

# **LE CYCLE DE L'EAU ET LES MODIFICATIONS DE L'ÉCOULEMENT EN SURFACE ET EN PROFONDEUR SUITE AUX TRAVAUX MINIERS**

**A. MONJOIE**

Université de Liège

Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie,

Prospection géophysique et Environnement

Sart Tilman B19 – 4000 Liège

## **Résumé**

L'impact des travaux miniers sur le cycle de l'eau se traduit par une infiltration accrue des eaux météoriques en profondeur, par une augmentation de la vitesse de circulation des eaux souterraines, généralement par un assèchement total ou partiel des nappes superficielles, par des pertes d'eau de surface et par la disparition des zones marécageuses. Les perturbations majeures affectent le réseau hydrographique suite aux tassements miniers, entraînant des risques d'inondation et nécessitant un endiguement des cours d'eau et la mise en place d'un dispositif de "démergement".

Dans les régions sans morts terrains, les phénomènes sont généralement accrus après l'arrêt des pompages lors de la remontée des eaux souterraines jusqu'au niveau des eaux de surface. On assiste ensuite à une stabilisation assez rapide moyennant un "démergement" important.

Dans les régions avec morts terrains et nappe superficielle, les mêmes phénomènes se rencontrent mais le problème majeur est le risque, lors de l'arrêt des pompages miniers d'une inversion des gradients hydrauliques avec intrusion d'eaux du Houiller dans les nappes superficielles.

Si on veut éviter des dommages importants, il convient de bien étudier ces différents phénomènes, d'en estimer les risques d'occurrence et leur ampleur et d'envisager les remèdes. Les phénomènes de remontée d'eau dans les vieux travaux peuvent être lents et prendre dans certains cas plusieurs dizaines d'années avant de se manifester au niveau dommages. C'est principalement le cas dans les régions avec morts terrains.

Outre ces phénomènes hydrodynamiques, il convient d'examiner les modifications importantes de la qualité chimique des eaux souterraines ainsi que celles des propriétés géomécaniques des terrains affectés par les travaux miniers.

Le cycle de l'eau traduit le fait que les précipitations atmosphériques (P) sont en grande partie évapotranspirées (E), principalement par la végétation, le restant ruisselant en surface (R) ou s'infiltrant en profondeur (I). Cette partie de l'eau rejoint les écoulements de surface (Q) via l'écoulement hypodermique ou l'écoulement des nappes d'eau souterraines. L'excédent se stocke dans les nappes aquifères ( $\Delta$  Rés), ce stock servant à alimenter les sources et cours d'eau en période de non précipitations ou de précipitations déficitaires par rapport à l'évapotranspiration.

Le cycle de l'eau est illustré à la figure 1:

### BILAN HYDROLOGIQUE

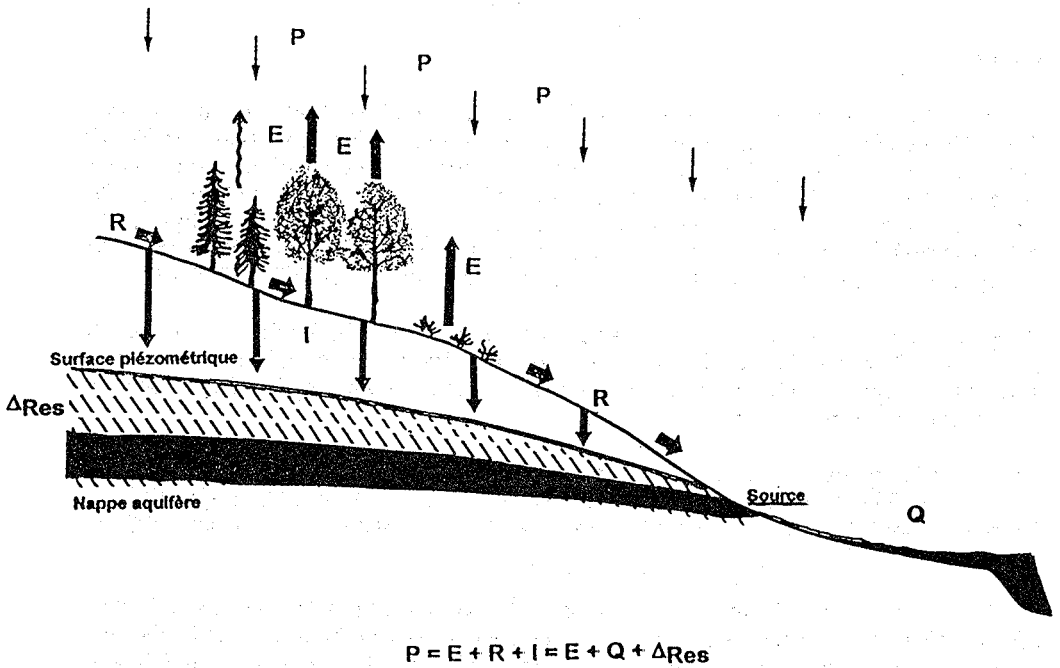


Figure 1 Cycle de l'eau.

