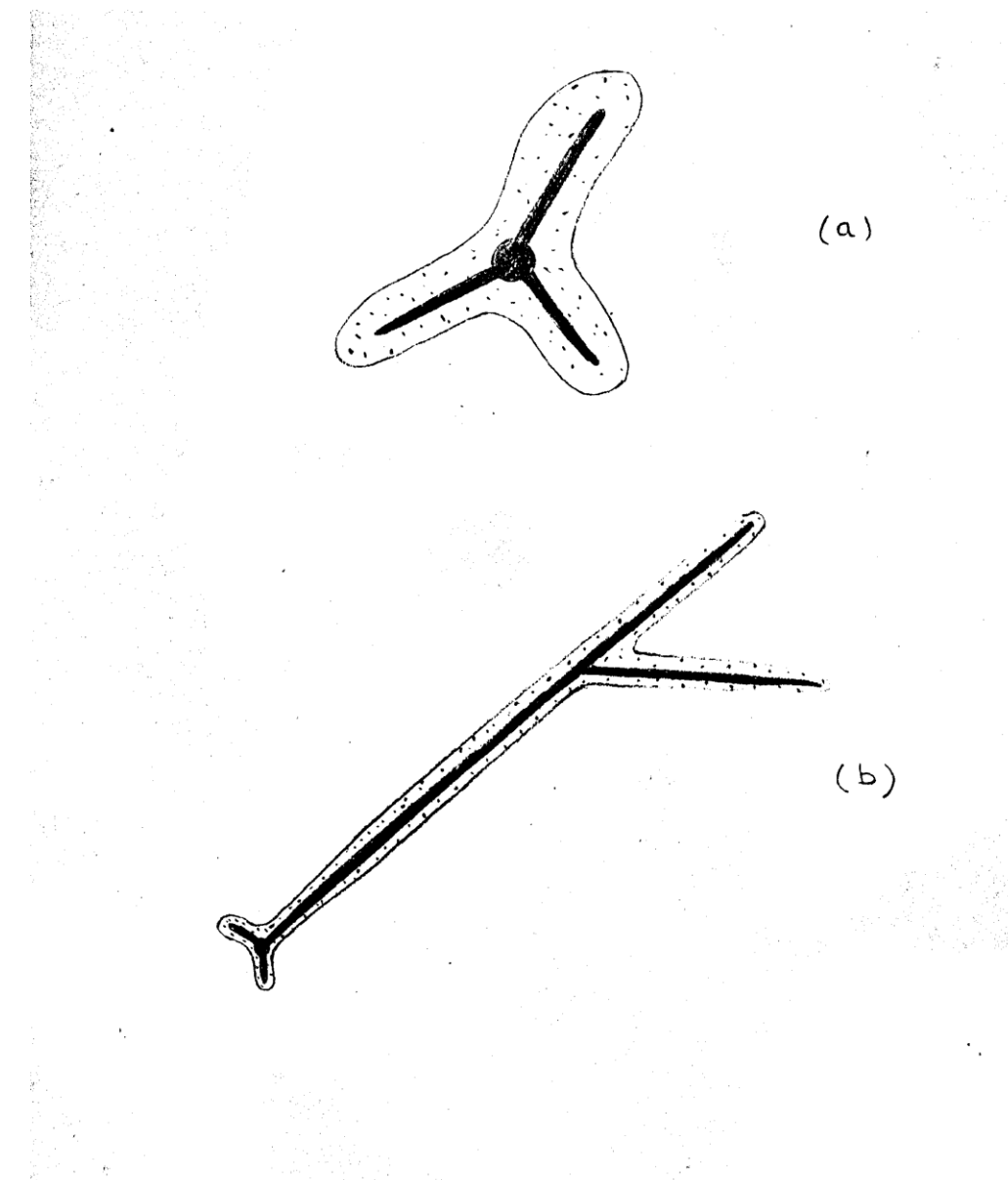
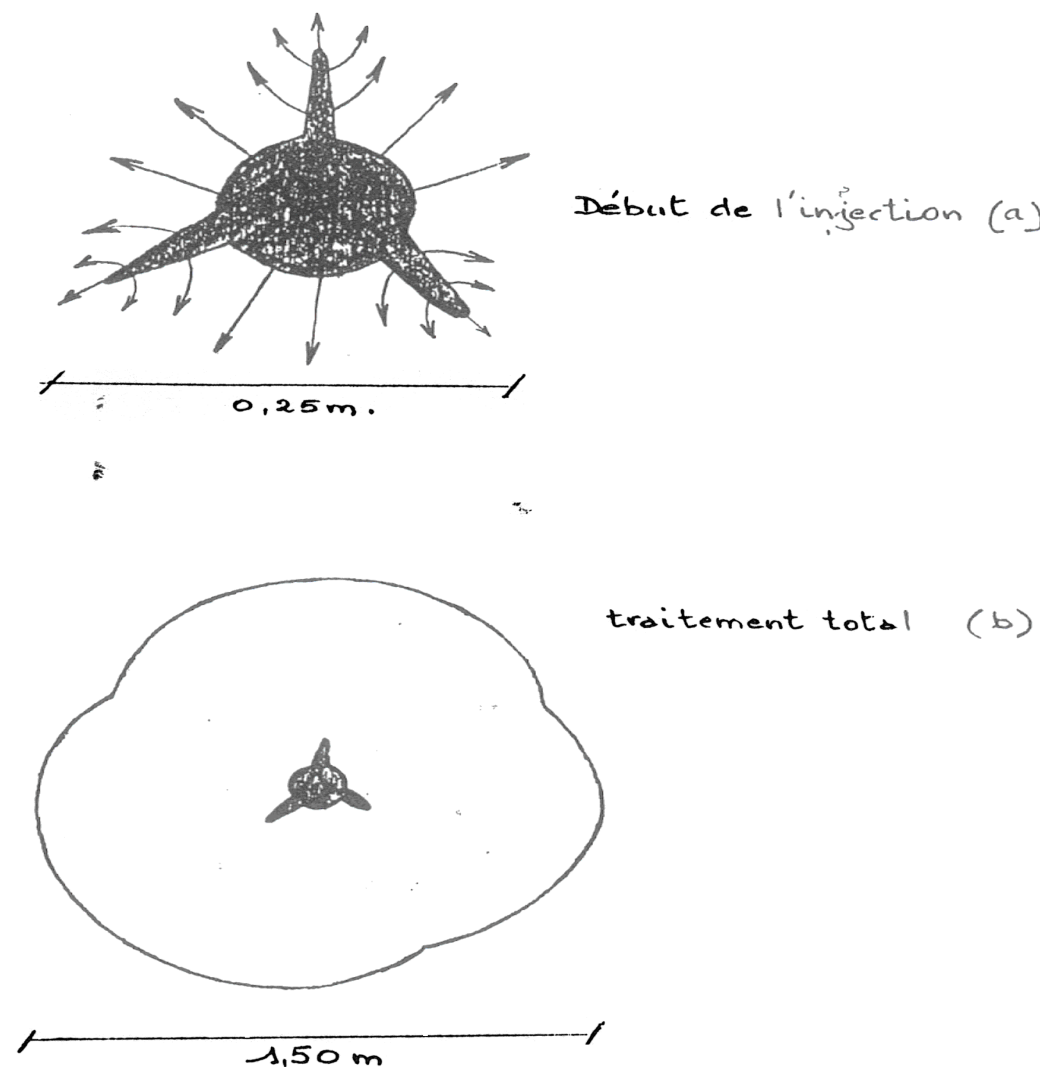
5.2 Amélioration de sol par injection – Faisabilité et limites

