

Comportement des terrains au-dessus des exploitations partielles Diagnostic de stabilité et organisation de la surveillance des exploitations partielles abandonnées Cas des carrières de la région Nord-Pas-de-Calais

Yves Paquette

▶ **To cite this version:**

Yves Paquette. Comportement des terrains au-dessus des exploitations partielles Diagnostic de stabilité et organisation de la surveillance des exploitations partielles abandonnées Cas des carrières de la région Nord-Pas-de-Calais. Conférence mondiale sur le développement durable des anciens pays charbonniers "l'Après-Charbon", Mar 1997, Lille, France. ineris-00972119

HAL Id: ineris-00972119
https://ineris.hal.science/ineris-00972119

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Comportement des terrains au-dessus des exploitations partielles

Diagnostic de stabilité et organisation de la surveillance des exploitations partielles abandonnées

Cas des carrières de la région Nord-Pas-de-Calais

Y. PAQUETTE
INERIS

RESUME

Le diagnostic de stabilité des exploitations souterraines partielles abandonnées s'effectue classiquement à partir de l'étude de l'environnement du site, de l'analyse de la manière dont a été conduite l'exploitation et de sa géométrie, ainsi que de l'examen des effets consécutifs au développement des excavations sur les terrains encaissants.

L'auscultation d'exploitations partielles abandonnées par mesures de déformation in situ apporte les informations qui permettent de conforter l'analyse géotechnique, de diagnostiquer et prévenir de l'approche d'une éventuelle rupture.

L'expérience acquise de plus de 20 années de mesures de déformation dans les carrières de craie du département du Nord, a permis de valider une méthodologie de surveillance et de gestion de la mise en sécurité des cavités abandonnées en site urbain, lorsque celles-ci demeurent accessibles.

Nous remercions le Service de l'Inspection des Carrières Souterraines du département du Nord pour sa collaboration dans le suivi des appareillages de mesure.

Conférence mondiale sur le développement durable des anciens pays charbonniers, l'Après-Charbon
Lille, 17-21 mars 1997

1 LE PROBLEME DES EXPLOITATIONS PARTIELLES ABANDONNEES EN FRANCE 3

2 DIAGNOSTIC DE STABILITE ET ORGANISATION DE LA SURVEILLANCE 4

2.1 Mécanismes d'instabilité 4

2.2 Rôle de l'eau 6

2.3 Principes du diagnostic de stabilité 6

2.4 Reconnaissance du site, carte géotechnique, surveillance 7

2.5 Auscultation : mesure des déformations 8

2.6 Mesures et essais in situ 9

2.7 Caractérisation géomécanique 10

2.8 Evaluation de la stabilité 10

2.9 Traitement, confortement 11

3 CAS DES CARRIERES DU NORD 12

3.1 Types d'exploitation 12

3.2 Typologie des désordres 12

3.3 Essais géomécaniques 13

3.4 Carrières auscultées, bilans 13

4 CONCLUSIONS 16

5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 17

1 LE PROBLEME DES EXPLOITATIONS PARTIELLES ABANDONNEES EN FRANCE

Les exploitations souterraines dites partielles ont pour particularité de laisser subsister des vides en profondeur après exploitation. Nous nous intéressons ici au cas des exploitations partielles développées en terrains sédimentaires, dans des gisements peu pentés.

Les principales méthodes d'exploitation partielle dans ce type de gisement sont les méthodes par chambres et piliers abandonnés (figure 1) et les méthodes par îlots où alternent bandes fermes et bandes dépilées. Ces méthodes posent le délicat problème de l'évolution à long terme de la stabilité des terrains dans lesquels sont creusées ces excavations et des risques engendrés en surface pour les personnes et les biens.

figure 1 : exemples de géométries d'exploitations partielles, vues en plan

A : galeries filantes, parallèles

B : catiches du Nord

C : ilôts

D : chambres et piliers

A l'aplomb de ces exploitations, souvent développées initialement en périphérie des grandes cités pour l'approvisionnement en matériaux de construction ou en matières premières, les surfaces ont été gagnées progressivement par l'urbanisation sans que la stabilité à long terme du sous-sol n'ait été assurée ni contrôlée.

Les méthodes d'exploitation d'autrefois étaient conduites de manière artisanale et empirique, sans véritable planification. Les taux de défruitement (rapport de la surface exploitée à la surface totale) étaient souvent trop élevés (jusqu'à 80% voire 90 / 95%) pour assurer la stabilité à long terme des terrains sus-jacents. Les dégradations par vieillissement du fait de sollicitations naturelles (infiltrations d'eau, battements de nappe, variations d'humidité de l'atmosphère et de température, effets liés à l'ennoyage des cavités sur des matériaux sensibles, séismes ...) ou induites (vibrations, fuites de réseaux, surcharges liées à des constructions ....) entraînent le plus souvent la ruine inéluctable de ce type d'excavation sous-dimensionnée.

L'actualité mentionne régulièrement les cas d'effondrement à l'aplomb de terrains sous-minés, soit au droit d'anciennes carrières d'extraction de matériaux de construction (calcaire, pierre à chaux, gypse, sable, argile, ocre...) soit au droit d'anciennes exploitations minières (substances minières sédimentaires concédées : fer, charbon, schistes et calcaires bitumineux, pétrole, sel, potasse ...).

La rupture de cavités abandonnées peut parfois prendre une tournure dramatique lorsque l'effondrement se généralise à l'ensemble d'un quartier d'extraction : la catastrophe de Clamart (carrière de craie) en 1961, provoqua 21 morts et des dizaines de blessés. Les récents effondrements survenus en 1996 et 1997 dans les anciennes mines de fer lorraines à Auboué et Moutiers ont entraîné l'évacuation de plus de 200 familles de leur logement.

Les effets liés à la ruine des exploitations partielles sont d'autant plus catastrophiques qu'une grande part d'entre elles se trouve à faible profondeur (entre 10 et 30 m le plus souvent pour les carrières, 100 à 150 m en moyenne pour les mines), avec des volumes excavés parfois impressionnants (cas des exploitations sur plusieurs niveaux) et qu'elles ont été creusées dans des matériaux dont les caractéristiques mécaniques évoluent défavorablement dans le temps comme la craie, le gypse, les marnes ou calcaires argileux. Le lent fluage sous la charge de ce type de matériaux évolutifs entraîne des déformations continues et irréversibles (comportement dit plastique ou visco-plastique) et peut conduire à terme à l'effondrement des édifices.

L'impact socio-économique lié à l'existence de ces cavités est majeur : risques de dommages aux personnes et aux biens, dépréciation du patrimoine, frein au développement urbain, surcoûts des travaux de confortement ou de traitement pour la réalisation des projets de construction ou d'aménagements routiers, etc.

Le diagnostic de stabilité des exploitations souterraines partielles abandonnées s'effectue classiquement à partir de l'étude de l'environnement du site (géologie, tectonique, structure, hydrogéologie, géotechnique...), de l'analyse de la manière dont a été conduite l'exploitation et de sa géométrie (dimensionnement des chambres et piliers par exemple) ainsi que de l'examen des effets consécutifs au développement des excavations sur les terrains encaissants.

Des méthodes de diagnostic et des techniques d'auscultation ont été conçues et mises en oeuvre pour surveiller l'évolution de la stabilité des exploitations souterraines abandonnées..

note : Cette mission d'intérêt général a été confiée par le ministère de l'Industrie dès 1974 au CERCHAR (Centre d'Etude et de Recherche des Charbonnages de France) puis à l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques).

2 DIAGNOSTIC DE STABILITE ET ORGANISATION DE LA SURVEILLANCE

2.1 MECANISMES D'INSTABILITE

Dans une exploitation partielle, par chambres et piliers abandonnés ou par îlots réduits, le toit, les piliers et le mur participent à la stabilité de l'édifice. La défaillance de l'une de ces composantes peut aboutir aux différents types de désordres classiquement observés : fontis, affaissements, effondrements partiels ou généralisés.

TABLEAU 1

Mécanismes de dégradation des exploitations partielles abandonnées sous-dimensionnées

La rupture des piliers est à l'origine d'affaissements de surface ainsi que d'une bonne part des effondrements d'exploitations partielles, le plus souvent localisés (figure 2).

figure 2

Phénomène d'effondrement localisé par rupture d'un pilier

La rupture provient généralement d'un dimensionnement des piliers insuffisant par rapport aux charges qui s'y exercent ou d'un élancement (rapport de la hauteur sur la largeur du pilier) trop important, avec de ce fait un moindre confinement des terrains au coeur du pilier. La résistance à long terme de certains matériaux évolutifs peut en outre être nettement inférieure à la résistance obtenue lors d'essais de laboratoire. Ce phénomène, dit de fluage, explique que des piliers qui présentaient une tenue satisfaisante lors de l'exploitation montrent au cours du temps des déformations différées importantes pouvant conduire à la ruine de l'édifice.

On parle d'affaissement au sens large lorsque le réajustement des contraintes dans les terrains au droit d'une exploitation atteint la surface, de façon souple et progressive, sans rupture cassante, en formant une dépression topographique (cuvette d'affaissement).

Les chutes de toit peuvent se développer en toutes conditions de dimensionnement d'exploitation. Elles peuvent se produire lorsque la résistance à la flexion ou au cisaillement du toit est dépassée, que ce soit par une largeur de galerie excessive, une rupture locale de pilier, une surcontrainte dans les dalles portantes ou de mauvaises conditions lithologiques ou structurales. Lorsque ces chutes de toit sont localisées à un carrefour, on observe des montées de voûte pouvant percer au jour et former un fontis (figure 3).

figure 3

Formation d'un fontis en terrain calcaire

Le mur des exploitations partielles sert d'appui aux piliers. Si les bancs du mur sont moins résistants que le massif excavé, les piliers peuvent poinçonner et s'enfoncer dans le mur, jusqu'à entraîner la rupture du toit et parfois l'effondrement généralisé du quartier d'exploitation (figure 4).

figure 4

Mécanismes d'effondrement spontané :

A :par rupture des piliers,

B : par poinçonnement des piliers dans le mur.

Les mécanismes d'effondrement spontané et généralisé ont été particulièrement analysés dans les mines de fer par Tincelin et Sinou (1962). Ils font référence à une rupture généralisée et soudaine du toit, à grande échelle, du fait de sa stratification, dans des secteurs d'exploitation par chambres et piliers où les piliers sont de faible section et élancés, avec un fort taux de défruitement. L'effondrement généralisé peut ainsi survenir dans une exploitation abandonnée du fait du fluage des piliers entraînant la rupture brutale du toit. Le mécanisme invoqué est une augmentation de la flexion des bancs des terrains de recouvrement, souvent raides et résistants, jusqu'au relâchement brutal de l'énergie emmagasinée (par libération du frottement entre les bancs raides du toit).

2.2 ROLE DE L'EAU

L'eau joue un rôle souvent déterminant dans la dégradation de la stabilité à long terme des exploitations partielles abandonnées. Cette dégradation affecte aussi bien les piliers résiduels que les terrains de recouvrement.

De nombreuses exploitations ont été conduites hors nappe pour des raisons économiques. Des inondations des points bas des excavations sont fréquemment observées en période de hautes eaux.

L'hydratation des roches sensibles à l'eau (craie, marne, argile), à comportement élastoplastique, par immersion ou remontées capillaires dans les piliers, provoque une altération des propriétés mécaniques en fonction du degré de saturation de la roche : plus de 70% de perte de résistance à la compression simple par rapport à l'état sec pour certains calcaires argileux ou craies (Ghoreychi, 1983), 50% pour le minerai de fer lorrain (Pineau, 1978, figure 5). Cette baisse des caractéristiques est le plus souvent liée à la présence d'argiles gonflantes dans ces roches.

figure 5

Variation de résistance mécanique d'un minerai de fer en fonction de son degré de saturation (Pineau, 1978).

L'action lubrifiante de l'eau sur les joints de stratification et plans de fissuration contribue à l'abaissement du coefficient de frottement des discontinuités et à une moindre résistance du massif rocheux.