En moyenne dans nos régions, les différents termes se répartissent comme suit (1 mm correspondant à 1 l/m<sup>2</sup> de surface) :

Précipitation moyenne:	750 mm
Evapotranspiration moyenne:	525 mm
Infiltration moyenne (en l'absence de ruissellement):	225 mm

L'écoulement dans les nappes d'eaux souterraines est régi par la loi de Darcy:  
 $Q = K \cdot i \cdot S$ , Q étant le débit écoulé, K le coefficient de perméabilité, i le gradient hydraulique et S la section d'écoulement.

Dans les terrains meubles, l'eau circule dans les vides subsistant entre les grains et les vitesses d'eau sont relativement faibles, de l'ordre du cm au dm/j. Dans les roches cohérentes, par contre, l'eau ne peut circuler que dans les fissures des roches qui ne représentent que quelques % à quelques ‰ de la section totale mais la perméabilité est fonction de l'ouverture à la puissance 3, c'est-à-dire que si l'ouverture est multipliée par 2, le débit augmente d'un facteur 8. Dans ces conditions, les vitesses d'écoulement dans les roches fissurées sont de l'ordre de la dizaine de m/j, jusqu'à plus de 100 m/j et parfois plusieurs km/j dans les conduits.

Les exploitations minières engendrant une fissuration des terrains sus-jacents, ce facteur est évidemment très important. Sur base des nombreuses données recueillies en Belgique, les ordres de grandeur des perméabilités sont les suivants:

- Terrains houillers:	schistes	$10^{-10}$ à $10^{-8}$ m/sec
	grès	$10^{-7}$ à $10^{-6}$ m/sec
	zone faillée	$10^{-4}$ m/sec
	zone exploitée schistes	$10^{-6}$ m/sec
	grès	$10^{-5}$ à $10^{-3}$ m/sec
- Craie:	compacte	$10^{-10}$ à $10^{-8}$ m/sec
	fissurée naturellement	$10^{-5}$ à $10^{-4}$ m/sec
	fissurée par tassements miniers	$10^{-4}$ à $10^{-3}$ m/sec ( $10^{-2}$ m/sec)
	indurée compacte	$10^{-6}$ à $10^{-7}$ m/sec
	indurée fissurée	$10^{-4}$ m/sec
- Marnes:	compactes	$10^{-12}$ à $10^{-10}$ m/sec
	fracturées	$10^{-9}$ à $10^{-8}$ m/sec
	si ouv. de fissures x 2	$10^{-8}$ à $10^{-7}$ m/sec

Sur base de ces quelques rappels, il est possible d'examiner les modifications de l'écoulement des eaux en surface et en profondeur, suite aux exploitations minières et après l'arrêt de celles-ci.

## 1. Impact sur les eaux superficielles

En situation initiale, c'est-à-dire avant travaux miniers, les cours d'eau s'écoulent suivant la plus grande pente, le lit de la rivière occupant partiellement la plaine alluviale (fig. 2).

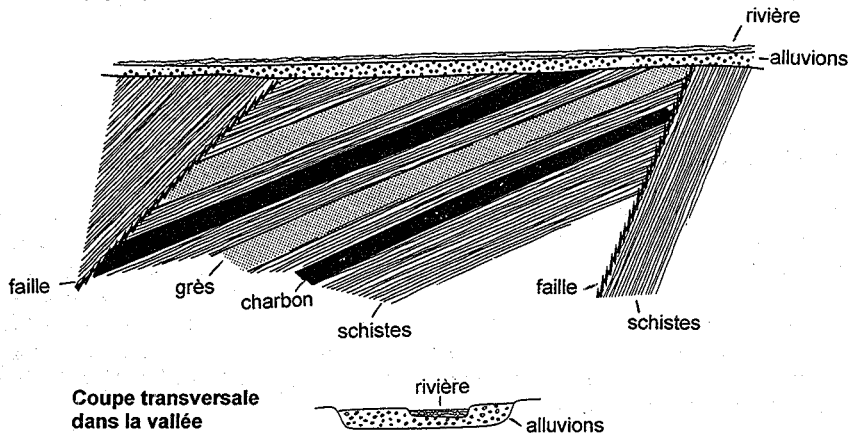


Figure 2 Coupe schématique avant exploitations minières.

Suite aux dégâts miniers (fig. 3), au droit des zones exploitées, les terrains superficiels se sont affaissés et le cours d'eau ne peut plus s'écouler qu'entre digues restituant le cours initial et impliquant des pompages pour que les eaux de surface puissent regagner le cours d'eau dans les zones effondrées. Cette nécessité de repompage est appelée "démergement" en Belgique. Il implique des coûts d'investissement et de fonctionnement particulièrement élevés. Ils constituent un des impacts majeurs sur les eaux superficielles, y compris le risque d'inondation en cas de rupture de digues.