- Cause : inadéquation du choix des matériaux d'injection & non respect des critères d'imprégnation ($Q \gg k$ initial ou résiduel)
- Imprégnation – Claquage au gel de silice – Disparition du gel délai 20 à 30 jours (cause synérèse).

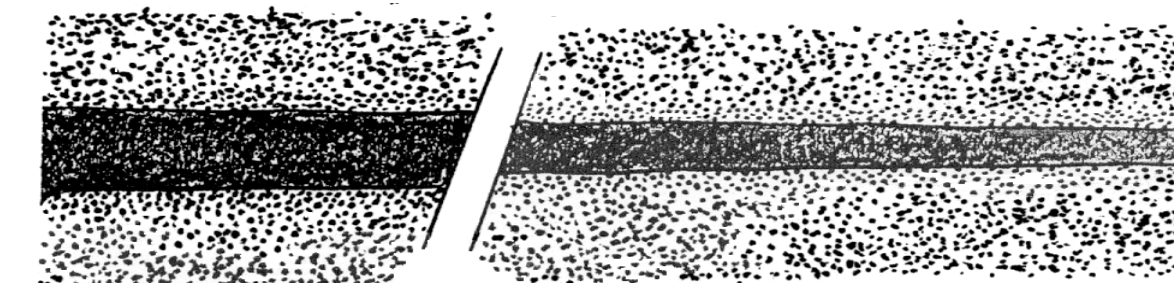
Ainsi dans le cas du contexte (SB sablo argileux) k initial $\approx 5,10^{-6}$ m/s – la valeur k final peut varier de k $5,10^{-6}$ à 10^{-6} m/s, avec un défaut de traitement résiduel majeur conduisant potentiellement à la rupture.