Maury (1979) invoque également, comme possible facteur déclenchant d'effondrements généralisés, les mécanismes de mise en charge hydraulique des terrains de couverture (par élévation de la charge hydrostatique suite à une forte pluviométrie par exemple).

Pour les exploitations développées sous le niveau phréatique, l'effet du remplissage des excavations avec la remontée des eaux est complexe. Il peut s'avérer négatif, avec la diminution des propriétés mécaniques liées à l'hydratation des roches sensibles ou la chute de la résistance au cisaillement des discontinuités immergées sans oublier le rôle de la pression intersticielle sur le comportement des roches tendres, ou s'avérer positif, avec le confinement des piliers par la pression hydrostatique et le déjaugeage des terrains surincombants (poussée d'Archimède).

Les circulations d'eau peuvent par ailleurs provoquer des phénomènes de karstification d'autant plus importants que les roches sont plus solubles (gypse, potasse, sel...).

2.3 PRINCIPES DU DIAGNOSTIC DE STABILITE

L'objectif de toute étude de stabilité est de comparer les efforts statiques ou dynamiques auxquels sont soumis les éléments porteurs de l'excavation à ceux qu'ils peuvent effectivement supporter.

Le critère utilisé pour cela fait référence à un coefficient de sécurité F tel que $F = Ru / S$

où Ru = contrainte admissible par la structure considérée (toit, pilier, mur) ;

S = contrainte régnant effectivement dans la structure.

Le diagnostic de stabilité d'une exploitation partielle, une fois celle-ci reconnue dans son ensemble et levée topographiquement, passe par différentes étapes : observations et relevés dans l'excavation, analyse à partir des plans topographiques, mesures in situ, essais de laboratoire, calculs de stabilité.

note : Un tel diagnostic ne peut s'opérer que lorsque les conditions d'hygiène et de sécurité demeurent acceptables pour autoriser le personnel d'intervention à pénétrer dans le site. Une procédure définissant les règles préventives usuelles pour les interventions en milieu souterrain confiné doit être établie (usage d'équipements de sécurité, contrôles d'atmosphère, liaison avec une équipe de surveillance extérieure...).

2.4 RECONNAISSANCE DU SITE, CARTE GEOTECHNIQUE, SURVEILLANCE

Les observations à réaliser dans les excavations concernent l'analyse du contexte géologique, structural et hydrogéologique. On prête une attention particulière aux éléments suivants : nature et homogénéité des différents bancs constituant les piliers, le toit et le mur, pendage des strates, orientation de la fracturation naturelle et des failles, nature et densité des joints et discontinuités, repérage de karsts et zones d'altération, localisation des venues d'eau naturelles ou artificielles (fuites de réseaux), position de la nappe, zones ennoyées en permanence ou temporairement...

L'inventaire des principaux indices de dégradations mécaniques porte sur le repérage de la fissuration et de la fracturation induite dans les piliers, les parements ou le toit, des flexions du toit, des montées de voûte et chutes de toit, des écaillages ou délavements de parements, des soufflages du mur...

L'examen de l'environnement géologique et topographique du site, de la géométrie des excavations, de la hauteur du recouvrement, de la répartition des taux de défruitement, de la morphologie et de l'élancement des piliers, de la cartographie des piliers les plus faibles et des différents désordres mécaniques observés, permet de dresser la carte géotechnique du site. Elle reflète l'état de l'exploitation à une période donnée et aboutit à l'établissement d'un premier bilan sur sa tenue générale. Les mécanismes de rupture prévisibles à terme permettront ensuite une analyse des risques et la prise de décision nécessaire à leur bonne gestion. L'élaboration de plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) permettra par exemple d'établir une cartographie des aléas (probabilité d'occurrence d'un événement) ou une cartographie de vulnérabilité (quantification de l'impact humain ou socio-économique des différents aléas).

Si l'aléa est faible et le site accessible on se contente généralement d'une visite périodique des lieux (annuelle par exemple) afin de contrôler l'absence d'anomalie (tableau 2). Si l'aléa est élevé, on fait réaliser dans les meilleurs délais les travaux de mise en sécurité (remblayage, confortement ...). Dans les situations intermédiaires où le diagnostic de stabilité est incertain, on peut procéder à une phase de surveillance pour une analyse fine de l'évolution. La phase de surveillance s'effectue généralement par une série d'inspections visuelles détaillées (comparaisons des différents états de relevés géotechniques, type et fréquence d'apparition des désordres, contrôle de témoins ...). Si l'enjeu le nécessite, on peut compléter les inspections par une surveillance instrumentée qui offrira une quantification précise des déformations des excavations.

TABLEAU 2

Principes d'action pour la maîtrise des aléas dus aux exploitations partielles abandonnées

2.5 AUSCULTATION : MESURE DES DEFORMATIONS

L'auscultation d'exploitations partielles abandonnées par mesures de déformation in situ peut être mise en oeuvre lorsque le diagnostic effectué par le géotechnicien conclut à l'incertitude sur l'évolution à terme de la tenue des excavations. L'auscultation apporte les informations qui permettent de conforter l'analyse géotechnique, de diagnostiquer et prévenir de l'approche d'une éventuelle rupture.

La phase de surveillance instrumentée doit permettre à terme d'aboutir à la prise de décision sur l'opportunité d'investissements dans des travaux de mise en sécurité, toujours très onéreux. Elle peut permettre de différer ces investissements en s'assurant que les déformations mesurées demeurent en deçà de seuils critiques (à définir au préalable selon le contexte, la nature des terrains, etc.), voire de phaser les travaux dans le temps en déterminant les secteurs à traiter en priorité.

TABLEAU 3

Principes de surveillance des cavités dans les exploitations partielles abandonnées.

La mesure de déformation des terrains se réalise classiquement à l'aide de dispositifs coulissants installés à poste fixe (figure 6):

- la mesure de la convergence des épontes traduit directement l'effet sur les cavités de la charge liée au poids des terrains ;

- la mesure de l'expansion des piliers traduit l'amorce d'éclatement de ceux-ci sous l'effet d'une charge excessive ;

- la mesure de l'écartement de fissures caractéristiques complète ce dispositif.

figure 6 :

Principaux types de mesures de mouvements de terrain dans les exploitations partielles

La mesure s'effectue :

- soit à l'aide de capteurs mécaniques à lecture directe, de type comparateurs. Ces matériels offrent l'avantage d'un faible coût de maintenance et une excellente longévité mais obligent la mobilisation d'une équipe pour pénétrer régulièrement dans les anciennes exploitations et relever les mesures, en respectant les procédures de sécurité ;

- soit à l'aide de capteurs électriques ou électroniques qui permettent le déport de la mesure par liaison filaire vers un bornier en surface. Là, les mesures peuvent être relevées manuellement et périodiquement par un agent à l'aide d'un poste de mesure adapté (ohmmètre de précision pour des capteurs potentiométriques). Une centrale d'acquisition et de télétransmission peut également effectuer automatiquement les mesures de l'ensemble des capteurs du site, à une fréquence à définir (6 mesures par jour par exemple), et éventuellement déclencher des alarmes en cas de dépassement des seuils préétablis pour le site (seuils de déformation, seuils de vitesse ou d'accélération).

De tels systèmes doivent avoir une précision de l'ordre de 10 microns et résister à l'atmosphère saturée du milieu ambiant, parfois corrosive. Lorsque qu'il existe de fortes variations de température sur un site, il est nécessaire d'adopter du matériel en acier invar pour tenir compte de la dilatation thermique des appareillages métalliques.

Ces appareils doivent être judicieusement répartis sur le site à surveiller, en fonction des observations établies lors de l'élaboration de la carte géotechnique. Un carrefour sera surveillé par une canne de convergence placée au centre de celui-ci. Un pilier sera surveillé par 2 cannes de convergence de part et d'autre de celui-ci et, éventuellement, par un expansomètre placé à mi-hauteur en son coeur.

L'allure des différentes courbes de déformation en fonction du temps permet classiquement de porter un diagnostic général quant à l'évolution de la stabilité (figure 7) :

- une courbe amortie témoigne d'une évolution vers la stabilité,

- une courbe linéaire indique une certaine ambiguïté sur les conditions de stabilité et peut, par exemple, dans le cas de la craie mesurer son fluage.

- une courbe avec accélération révèle une évolution probable vers la ruine en l'absence de mesures confortatives.

figure 7 :

Types de courbes de déformation en fonction du temps

Ce type d'auscultation nécessite cependant que les anciens travaux soient accessibles dans des conditions d'hygiène et de sécurité acceptables (absence de risques liés à la présence de gaz toxiques, absence de risque d'effondrement imminent ...).

Dans le cas contraire, il peut être envisagé de surveiller l'activité du massif instable par l'écoute micro-sismique, comme cela est mis en oeuvre par l'INERIS notamment pour la surveillance de sites dans le bassin ferrifère lorrain.

2.6 MESURES ET ESSAIS IN SITU

Les mesures in situ visent essentiellement à quantifier les effets induits de l'excavation sur le milieu et non observables visuellement. Elles complètent les observations directes de la carte géotechnique.

Les investigations sur les piliers permettent d'évaluer leur état de fissuration à coeur (macro et micro-fissuration) et, in fine, d'apprécier leur capacité portante effective. Les techniques usuelles sont l'examen endoscopique, l'auscultation ultra-sonique, la tomographie sismique ou le radar géologique.

L'endoscope est le plus généralement mis en oeuvre. Il permet d'examiner l'épaisseur des bancs du toit et de localiser les décollements au niveau de joints de stratification, de contrôler l'état de fracturation d'un pilier...

L'évaluation directe des sollicitations encaissées par les piliers peut s'effectuer par des mesures de contrainte basées sur le principe du relâchement des contraintes par la méthode du vérin plat ou par celle du surcarottage.

2.7 CARACTERISATION GEOMECANIQUE

Les prélèvements d'échantillons intacts, recueillis généralement par carottage, permettent d'appréhender les caractéristiques géomécaniques des différents bancs des piliers et du toit à prendre en compte dans les calculs de stabilité. Les prélèvements doivent être en nombre suffisant et judicieusement répartis pour apprécier la dispersion des résultats et leur variabilité sur toute l'étendue de la carrière.

Le principal essai destiné à l'estimation de la capacité portante des piliers est la résistance à la compression (essai uniaxial voire triaxial) sur des éprouvettes avec enregistrement de la courbe effort-déformation (à sec et sur échantillons saturés). Cet essai permet de déterminer la résistance maximale à la compression simple R_C (dans le cas d'une compression monoaxiale), la limite élastique R_E, le module de déformation longitudinale E, le coefficient de Poisson ν.

La tenue des bancs du toit s'apprécie par les essais de résistance à la traction indirecte (essai brésilien) et les essais de résistance à la flexion.

L'effet du temps sur le comportement de matériaux évolutifs comme la craie peut être mis en évidence par des essais de chargement cycliques sous contrainte monoaxiale ou par essais de fluage sous charge constante. La prédisposition au fluage de la craie est essentiellement liée à sa teneur en minéraux argileux et à leur sensibilité à l'eau.

D'autres tests d'identification complémentaire comme la teneur en eau, la masse volumique, la porosité, la célérité des ondes longitudinales (mesures ultrasoniques), la teneur en carbonate de calcium, la teneur en argiles sont classiquement réalisés.

2.8 EVALUATION DE LA STABILITE

S'il existe d'importantes variations des taux de défruitement ou de la géométrie des travaux, ou de fortes variations géologiques latérales des terrains, l'évaluation des conditions de stabilité doit être effectuée pour chaque grand secteur où les conditions demeurent homogènes.