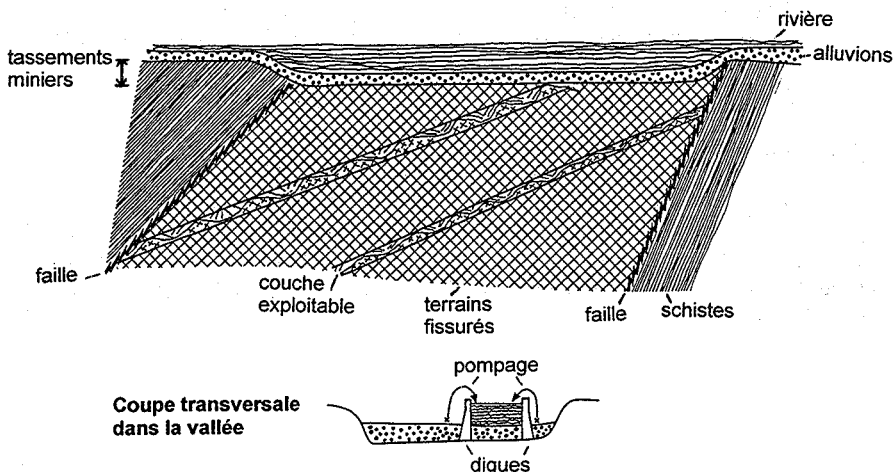
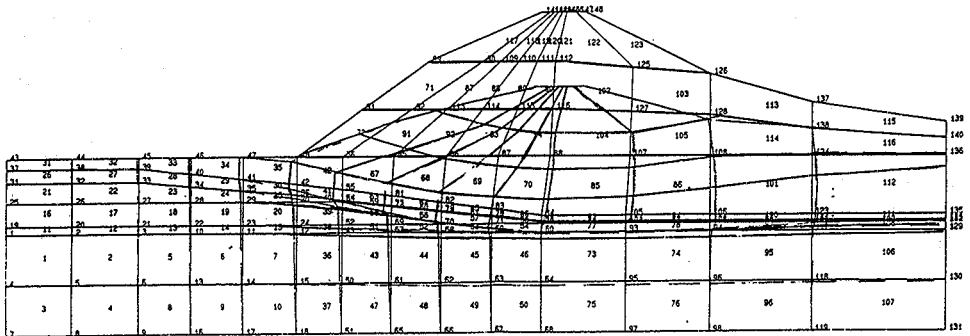


Figure 3 Coupe schématique après tassements miniers.

D'autre part, les activités connexes au charbon (terrils, cockeries, etc) peuvent également entraîner des impacts dommageables. C'est ainsi que les tassements dus au poids du terril (fig. 4) modifient considérablement les caractéristiques du sous-sol, notamment en le compactant ou en refermant ses fissures, modifiant de ce fait l'écoulement des eaux souterraines peu profondes.



Echelle horizontale 0 10m 20 m

Echelle verticale 0 1m 2m

**Figure 4 Modélisation des tassements et compaction dus à la surcharge d'un terril.**

Cette saturation des terrains superficiels peut entraîner la formation de marécages et dans certains cas générer des glissements.

D'autre part, au droit des cockeries, les produits liquides s'échappant de celles-ci peuvent contenir des hydrocarbures aromatiques monocycliques (benzène, toluène, éthylène, xylène, etc.) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques, qui peuvent affecter gravement les qualités des eaux.

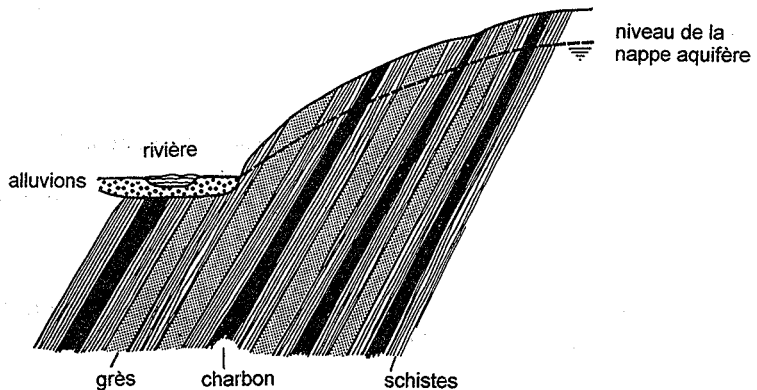
Enfin, les eaux circulant dans les anciens terrains miniers et/ou dans les terrils en dissolvent les éléments solubles et modifient sensiblement le chimisme des eaux. Du fait de l'altération des pyrites (sulfure de fer), de telles eaux sont généralement acides, riches en fer et en sulfates. D'autres réactions peuvent intervenir entre de telles eaux et les terrains présents: phénomènes de dissolution, hydratation de matériau, phénomène de gonflement, etc. Ils seront abordés dans la communication "Effet de couplage mécanique physicochimique avec l'eau".