Schéma 2

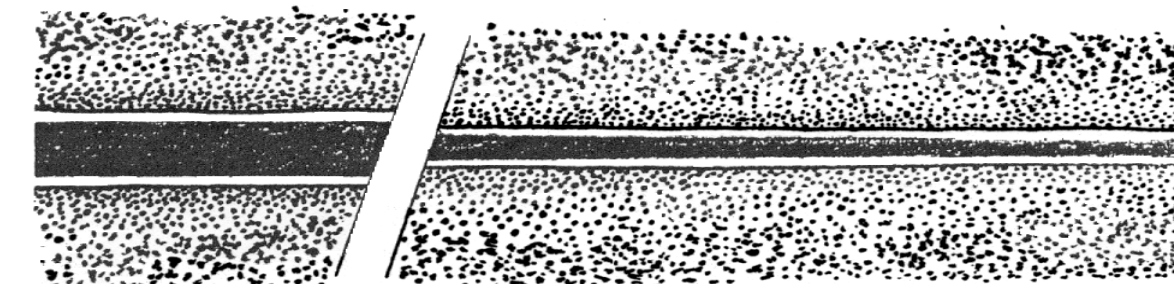
Injection par claquage – imprégnation
dans un sable de perméabilité voisine de 10^{-4} m/s



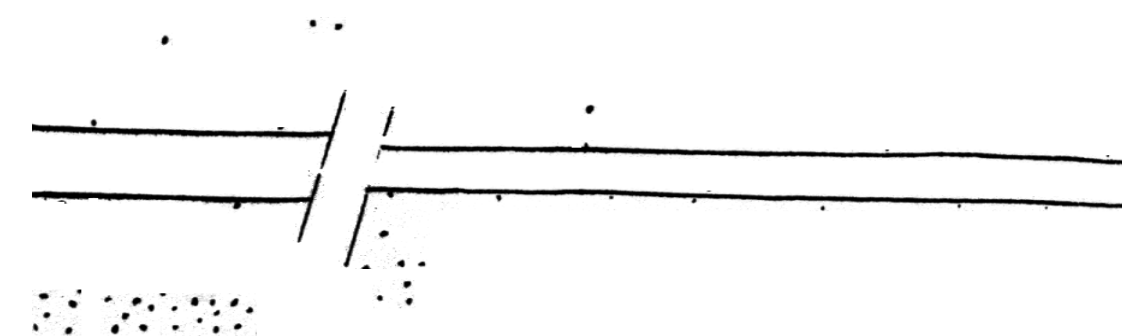
Dissolution régressive après synérèse du gel



Temps 0 - Le plan de claquage et le terrain environnant sont parfaitement remplis par le gel.



Au bout de 2 semaines - Le gel s'est contracté dans le claquage et l'eau, en circulant, a commencé à le dissoudre.



Au bout de 2 mois - Le gel a complètement disparu du claquage et il commence à se dissoudre de part et d'autre.

6. Amélioration de sol - Durabilité - Pérennité

A titre d'exemple, on peut rappeler le cas d'un ouvrage dans le Sud Ouest où des travaux d'injection du substratum (marnes sableuses à argileuses) ont été réalisés au gel de silice afin de permettre le terrassement à sec d'un collecteur d'assainissement. Mais les marnes avaient une valeur initiale $k \# 1 \text{ à } 5,10^{-6} \text{ m/s}$, qui a diminué à $k \# 10^{-7} \text{ m/s}$ à l'issue des travaux. Mais la durabilité du traitement s'est avérée de courte durée, car lors du terrassement la perméabilité du massif traité avait augmenté à $k \# 10^{-5} \text{ m/s}$, conduisant à l'interruption des travaux.

Ainsi, le retour d'expérience de 50 ans, montre que les travaux d'amélioration de sol, conduits de façon appropriée, ont une pérennité avérée, quel que soit la méthode, y compris dans le domaine des travaux d'injection, comme le montre les illustrations précédentes.

Il convient donc de prendre soin de caractériser convenablement le contexte géologique et hydrogéologique du secteur à traiter, pour déterminer le procédé approprié au contexte et s'assurer des conditions de mises en œuvre, pour atteindre la durabilité ou la pérennité recherchée.