Pour les exploitations peu complexes et peu profondes, on utilise des modèles de comportement simples pour évaluer la stabilité des piliers (modèle de l'aire tributaire) ou du toit (modèles de poutre ou de plaque) :

- Le modèle de l'aire tributaire (figure 8) permet d'évaluer la contrainte moyenne verticale S qui s'exerce sur les piliers, principalement pour les cas d'exploitation où les dimensions des piliers sont réduites, avec des élancements supérieurs à 2. Il établit l'hypothèse que la charge des terrains de recouvrement est entièrement et également répartie sur tous les piliers. La contrainte verticale moyenne S augmente donc dans le pilier avec le taux de défruitement τ et la profondeur de l'exploitation H tel que :

$$S = 100\,\gamma\,H / (100 - \tau)$$

avec S = contrainte verticale en kPa

γ = poids volumique du recouvrement en kN/m^3

H = hauteur du recouvrement en m

τ = taux de défruitement moyen en %

Dès que le taux de défruitement dépasse 50%, une faible variation de celui-ci entraîne une forte augmentation de la contrainte dans le pilier.

figure 8 :

Calcul de la charge sur les piliers, méthode de l'aire tributaire

- Les modèles relatifs à la charge appliquée aux dalles du toit permettent d'analyser les mécanismes de comportement des terrains en fonction de la stratification du milieu et de la configuration des galeries. Il s'agit classiquement de modèles bidimensionnels de poutre, sur appuis simples ou encastrée aux extrémités. Ils s'appliquent aux cas simples de toits bien stratifiés avec des bancs d'épaisseur décimétriques à métrique et une fracturation naturelle constante. On utilise pour les exploitations par chambres et piliers des modèles tridimensionnels de dalle tels que le modèle de plaque de Timoshenko (1961). La modélisation considère des plaques carrées ou rectangulaires avec appuis rigides simples ou bords encastrés sur 4 piliers de section carrée.

Dans le cas d'exploitations complexes (multiniveaux), on utilisera de préférence les méthodes de calcul numérique par « éléments finis » ou « éléments distincts ». Ces techniques permettent de déterminer les valeurs des contraintes et des déformations avec une grande précision en tout point de la structure étudiée. Le principe repose sur la division du modèle d'étude en un grand nombre de sous-domaines ou éléments dont la dimension est choisie par l'utilisateur en fonction des objectifs de l'analyse et de la précision souhaitée.

2.9 TRAITEMENT, CONFORTEMENT

Les mesures de protection actives destinées à sécuriser les sites d'exploitations partielles peuvent conduire, selon les cas, les enjeux et les moyens financiers disponibles, soit à supprimer les vides par diverses techniques de remplissage ou par des techniques de torpillage contrôlé des piliers et de foudroyage du toit, soit à conserver ces vides, en confortant les terrains par des techniques de renforcement ou de comblement partiel (figure 9).

TABLEAU 4

Principes de traitement des cavités.

figure 9 :

Principaux types de traitement des cavités.

Les mesures de protection passives consistent à adopter des dispositions constructives particulières par un renforcement de la structure (chaînages, fondations superficielles renforcées) ou la réalisation de fondations profondes dont le rôle est de reporter les charges en dessous du niveau de carrière (construction sur pieux forés ou puits).

3 CAS DES CARRIERES DU NORD

Le CERCHAR puis l'INERIS ont engagé depuis plus de 20 ans d'importantes études sur la stabilité des carrières du département du Nord, en collaboration avec le Service d'Inspection des Carrières Souterraines (SDICS). Ces travaux ont donné lieu à de nombreuses publications. Ils ont notamment permis de perfectionner les méthodes de diagnostic de stabilité, de mettre au point des méthodes et matériels de mesure de déformation, de tester les méthodes de stabilisation ou de confortement largement en usage aujourd'hui.

Les carrières inventoriées du département du Nord, de l'ordre de 250, concernent une superficie de 2000 ha. Elles sont localisées essentiellement dans la région lilloise, le Valenciennois et le Cambraisis. Il s'agit de carrières souterraines développées sur un seul niveau d'exploitation dans la craie sénonienne ou turonienne. La craie a été utilisée comme pierre à bâtir, pierre à chaux ou à des fins d'amendement agricole (pratique du marnage).

La profondeur de ces carrières était limitée par le niveau phréatique de la nappe de la craie, le maximum étant de 30 m. Les piliers de ces excavations sont donc souvent baignés par la nappe, au moins en hautes eaux et, l'atmosphère y est relativement saturée, avec une température stabilisée à 10-11 degrés.

3.1 TYPES D'EXPLOITATION

On rencontre 3 types d'exploitations partielles développées généralement à partir de puits verticaux, ces différents types d'exploitation pouvant se rencontrer sur un même site :

- les exploitations par chambres et piliers. Les galeries ont une largeur de 1,5 à 3 m pour une hauteur moyenne de 2,5 à 3 m. Les piliers abandonnés ont une section souvent peu importante, de 2,5 à 3 m^2. Leurs contours sont plus ou moins réguliers selon l'état de fracturation du massif. Le taux de défruitement de ce type d'exploitation peut atteindre les 90 %. Dans la région de Lézennes, les galeries sont plus hautes (3 à 3,50 m) et plus larges (4 à 5 m), les piliers plus massifs assurent un taux de défruitement moins élevé, de 60 à 70% ;

- les exploitations par galeries parallèles (ou filantes), typiques de l'industrie chaufournière. Les sections voûtées de ces galeries sont parfois très élancées comme à Saint-Saulve où leur largeur est de 1,5 à 3 m pour une hauteur de 4 à 6 m, voire 8 m ;

- les exploitations par catiches sont constituées d'une série de puits coalescents en forme de bouteille. Elles sont particulières à la région lilloise, notamment dans le secteur de Fâches-Thumesnil. La nappe de la craie dans la banlieue sud de Lille limitait leur profondeur à une quinzaine de mètres.

3.2 TYPOLOGIE DES DESORDRES

La craie des carrières du Nord est particulièrement diaclasée, avec une forte perméabilité de fissure. Son comportement géomécanique est intermédiaire entre celui d'un sol et celui d'une roche.

Les désordres les plus couramment observés dans ces carrières concernent :

- le délavage des parements des galeries à la faveur des discontinuités (failles et diaclases) ;

- le poinçonnement et la rupture des piliers sous-dimensionnés et fracturés peuvent aboutir à des effondrements en surface plus ou moins importants selon le nombre de piliers rompus ;

- les montées de voûte aux carrefours conduisent à l'apparition de fontis individualisés en surface ou à des effondrements. Les effondrements sont d'autant plus conséquents lorsque plusieurs montées de voûte se rejoignent, du fait de terrains de recouvrements plastiques, comme ce fut le cas à Petite Forêt en 1966 et à Saint-Martin-au-Laert en 1973 ;

- la rupture du bouchon en tête de catiche, ou des catiches elles mêmes. En raison de leur volume, ces effondrements peuvent être très spectaculaires et créer de sérieux dommages en zone urbaine.

3.3 ESSAIS GEOMECANIQUES

Les études sur le comportement géomécanique de la craie ont démontré qu'il s'agissait d'un matériau visco-plastique, peu déformable et faiblement résistant, sensible à l'eau et au temps (phénomène de fluage).

Les craies blanches sénoniennes de la région de Lille et de Valenciennes présentent ainsi des résistances à la compression simple de 10 MPa à l'état sec et voisines de 5 MPa à l'état saturé. Les craies glauconieuses d'Hordain donnent des résistances à la compression simple de l'ordre de 4 MPa à l'état saturé.

Des essais de chargement cyclique réalisés à l'époque au CERCHAR sur la craie glauconieuse et destinés à mettre en évidence le phénomène de fatigue, ont fait apparaître une diminution finale de résistance égale en moyenne à 36% de R_C avec des niveaux de contrainte compris entre 70 à 90% de la limite élastique R_E.

Pour la craie, la valeur de référence de la contrainte admissible à long terme R_U adoptée dans les calculs du coefficient de sécurité est généralement de 50 % de la résistance à la compression simple à l'état saturé afin de tenir compte du phénomène de fluage, de l'effet d'échelle et de l'hétérogénéité de résistance des différents bancs.

3.4 CARRIERES AUSCULTEES, BILANS

Entre 1974 et 1981, une quinzaine de carrières ont été instrumentées à l'aide de cannes de convergence et d'expansomètres équipés de comparateurs (SCHWARTZMANN et BIVERT 1986). 116 cannes de convergence et 56 expansomètres ont ainsi été installés, dans le cadre d'un programme de recherche financé par le ministère de l'Industrie, à Hordain, Cambrai, Marly, Saint-Saulve, Lézennes, Estreux, Valenciennes, Malincourt, Villers-Outreaux, Fâches-Thumesnil.

TABLEAU 5

Bilan des carrières souterraines du département du Nord équipées de sytèmes de mesure de déformations

CV : convergencemètres

EXP : expansomètres

Un certain nombre de ces appareils est toujours fonctionnel au bout de 23 ans. Le SDICS est en charge du relevé de ces appareils lors de visites périodiques, généralement annuelles.

Par ailleurs, 5 sites de l'agglomération lilloise ont été instrumentés par le CERCHAR entre 1983 et 1987 avec des cannes de convergence équipées de capteurs potentiométriques pour le compte de la CUdL. Les données acquises automatiquement sont télétransmises, au poste de régulation, par liaison téléphonique spécialisée, à un rythme horaire.

Les vitesses de déformation observées dans ces carrières abandonnées sont relativement faibles comparativement aux sites en exploitation : de l'ordre de quelques dizaines à centaines de microns par an.

La banque de données des mesures issues de ces différents sites a permis de caler les seuils de vitesse au delà duquel des actions de traitement doivent être entreprises, pour le cas des anciennes carrières de craie du Nord.

TABLEAU 6

Vitesses critiques de déformation dans les carrières souterraines de craie du Nord

(SCHWARTZMANN, BIVERT, DELPORTE, 1989)

- Pour des déformations inférieures à 100 microns par an, on n'observe pas ou peu d'évolution apparente des dégradations dans les carrières. On mesure essentiellement le phénomène de fluage à long terme de la craie (quelques dizaines de microns par an).). A Malincourt et à Valenciennes-Glacis, ce gradient n'est que de 20 à 30 microns/an et mesuré depuis 1981. A Estreux, il est particulièrement linéaire depuis 1978, entre 30 et 90 microns/an, avec quelques chutes de toit (figure 10).

  figure 10

  Carrière d'Estreux, mesures de convergence 1978-1996

  Gradient de vitesse linéaire

- A partir d'un certain seuil de vitesse (100 à 300 microns par an) on commence à voir apparaître des petits désordres évolutifs sur le site : chutes de blocs fréquentes, délavements de piliers ... A Marly, on observe depuis 1974 un gradient de vitesse linéaire qui atteint 110 microns par an dans une craie très diaclasée, avec une dégradation très lente des épontes (figure 11).

  figure 11

  Carrière de Marly, mesures de convergence 1975-1997

  Gradient de vitesse linéaire

- Au delà de 300 microns par an, l'évolution des dégradations devient beaucoup plus sensible et la ruine de la carrière doit être envisagée à plus ou moins long terme.

A Fâches-Thumesnil, les gradients mesurés dans une carrière de type catiche ont atteint les 220 microns par an et s'accompagnaient de nombreux signes de dégradation de type rupture de pilier et chutes de blocs (figure 12). Compte-tenu du volume des vides de ces catiches et des risques engendrés par leur rupture en zone urbaine, un programme de comblement a pu être mis sur pied par le SDICS pour traiter l'ensemble du site sous les différents domaines concernés (communautaire, communal, privé ...).

figure 12

Carrière de Fâches-Thumesnil, mesures de convergence 1989-1994

Gradient de vitesse linéaire, effet d'un délavement de pilier à proximité d'une canne de convergence

La validité des modèles d'alarme reposant sur l'accélération des gradients de déformation a pu être vérifiée sur le site de la carrière de Saint-Saulve (figure 13) et de la carrière d'Hordain-Simca (figure 14). Des éboulements ou effondrements localisés se sont manifestés par une accélération brutale des déformations perceptible sur plusieurs appareils de mesure disposés au voisinage, plusieurs semaines voire plusieurs mois avant la rupture. Ceux-ci sont survenus alors que les déformations cumulées avaient atteint plusieurs millimètres et ont été précédées d'une nette recrudescence des petits désordres (chutes de blocs, apparition de fractures dans les piliers). A Lézennes (figure 15), une expérimentation a permis, en 1977, de mesurer directement l'incidence du dégraissage d'un pilier sur la tenue du toit avec une accélération immédiate des convergences puis un amortissement caractéristique, avec un gradient de déformation linéaire de 50 microns/an.

figure 13

Carrière de Saint-Saulve, mesures de convergence 1975-1987

Accélération des convergences avant effondrement

figure 14

Carrière de Hordain-Simca, mesures de convergence 1976-1990

Accélération des convergences au voisinage d'une zone effondrée

figure 15

Carrière de Lézennes, mesures de convergence 1976-1994

Accélération des convergences puis amortissement après dégraissage expérimental d'un pilier

4 CONCLUSIONS

Les outils et techniques disponibles aujourd'hui pour établir le diagnostic de stabilité des exploitations partielles abandonnées, lorsque celles-ci demeurent accessibles, permettent l'élaboration d'une gestion du risque adaptée.