## 2. Impacts sur les eaux souterraines

Les impacts sur les eaux souterraines sont liés aux différents ouvrages miniers, à savoir:

- les galeries et puits qui constituent des axes de perméabilité très élevée modifiant de façon notable les taux d'infiltration des eaux météoriques, drainant en partie les eaux superficielles et accélérant la circulation des eaux souterraines;
- les chantiers d'exploitation qui constituent des plans de perméabilité accrue engendrant des modifications variables d'écoulement des eaux souterraines suivant le mode de remblayage utilisé et l'ampleur des tassements miniers;
- les fissurations induites par les tassements miniers qui augmentent la perméabilité de l'ensemble des terrains sus-jacents et notamment fracturent les horizons imperméables, permettant ainsi des communications entre les aquifères superficiels et les exploitations profondes.

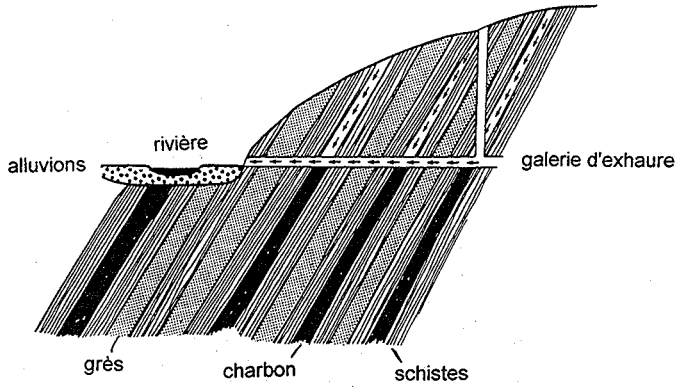
Les modifications sont différentes suivant que l'on se trouve dans des régions où les terrains houillers affleurent sans couverture par des terrains plus récents (couramment appelés morts terrains) (fig. 5) ou au contraire sont surmontés par des couches plus jeunes et aquifères (fig. 10).



**Figure 5 Régions sans morts terrains - allure schématique avant travaux miniers.**

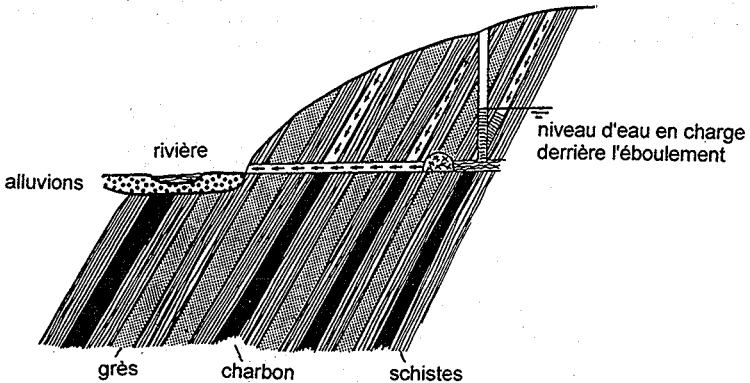
Dans le cas de terrains houillers affleurant en surface, sans morts terrains et avant travaux miniers (fig. 5), le niveau piézométrique de la nappe d'eaux souterraines est plus ou moins parallèle à la surface, à des profondeurs fonction de la nature des roches et de leur perméabilité. Les travaux miniers réalisés à partir du pied du versant entraînent les principaux phénomènes suivants (fig. 6):

- rabattement des nappes phréatiques jusqu'au niveau des galeries débouchant à la hauteur de la plaine alluviale (galeries d'exhaure);
- infiltration accrue des eaux météoriques et avec des délais courts entre le moment de l'infiltration et la restitution au réseau de surface;
- écoulement rapide avec éventuel débordement des nappes profondes;



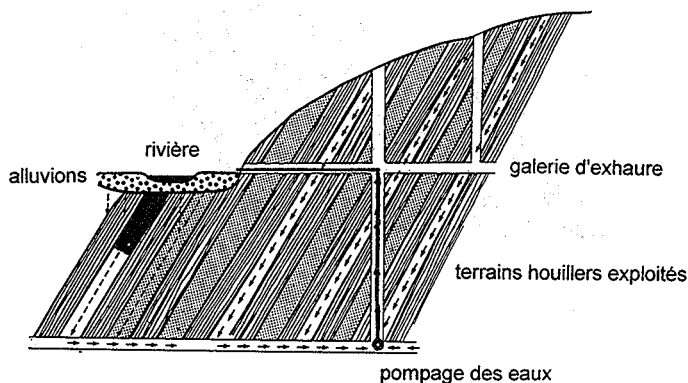
**Figure 6 Régions sans morts terrains - exploitations minières jusqu'au niveau des rivières.**

- risque d'éboulement obstruant les galeries, avec accumulation d'eau à l'amont (fig. 7). Quand la pression d'eau devient suffisante pour entraîner le débouillage de l'éboulement, il se produit un coup d'eau brutal, entraînant roches et terres, et généralement très dommageable.



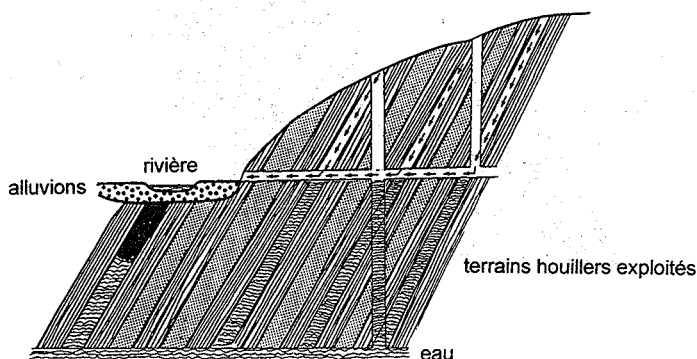
**Figure 7 Régions sans morts terrains - Exploitations minières jusqu'au niveau des rivières. Risques créés par un éboulement.**

Si les exploitations sont approfondies sous le niveau des eaux superficielles (fig. 8), les mêmes phénomènes se poursuivent en profondeur et s'y ajoute un drainage plus ou moins important des eaux de surface vers les chantiers profonds avec assèchement des nappes superficielles et des zones marécageuses. Les eaux profondes doivent être pompées.



**Figure 8** Région sans morts terrains - Exploitation sous le niveau des rivières.

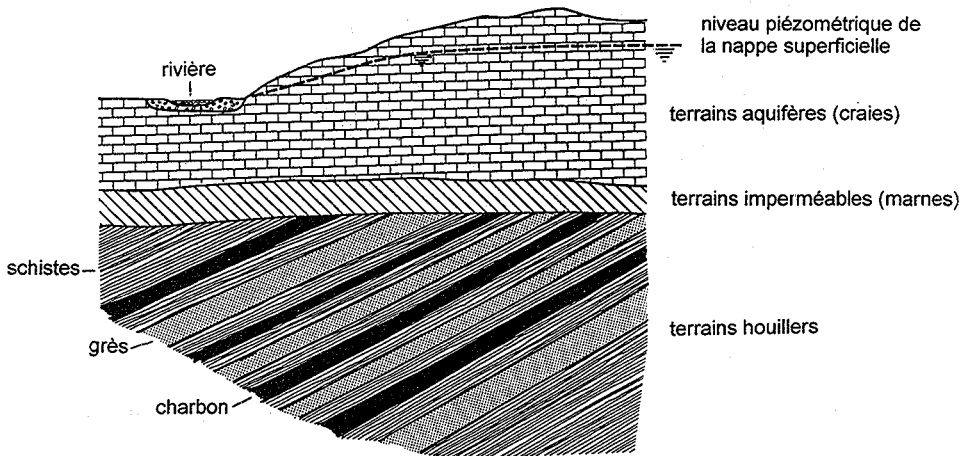
Lors de l'arrêt des exploitations minières et par conséquent de l'arrêt des pompages, les anciennes exploitations se remplissent progressivement d'eau, et au bout d'un certain nombre d'années, voire de dizaines d'années, l'eau se retrouve en surface (fig. 9) dans le réseau de galeries débouchant au niveau de la plaine alluviale, plaine alluviale qui s'est tassée suite aux dégâts miniers, ce qui implique un démergement accru. Des reprises de tassements miniers peuvent être constatés durant la période de remontée des eaux, de même que des venues de grisou. Un autre problème important est la modification de la qualité des eaux souterraines.



**Figure 9** Régions sans morts terrains - Exploitations sous le niveau des rivières. Situation après l'arrêt des pompages.

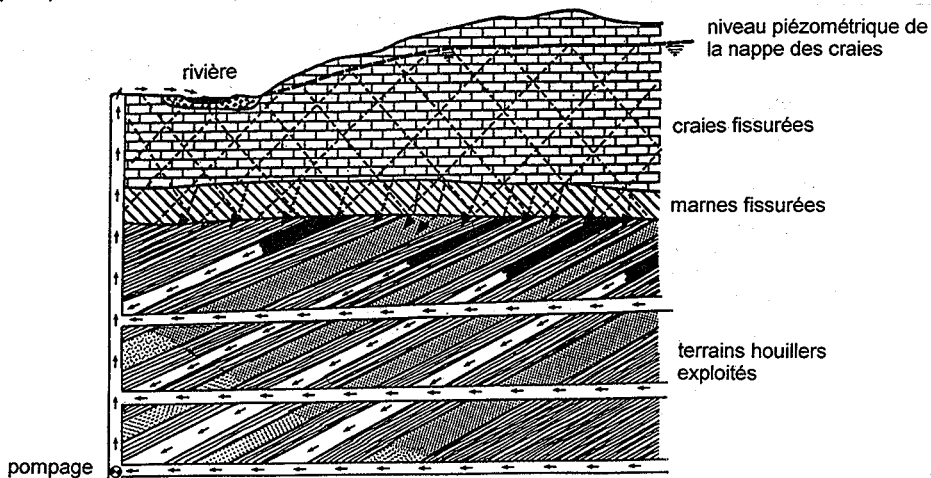


Dans les régions avec morts terrains, il existe généralement une nappe aquifère dans les terrains de couverture (fig 10), en l'occurrence des craies si on s'intéresse au bassin du Nord-Pas-de-Calais, au bassin de Mons ou au bassin de Campine. Le niveau de base de cette nappe est constitué par des marnes, du Turonien à l'ouest, de la smectite de Herve à l'est. La nappe des terrains houillers est captive sous cette couche imperméable mais, avant travaux miniers, elle est peu importante, fonction du taux de fissuration naturelle des roches présentes.