Ces diagnostics débouchent le plus souvent sur une analyse en terme de dangers et sur une meilleure orientation des plans d'occupation des sols au travers des cartes d'aléas ou de vulnérabilité, dans le cadre de plans d'exposition au risque « mouvements de terrains ».

Les méthodes d'auscultation par des systèmes coulissants (cannes de convergence, expansomètres, fissuromètres) offrent la possibilité de télésurveiller l'évolution des déformations et de déceler suffisamment tôt les cavités instables à court ou moyen terme. Ces méthodes, bien adaptées à la surveillance à long terme de cavités en zone urbaine, permettent une meilleure planification des investissements dans les nécessaires travaux de confortement, toujours très onéreux.

Lorsque les exploitations partielles demeurent inaccessibles et que leur évolution menace la sécurité des biens et des personnes, comme c'est le cas de nos jours au droit des anciennes mines de fer lorraines, il est nécessaire de faire appel à des techniques innovantes pour cerner les zones les plus vulnérables, en complément aux études classiques réalisables depuis la surface ou à l'analyse des documents miniers accessibles. Une des voies actuelles de recherche sur laquelle travaille l'INERIS est le suivi micro-sismique de l'activité des mouvements de terrain.

5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BONVALLET J., DEJEAN M., SCHWARTZMANN R., 1977

Etude de stabilité d'une carrière souterraine. Le cas des carrières de Hordain (59).

Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment, n°36, septembre, p. 89-91

BONVALLET J., 198.

Une classification géotechnique des craies du nord utilisée pour l'étude de stabilité des carrières souterraines.

Revue française de Géotechnique, n°8, p. 8-14.

BONVALLET J., CHAMBON C., 1980

Détermination d'un coefficient de sécurité dans les exploitations par chambres et piliers abandonnées

Revue Française de Géotechnique, n°3, nov.

DELBECQ J.M., 1977

La sécurité des carrières souterraines abandonnées dans la région Nord - Pas-de-Calais.

Industrie Minérale - mars. p. 129 - 146

DELPORTE R., DHONDT C., BIVERT B., SCHWARTZMANN R., 1987

Télésurveillance des carrières souterraines à la CUdL.

Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment, n°50, décembre, p. 175-178

DURVILLE J.L., HAMEROUX M.., 1995

Carrières souterraines abandonnées. Risque et prévention : Stratégies et méthodes de prévention.

Synthèse des travaux du séminaire de Nainville-les-Roches (déc. 1993)

Bul. de l'Ass. Int. de Géologie de l'Ingénieur. n°51, p. 114-127.

GHOREYCHI M., 1983

Stabilité d'exploitations partielles avec piliers en état de post rupture.

Application au cas des carrières souterraines de craie.

Thèse Doc. Ing., INPL, Nancy

GLORIES P., DEJEAN M., 1983

Télésurveillance des ouvrages de génie civil et miniers. Mise au point et essais du dispositif CERCHAR à la mine de Rochonvillers.

Industrie Minérale - Mines et carrières - Les Techniques, mars. p. 132 - 137.

HELAL H., 1982

Etude et développement d'une méthode de mesure des contraintes par surcarottage. Application à l'étude de stabilité d'ouvrages souterrains.

Thèse Doc. Ing., INPL, Nancy

HUNT D.J., REDDISH D.J., 1997

The stability implications of groundwater recharge upon shallow, abandonned mineworking in the U.K.

Engineering Geology and the Environment, Balkema, p. 2425-2430

JOSIEN J.P., 1977

Surveillance de la stabilité d'une exploitation par des mesures de déformation. Choix d'une méthode d'alarme.

Annales des mines n°3, mars, p. 51-62.

JOSIEN J.P., SCHWARTZMANN R.,1987

Aménagement des anciennes cavités : traiter ou surveiller ?

Annales des mines, octobre, p. 1-5.

JOSIEN J.P., 1995

Carrières souterraines abandonnées. Risque et prévention : Diagnostic et caractérisation des aléas.

Synthèse des travaux du séminaire de Nainville-les-Roches (déc. 1993)

Bul. de l'Ass. Int. de Géologie de l'Ingénieur. n°51, p.96-111.

LACOSTE A.C., PALAT P. 1972

L'inspection des carrières souterraines dans le département du Nord.

Annales des Mines, décembre 1972, p. 27-40

LABASSE H., 1973

Les pressions de terrain dans les carrières souterraines. Coups de toit et coups de charge.

Revue de l'Industrie Minérale - Mines - p.141 - 160

LEPLAT J., 1973

Les cavités souterraines de la craie dans le Nord de la France.

Bul. Liaison Labo. P. et Ch., spécial V, p. 123-148.

MANDEL J., 1959

Les calculs en matière de pression de terrain

Revue de l'Industrie Minérale

MASURE P., 1995

Carrières souterraines abandonnées. Risque et prévention : Gestion des risques et des crises liées à l'instabilité des carrières souterraines abandonnées.

Synthèse des travaux du séminaire de Nainville-les-Roches (déc. 1993)

Bul. de l'Ass. Int. de Géologie de l'Ingénieur. n°51, p.129-137.

PETERSCHMIDT E., 1962

Les enregistrements séismiques des effondrements spontanés du Bassin de Briey

Revue de l'Industrie Minérale, p. 263-281

PINEAU J.L., 1978

Contribution à la caractérisation géomécanique des roches. Application au minerai de fer lorrain.

SCHWARTZMANN R. 1983
Surveillance et télésurveillance des anciennes exploitations.
Industrie Minérale - Mines et carrières - Les Techniques, août - sept. p. 433 - 438.

SCHWARTZMANN R., BIVERT B., 1986
Surveillance des carrières souterraines abandonnées par des mesures de déformation.
Industrie Minérale - Mines et carrières - Les Techniques, août - sept. p. 294 - 303.

SCHWARTZMANN R., FEUGA B., 1989
La sécurité des anciennes carrières souterraines.
Industrie Minérale - Mines et carrières - Les Techniques, février, p. 17 - 23.

TINCELIN E., RIVELINE C., 1965
Eléments d'une politique des stots de protection dans les mines de fer de Lorraine.
Annales des Mines, p. 7 -36

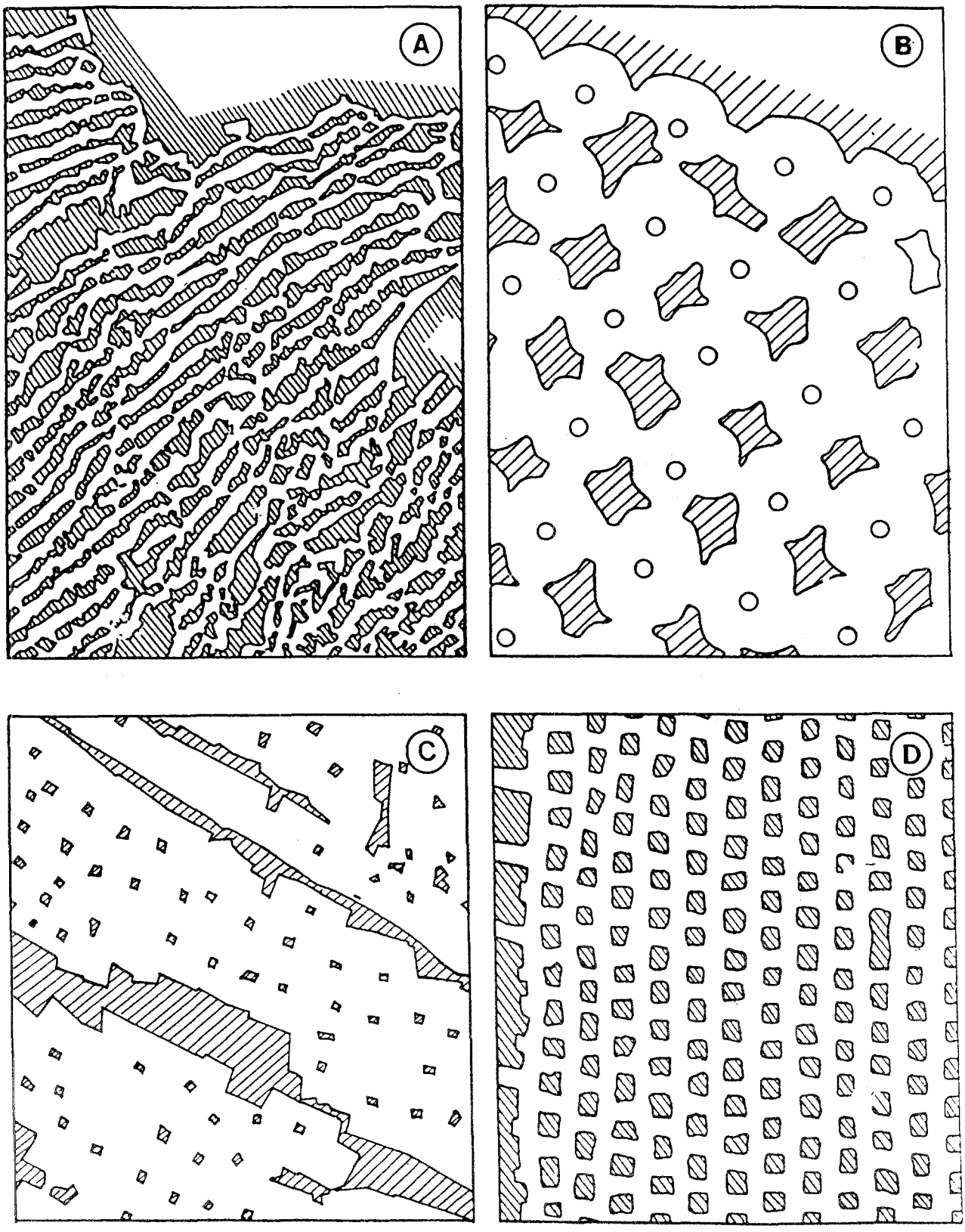
TINCELIN E., 1982
La stabilité de la surface à l'aplomb des exploitations souterraines en mines métalliques ou assimilées. Piliers abandonnés ou îlots.
Industrie Minérale - Les Techniques, février, p. 79-111

TINCELIN E., 1975
La détermination des caractéristiques mécaniques des massifs rocheux à partir des essais en laboratoire.
Annales des Mines, p. 47-56

TOULEMONT M., 1986
Comment un risque devient « naturel ». L'organisation administrative de la prévention des risques dus aux carrières souterraines abandonnées.
Aménagement et Nature, n°113, p.20 - 22.