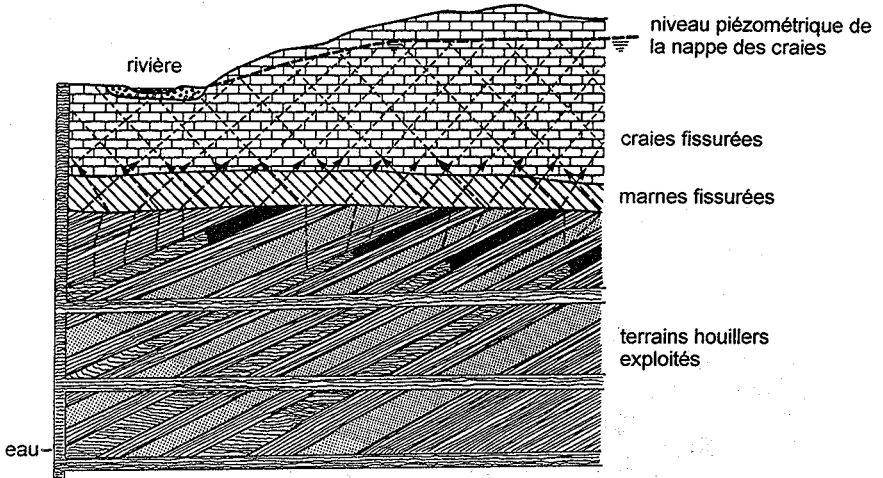
**Figure 10** Régions avec morts terrains - Allure schématique avant travaux miniers.

Suite aux exploitations minières et aux tassements miniers (fig 11), la couche imperméable de marnes est fissurée, de même que les craies sus-jacentes et une certaine quantité d'eau de la nappe des craies pénètre en profondeur, constituant une part plus ou moins importante des pompages que devaient assurer les charbonnages.



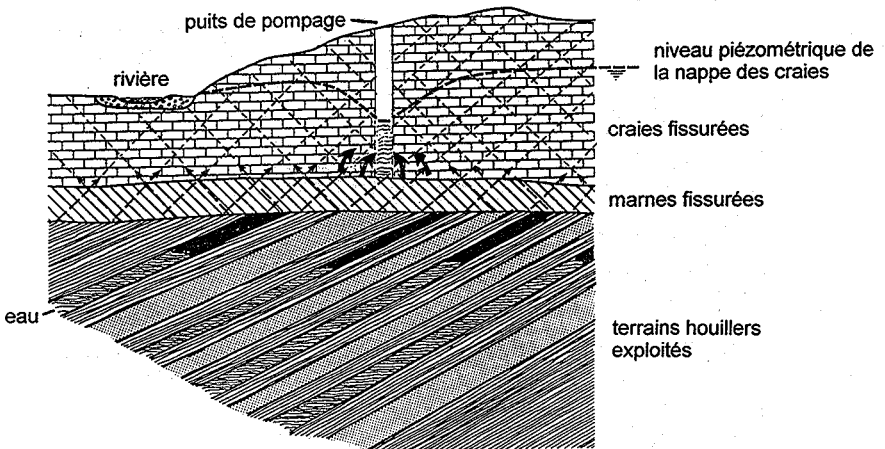
**Figure 11** Régions avec morts terrains - Schéma en phase d'exploitation.

Après l'arrêt des exploitations minières, les puits, galeries et panneaux d'exploitation se remplissent progressivement d'eau et la nappe des terrains houillers redevient captive et peut, dans ce cas, se remettre en pression par rapport à la nappe des craies, suralimentant ainsi l'aquifère supérieur (fig. 12)



**Figure 12 Régions avec morts terrains - Situation après arrêt des pompages.**

Ce phénomène intervient dès que la nappe du Houiller atteint une cote supérieure à celle des craies et est donc fonction de l'altimétrie des zones d'alimentation de la nappe du Houiller. Ceci peut engendrer une augmentation de l'ouverture des fissures du fait de la pression de l'eau, en sorte que les débits de suralimentation vers le haut peuvent être plus importants que les débits de pompage des exploitations minières. Le phénomène est particulièrement à craindre aux endroits où la nappe des craies est rabattue par pompage (fig. 13), car dans ces zones, la pression de la nappe des craies peut plus facilement devenir inférieure à celle de la nappe du Houiller.



**Figure 13 Régions avec morts terrains - Situation après arrêt des pompages avec rabattement de la nappe des craies par captage.**

Ceci peut entraîner des modifications notables de la qualité de la nappe des craies par montée d'eaux acides, ferrugineuses et sulfatées du Houiller, et même, dans certains cas, générer des phénomènes de dissolution, si les matériaux sus-jacents sont solubles, ce qui est le cas des craies.

D'autre part, la remontée des eaux dans les anciens chantiers miniers refoule les gaz qui s'y sont formés tels que le grisou, avec migration en surface ou piégeage dans certaines zones des anciennes exploitations.

### 3. Le chimisme de l'eau

Le chimisme de l'eau fait l'objet de différentes communications spécifiques à ce problème. Les principaux paramètres sont:

- matières organiques et autres provenant de l'exploitation minière;
- altération des sulfures de fer (pyrite, marcassite) en présence d'oxygène et d'eau avec formation de:
  - sulfates de fer  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
  - hydroxyde de fer  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{FeO}(\text{OH})$
  - acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$
  - hydrogène sulfuré  $\text{H}_2\text{S}$
  - ions présents dans les sulfures (As, Cu, ...)

d'où des eaux acides, sulfatées, riches en fer, ...

Il en résulte des risques importants de.

- pollution des eaux de surface dans les régions sans morts terrains;
- pollution des eaux souterraines et de surface dans les régions avec morts terrains;
- dissolution des craies et autres matériaux solubilisables.

### 4. Couplage eau-roche

Les tassements miniers engendrent des fissurations, et de ce fait, les interfaces entre eaux et roches sont fortement augmentés, et dans la plupart des cas, on note une diminution très importante des propriétés géomécaniques. Ceci est dû à l'effet de l'eau et des fissurations, mais également à l'altérabilité des roches, suite à la détente due aux excavations minières, aux phénomènes d'oxydation des minéraux sulfurés en phase de dénoyage du massif suivi d'une hydratation lors de la remontée des nappes aquifères à l'arrêt des exploitations. Outre le gonflement des minéraux argileux, on note l'apparition d'autres minéraux gonflants et fluants, tels que le gypse, la mélanterite, etc.

Dans le cadre des études réalisées pour un métro profond situé dans les roches du Houiller de la région de Liège (Belgique), on a constaté des modifications nettes des valeurs du module d'élasticité et du module de déformation entre, d'une part, les zones exemptes d'exploitations minières, en différenciant les zones tectonisées et les zones non tectonisées et, d'autre part, les valeurs obtenues en zone d'influence minière (fig. 14).

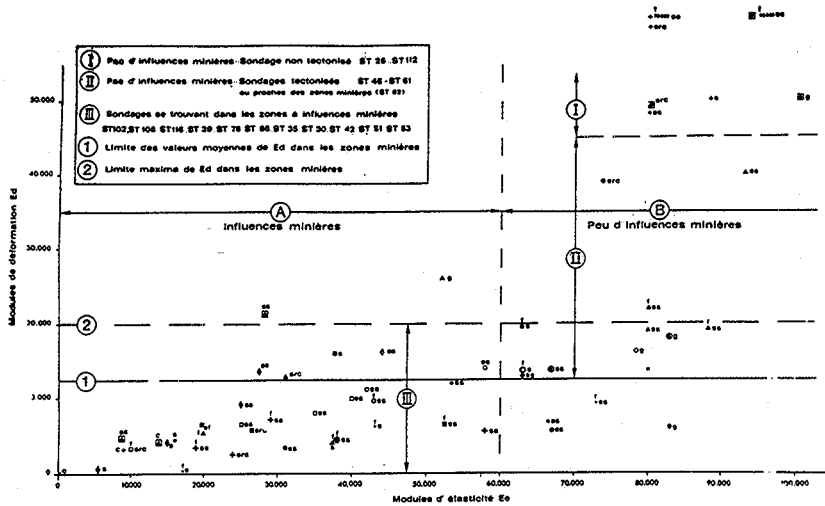


Figure 14 Projet de métro de Liège - Tronçons Saint-Georges - Coronmeuse et Saint-Lambert - Val Benoît. Essais de dilatométrie.

On constate une diminution notable tant au niveau du module d'élasticité que du module de déformation.

Si on différencie les natures lithologiques en types schistes (n° 1, 2 et 3), schistes gréseux (n° 4, 5, 6 et 7) et grès (n° 8 et 9), on constate (Tableau ci-joint) que la diminution des valeurs de modules est surtout importante dans les schistes pour des éprouvettes non saturées et augmente sensiblement en cas de saturation de l'échantillon (n° 12, 14 et 17), sauf pour les grès (n° 18 et 19).