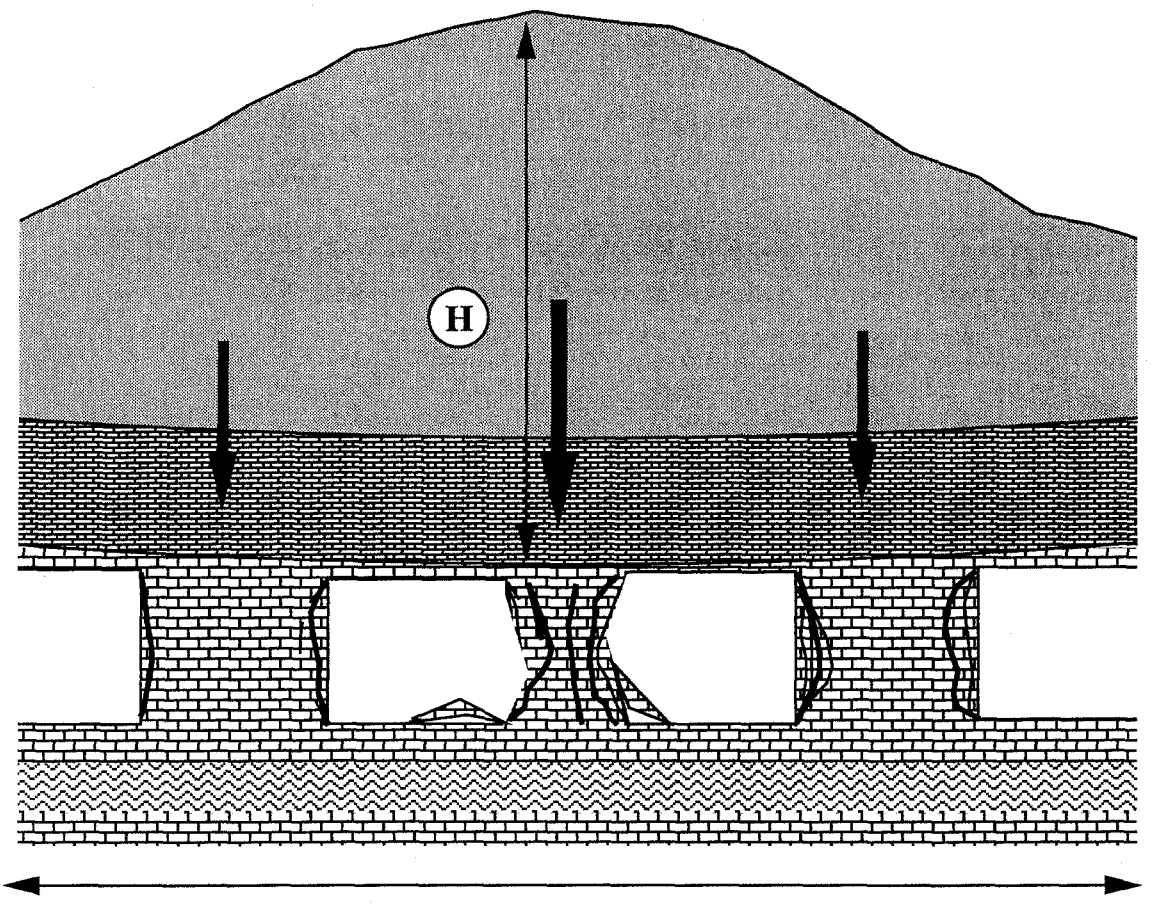
THORIN R.,
Carrières souterraines abandonnées. Elaboration d'un Plan d'Exposition aux Risques.
Aménagement et Nature, n°113, p.22 - 26.

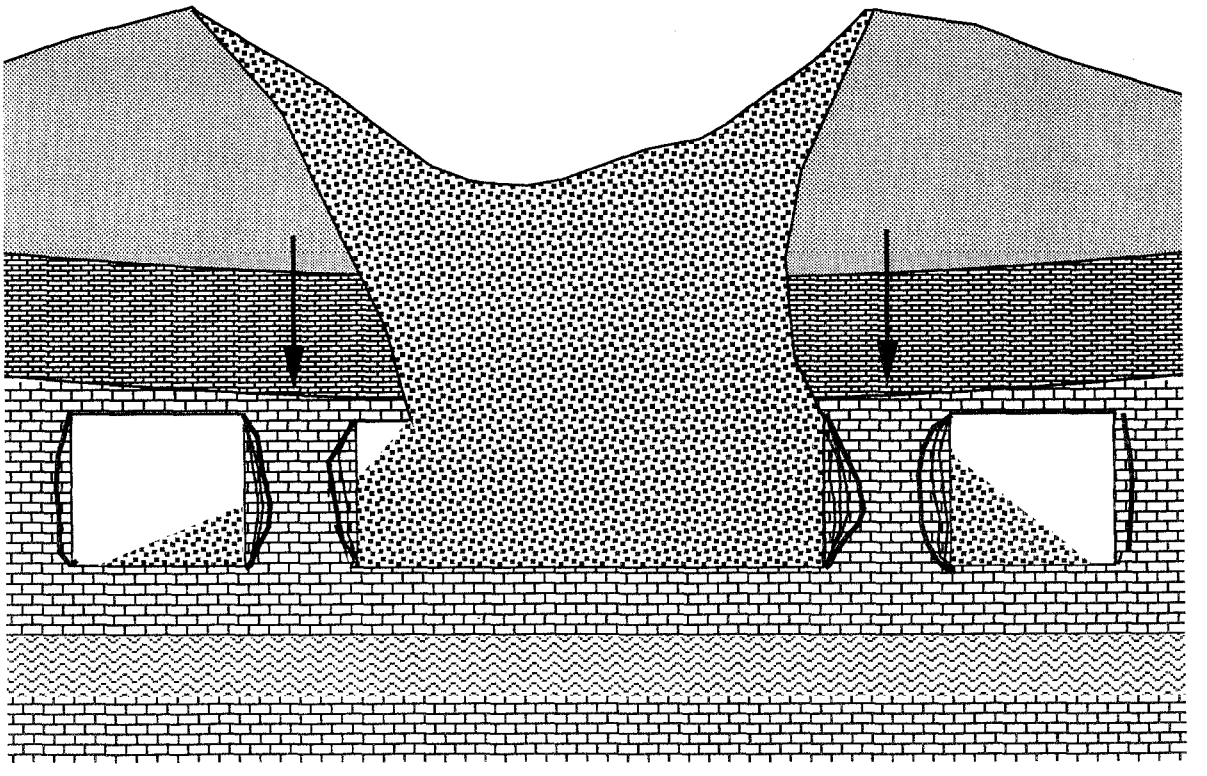
WATELET J.M., DIDIER C., TRITSCH J.J., 1996
Risques en sous-sol - Les carrières souterraines.
Génie Urbain, mars, p. 60 -66



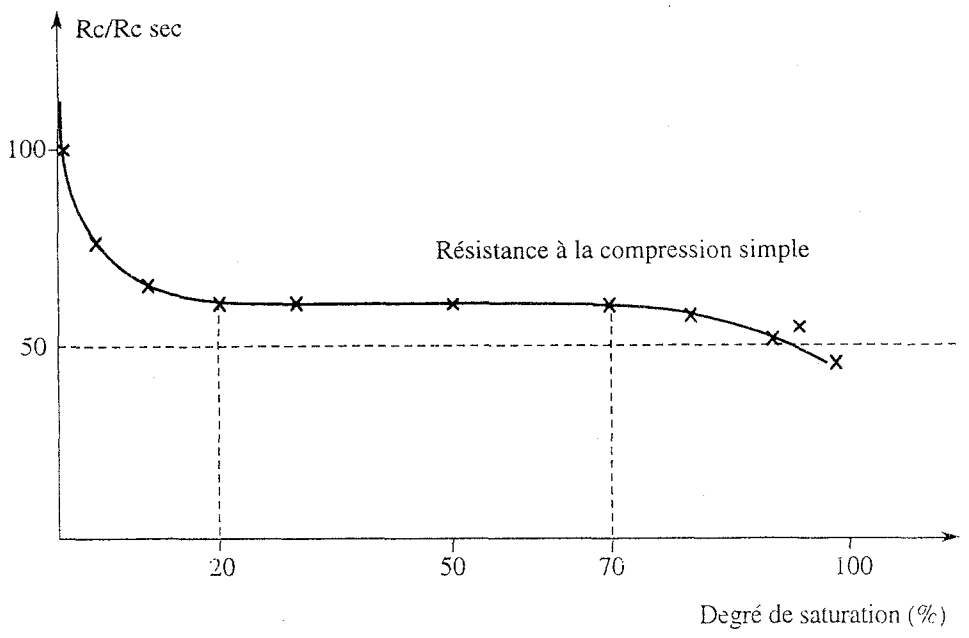
INERIS	Figure 1 Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles
Exemples de géomètries d'exploitations partielles, vues en plans	

A : galeries filantes, parallèles
B : catiches
C : ilôts
D : chambres et piliers

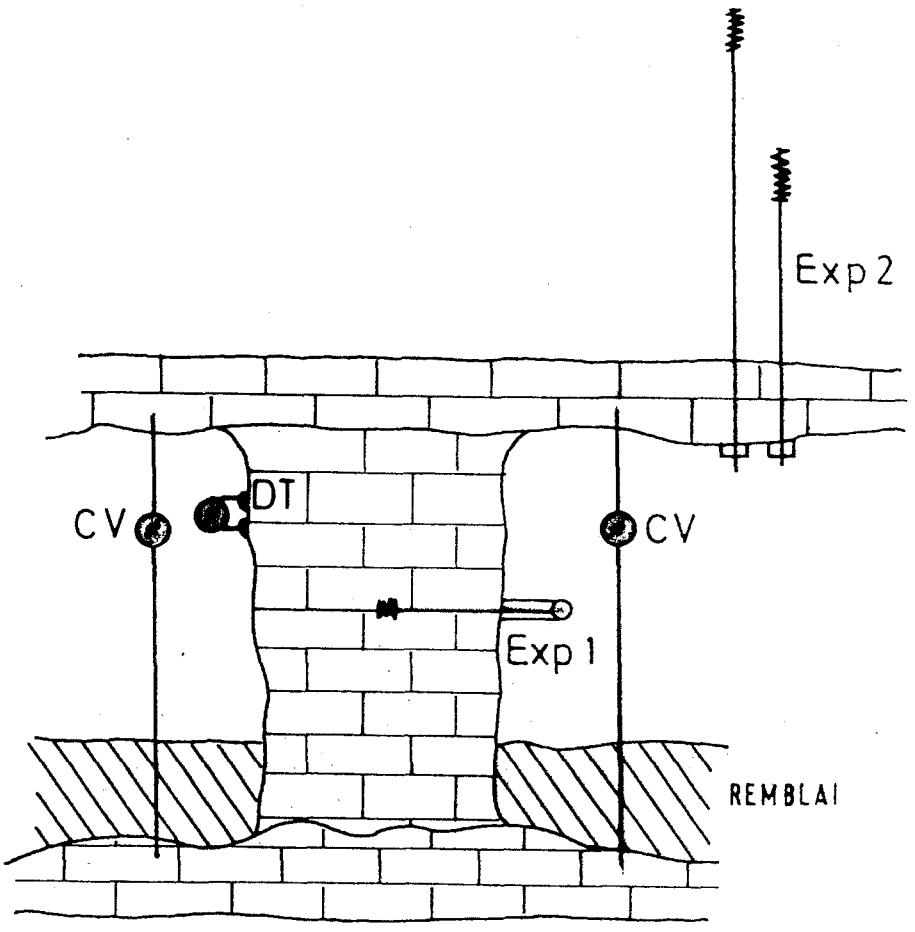




INERIS	Figure 2 Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles
Phénomène d'effondrement localisé par rupture d'un pilier	



INERIS	**Figure 5** **Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles**
Variation de résistance mécanique d'un minerai de fer en fonction de son degré de saturation (Pineau, 1978)	