EPROUVETTES NON SATUREES		
Type lithologique	$E_d$	$E_e$
1	25 %	16 %
2	13 %	21 %
3	-42 %	-38 %
4	16 %	11,5 %
5	8 %	5,5 %
6	9 %	-4 %
7	6 %	27 %
8	12 %	12 %
9	16 %	15 %
EPROUVETTES SATUREES		
Type lithologique	$E_d$	$E_e$
12	28 %	12 %
14	34 %	36 %
17	23 %	34 %
18	-32 %	-30 %
19	5 %	2 %

Projet de métro de Liège - Essais sur carottes.

## 5. Conclusions

Dans le cas d'arrêt de l'exhaure des anciennes exploitations minières, les différents problèmes exposés ci-avant doivent être examinés pour estimer le risque qu'ils surviennent et l'ampleur qu'ils peuvent prendre. Ceci implique un ensemble de reconnaissances portant sur:

### 1. la géométrie et les caractères des massifs et des exploitations minières, à savoir:

- structure géologique détaillée et surtout, dans le cas présent:
  - des failles affectant
    - le Houiller
    - les marnes du Crétacé
    - les craies
  - des caractéristiques géométriques et hydrodynamiques des failles;
- géométrie des excavations;
- ampleur des tassements qui conditionnent le taux de fissuration des terrains sus-jacents;
- volumes extraits (charbons et stériles);
- volumes des tassements;
- volumes des vides résiduels;
- étanchéité des puits;

### 2. sur les problèmes relatifs à l'eau et notamment:

- exhaure des charbonnages fonction des zones d'alimentation du Houiller, de la perméabilité des marnes et des failles;
- niveau des nappes superficielle et profonde;
- bilan hydrogéologique de la nappe du Houiller avec:
  - estimation
    - de l'alimentation naturelle de la nappe;
    - de la durée de remplissage des vides résiduels;
    - de l'évolution de la remontée en pression de la nappe du Houiller;
  - ordre de grandeur de l'effet de pression sur l'ouverture des fissures
  - estimation
    - du temps de migration à travers les marnes;
    - du volume d'eau migrant à travers les marnes et de son évolution dans le temps;

### 3. bilan des nappes situées dans les morts terrains et dans le cas présent, la nappe des craies, ce qui implique la détermination de:

- valeurs de perméabilité, porosité, (diffusion, dispersion,...);
- volume d'alimentation naturelle;
- volume de prélèvements actuels et futurs;
- évolution piézométrique;
- répartition des flux préférentiels;
- effets induits par une éventuelle intrusion d'eau du Houiller et problème de dilution.

Toutes les estimations qui en découlent devront être confrontées aux mesures in situ existantes ou à mettre en oeuvre dès que possible et notamment:

- suivi piézométrique - de la nappe des craies;  
- de la nappe du Houiller,
- mesure in situ de perméabilité et de porosité des différents terrains aquifères et principalement suite aux dégâts miniers;
- suivi de la qualité chimique des différentes nappes.

Une modélisation mathématique du système hydrogéologique constitue un outil remarquable pour prévoir l'avenir et examiner l'efficacité de différents scénarios de remédiation.

### Bibliographie sommaire

F. BONNECHERE, L. CALEMBERT, A. FAGNOUL, A. MONJOIE, P. STASSEN, H. VAN DUYSE, *La géologie de l'ingénieur appliquée à l'étude du site d'un métro dans le bed rock houiller à Liège*, Centenaire de la Société Géologique de Belgique, p. 163-192, Liège 1974.

L. CALEMBERT, L. LAMBRECHT, A. MONJOIE, *Géologie du Centre de Liège*, Annales de la Société Géologique de Belgique, t. 96, p. 157-163, Liège 1973.

L. CALEMBERT, A. MONJOIE, *Déformations du sol engendrées dans la vallée de la Haine par les captages d'eaux souterraines*, Deuxième réunion UNESCO/OMM, pt. IV A.B., Bruxelles 1977.

L. CALEMBERT, A. MONJOIE, *Modification du régime hydraulique des eaux souterraines dans la vallée de la Haine*, Colloque de Géologie urbaine du Comité Belge de Géologie de l'Ingénieur, p. 369-380, Bruxelles 1975.

L. CALEMBERT, A. MONJOIE, *Observations hydrogéologiques dans la vallée de la Haine (Belgique)*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, t. 280 - série D, p. 2637-2639, Paris 1975.

A. MONJOIE, *Géologie et géotechnique urbaines en Belgique*, Mémoires de la Société géologique italienne, n° 14, p. 409-420, Italie 1975.

A. MONJOIE, CI POLO CHIAPOLINI, *Influence des travaux miniers sur les caractéristiques hydrogéologiques et géomécaniques des massifs rocheux*, Extrait des Annales des Mines de Belgique, 9e livraison, Bruxelles 1973.

CI POLO CHIAPOLINI, *Caractéristiques géomécaniques des roches du bassin houiller de Liège (Belgique)*, Mémoires du Centre d'Etudes, de Recherches et d'Essais Scientifiques du Génie Civil de l'Université de Liège, n° 47, juin 1974.