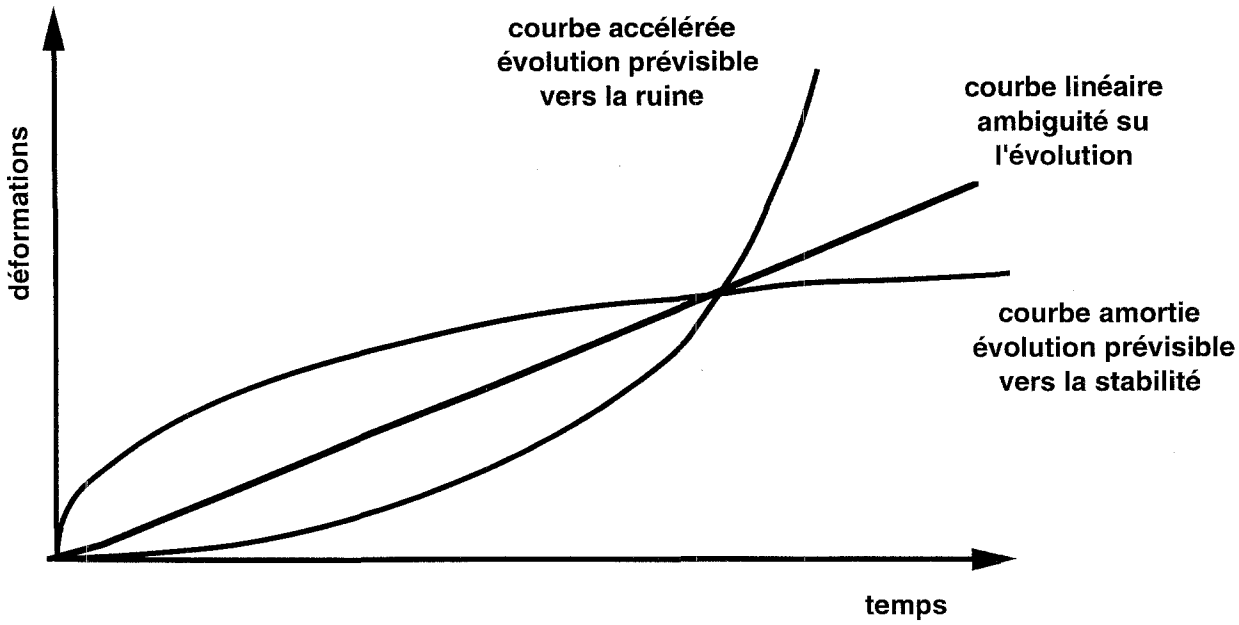
CV = Mesure de convergence entre toit et mur

Exp 1 = Mesure d'expansion de pilier

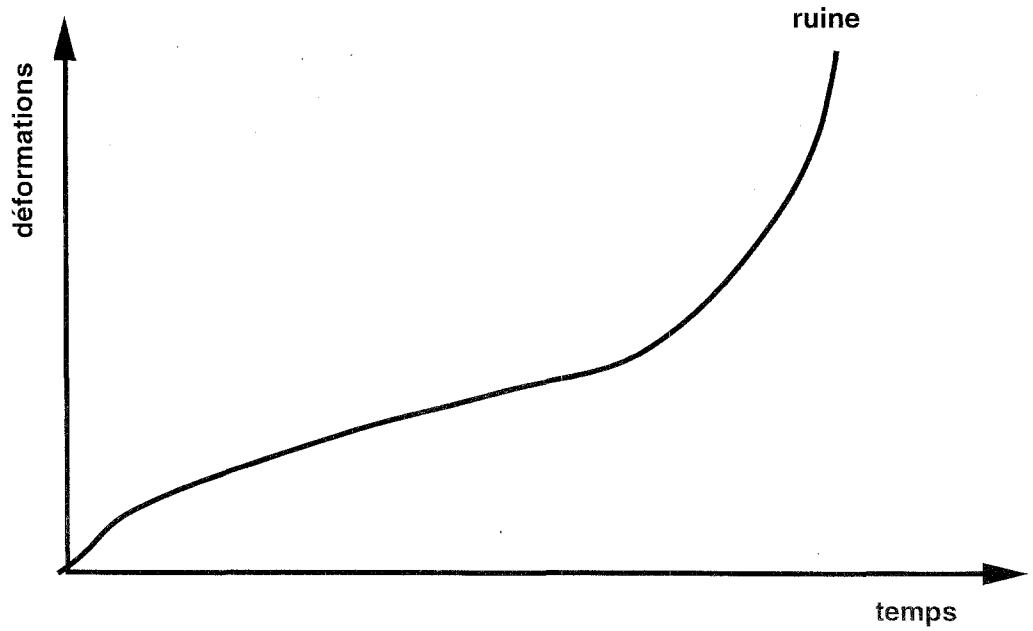
Exp 2 = Mesure d'expansion de toit

DT = Mesure d'écartement de fissure

INERIS	Figure 6 Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles
Principaux types de mesure de déformations dans des exploitations partielles	



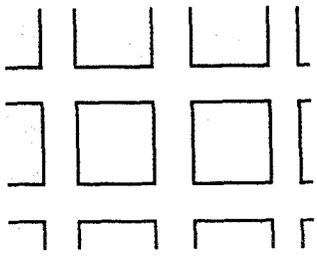
Courbes types

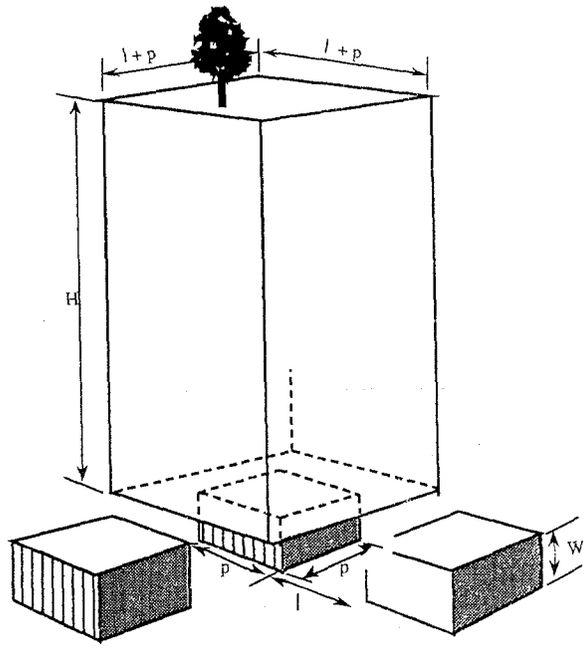


accélération des déformations précédant un
processus de ruine

Types de courbes des déformations en fonction du temps

figure 7

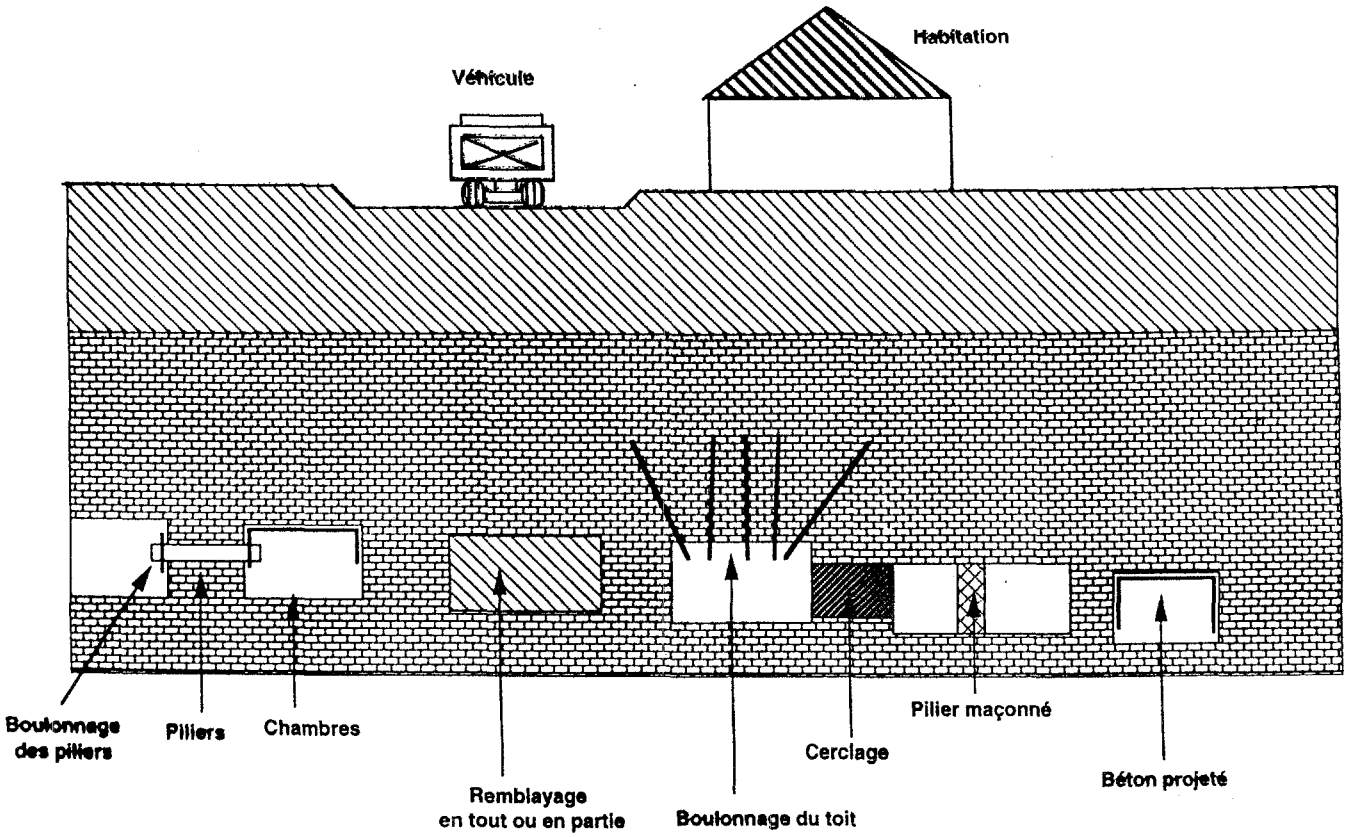




Taux de défruitement pour piliers carrés

$$\tau = \frac{(l+p)^2 - p^2}{(l+p)^2}$$

INERIS	**Figure 8** **Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles**
Calcul de la charge sur les piliers, méthode de l'aire tributaire	



INERIS	Figure 9 Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles
Principaux types de méthodes confortatives	

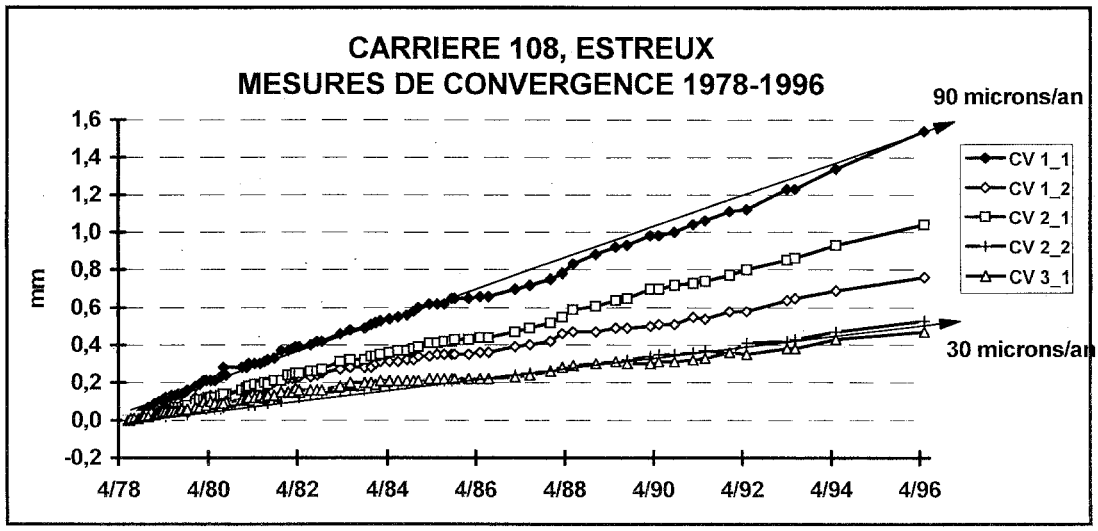

CARRIERE 108, ESTREUX
MESURES DE CONVERGENCE 1978-1996
90 microns/an
30 microns/an
mm
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
-0,2
4/78
4/80
4/82
4/84
4/86
4/88
4/90
4/92
4/94
4/96
CV 1_1
CV 1_2
CV 2_1
CV 2_2
CV 3_1

figure 10

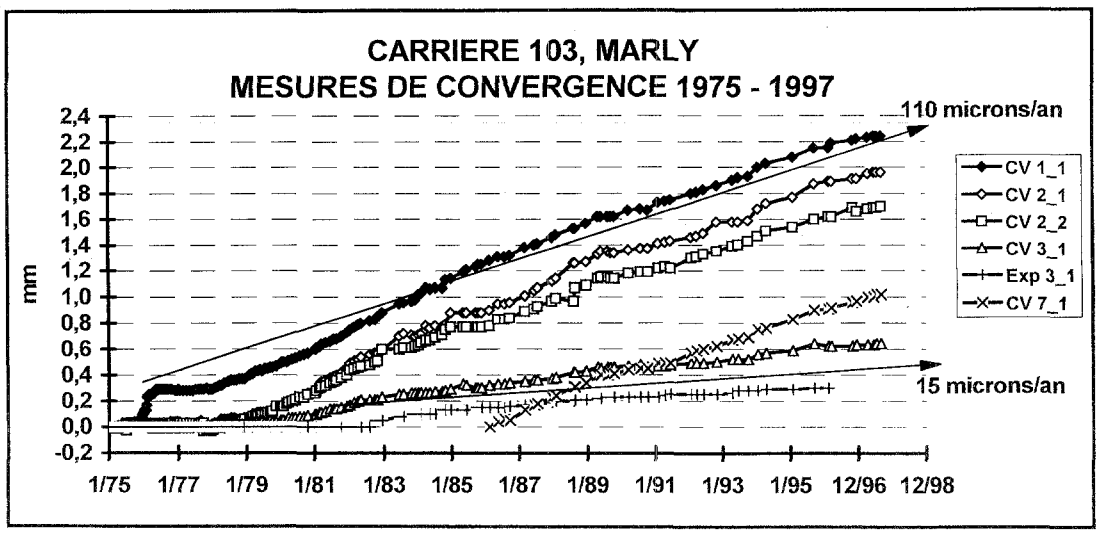

CARRIERE 103, MARLY
MESURES DE CONVERGENCE 1975 - 1997
110 microns/an
15 microns/an
mm
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
-0,2
1/75
1/77
1/79
1/81
1/83
1/85
1/87
1/89
1/91
1/93
1/95
12/96
12/98
CV 1_1
CV 2_1
CV 2_2
CV 3_1
Exp 3_1
CV 7_1

Figure 11

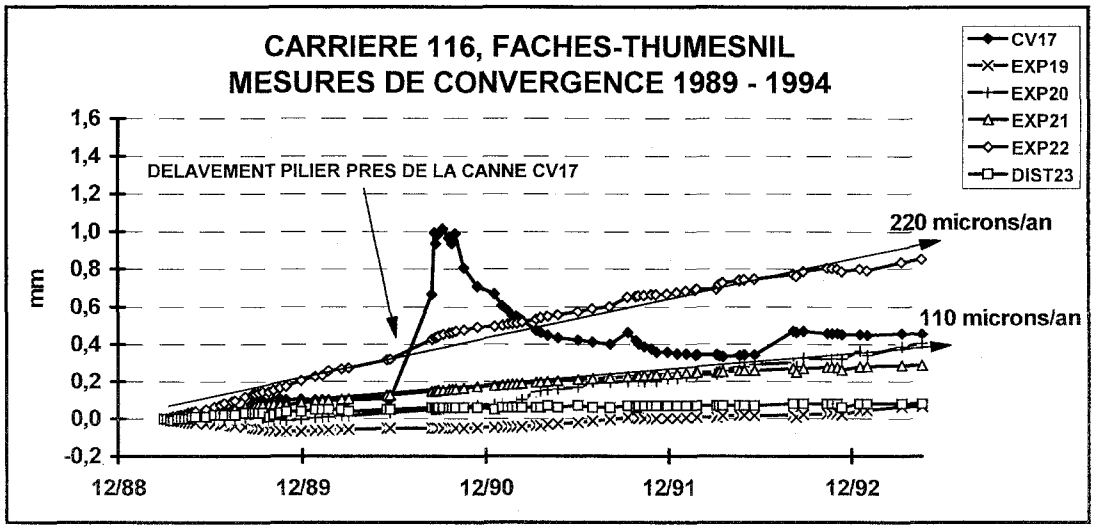

CARRIERE 116, FACHES-THUMESNIL
MESURES DE CONVERGENCE 1989 - 1994
CV17
EXP19
EXP20
EXP21
EXP22
DIST23
DELAVEMENT PILIER PRES DE LA CANNE CV17
220 microns/an
110 microns/an
mm
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
-0,2
12/88
12/89
12/90
12/91
12/92

figure 12

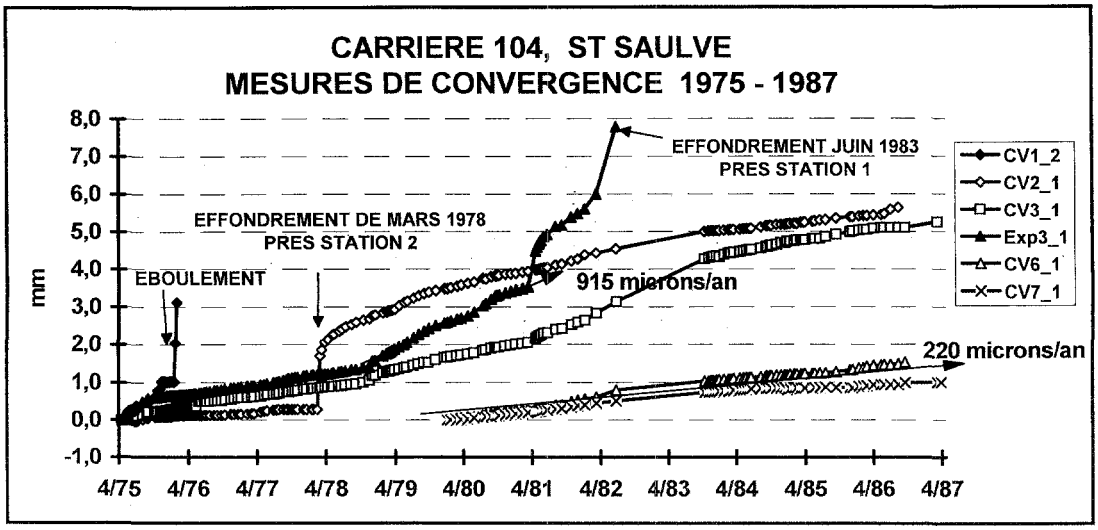

CARRIERE 104, ST SAULVE
MESURES DE CONVERGENCE 1975 - 1987
mm
8,0
7,0
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
-1,0
4/75
4/76
4/77
4/78
4/79
4/80
4/81
4/82
4/83
4/84
4/85
4/86
4/87
EFFONDREMENT JUIN 1983
PRES STATION 1
EFFONDREMENT DE MARS 1978
PRES STATION 2
EBOULEMENT
915 microns/an
220 microns/an
CV1_2
CV2_1
CV3_1
Exp3_1
CV6_1
CV7_1

figure 13

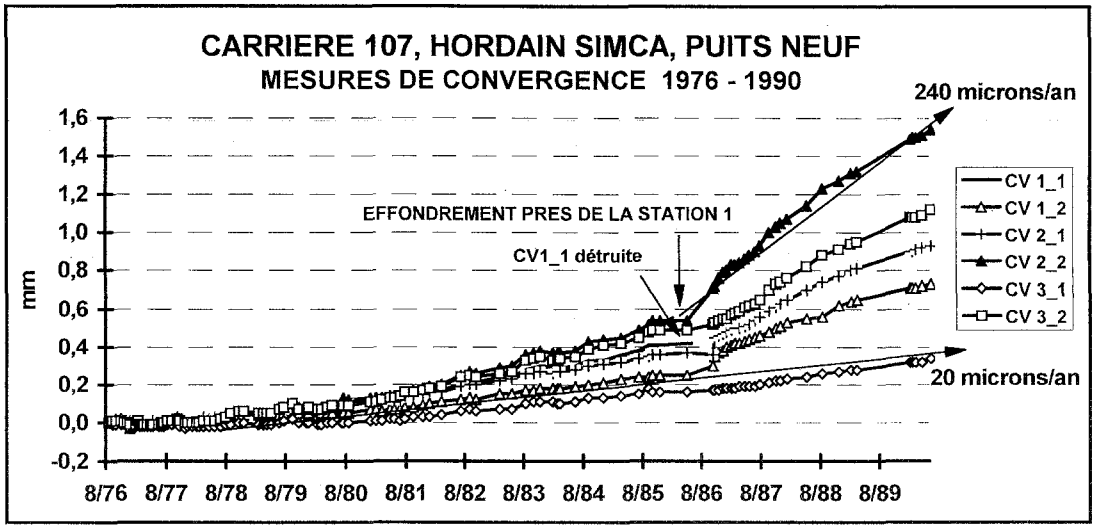

CARRIERE 107, HORDAIN SIMCA, PUITS NEUF
MESURES DE CONVERGENCE 1976 - 1990
240 microns/an
EFFONDREMENT PRES DE LA STATION 1
CV1_1 détruite
20 microns/an
mm
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
-0,2
8/76 8/77 8/78 8/79 8/80 8/81 8/82 8/83 8/84 8/85 8/86 8/87 8/88 8/89
CV 1_1
CV 1_2
CV 2_1
CV 2_2
CV 3_1
CV 3_2

figure 14

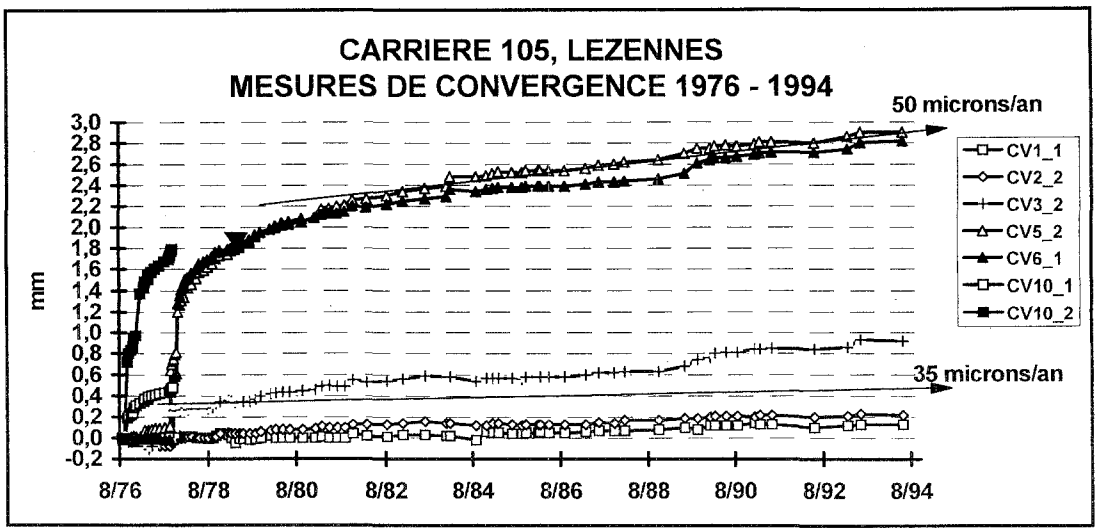
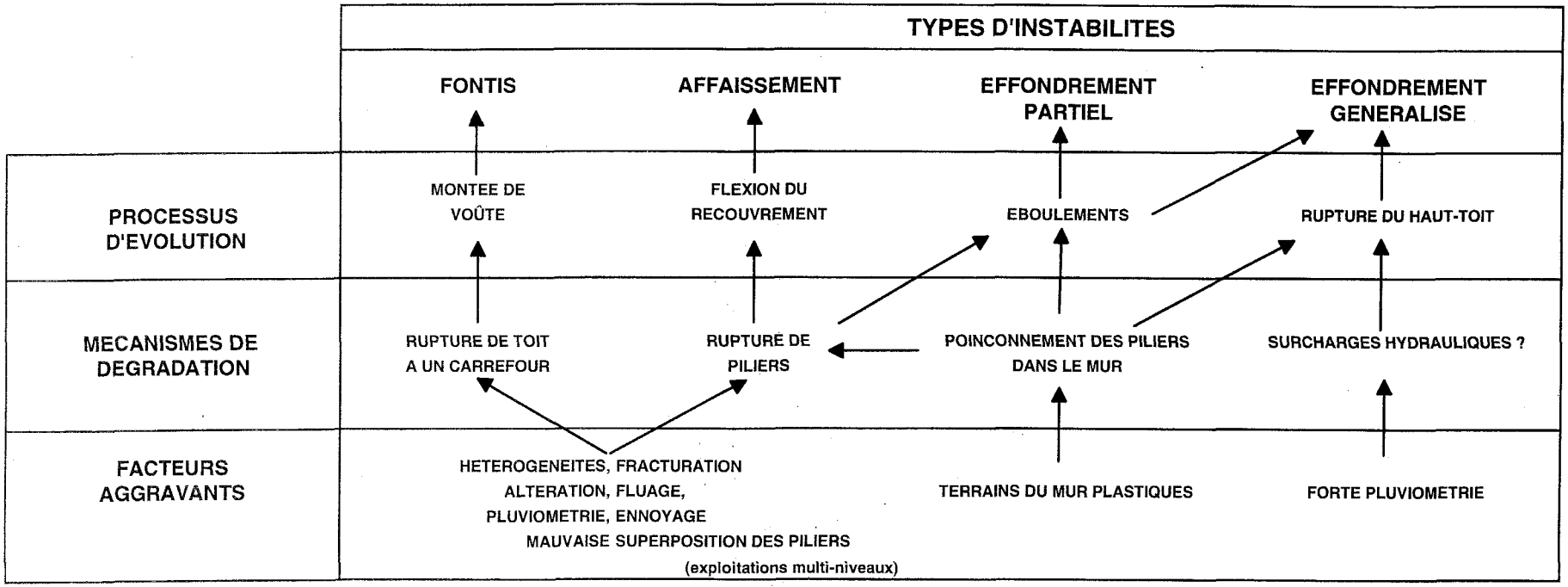
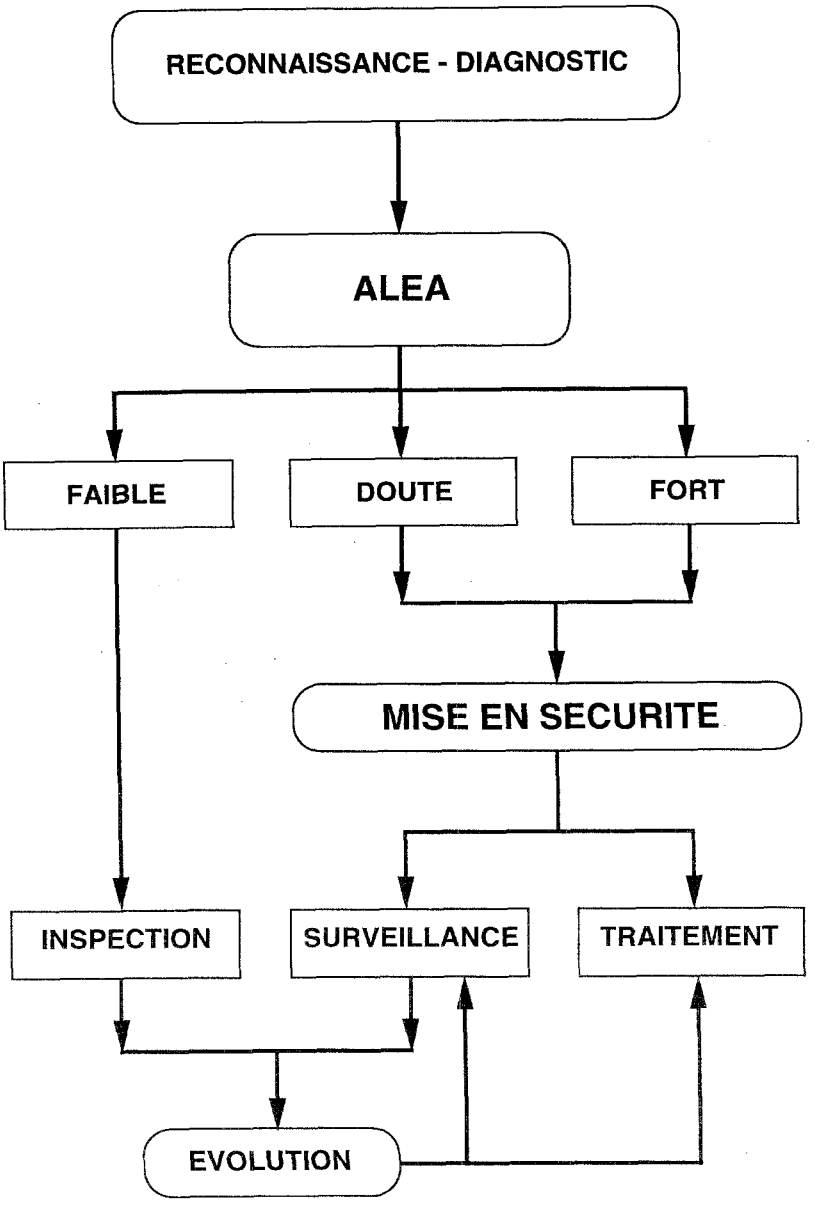

CARRIERE 105, LEZENNES
MESURES DE CONVERGENCE 1976 - 1994
50 microns/an
35 microns/an
mm
3,0
2,8
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
-0,2
8/76
8/78
8/80
8/82
8/84
8/86
8/88
8/90
8/92
8/94
CV1_1
CV2_2
CV3_2
CV5_2
CV6_1
CV10_1
CV10_2

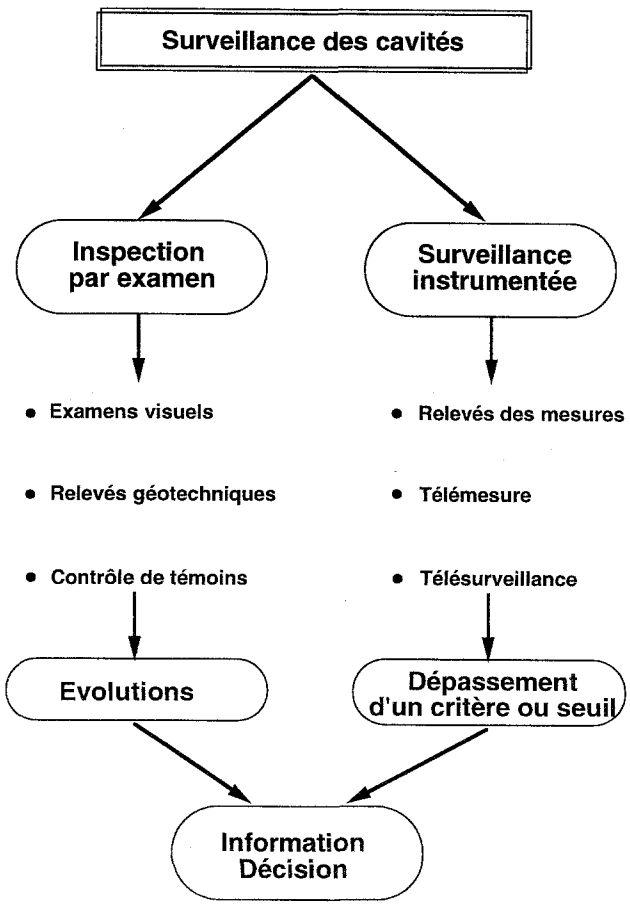
figure 15



INERIS	**Tableau 1** **Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles**
Mécanismes de dégradation des exploitations partielles abandonnées sous-dimensionnées	

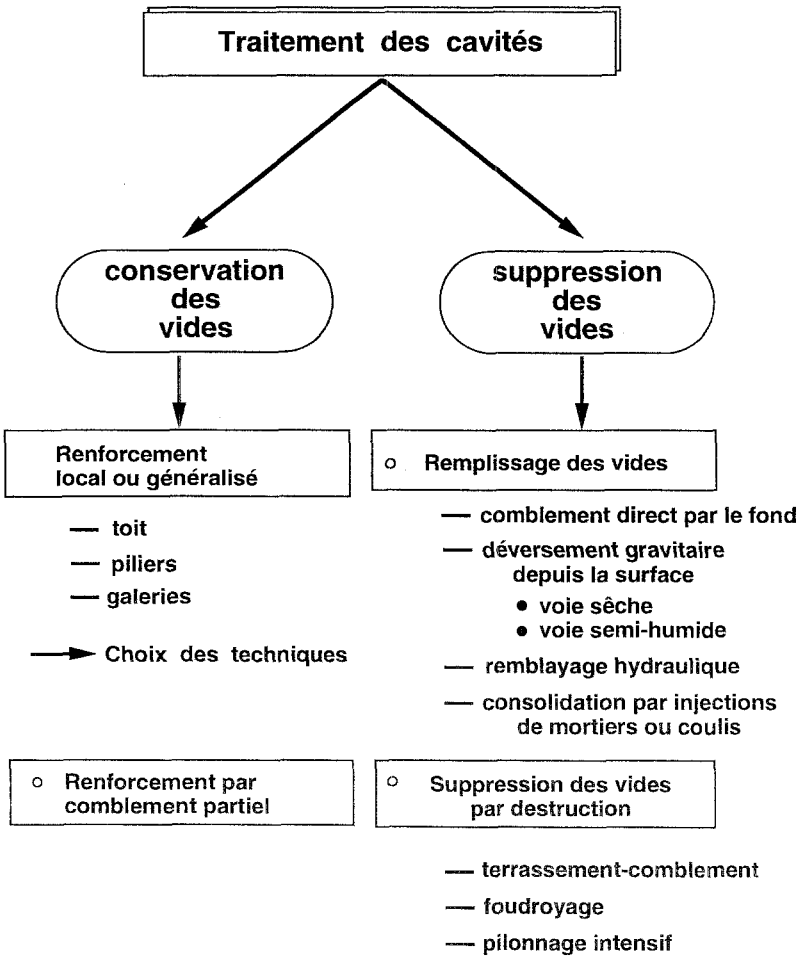


INERIS	Tableau 2 Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles
Principes d'actions pour la maîtrise des aléas dus aux exploitations partielles abandonnées	



INERIS	Tableau 3 Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles
Principes de surveillance des cavités dans les exploitations partielles abandonnées	

MISE EN SECURITE
des
anciennes exploitations souterraines



INERIS	Tableau 4 Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles
Principes de traitement des cavités	

CODE	SITE	Nombre Appareils Cv	Exp*	date premières mesure	date dernières mesures	observations et gradients maximaux observés
101	HORDAIN RN 30	6	7	5/74	4/4/96	40 à 80 microns/an pas d'évolution apparente, malgré piliers rompus **REMBLAYAGE PARTIEL SOUS RN30**
102	CAMBRAI SAINT-GERY	9	3	12/74	2/6/97	25 à 100 microns/an pas d'évolution apparente
103	MARLY	14	3	3/75	3/9/97	20 à 110 microns/an lente dégradation des parements diaclasés **REMBLAYAGE PARTIEL**
104	**SAINT-SAULVE**	**11**	**3**	**4/75**	**9/4/87**	**200 à 1000 microns/an éboulements et effondrements progressifs, REMBLAYEE**
105	LEZENNES PUITS 16	13	6	9/76	19/6/94	25 à 100 microns/an
106	LEZENNES CHICONS	6	6	9/76	1/7/93	10 microns/an pas d'évolution apparente **REMBLAYEE**
107	**HORDAIN SIMCA**	**6**		**9/76**	**6/7/90**	**25 à 240 microns/an piliers rompus, éboulements REMBLAYEE**
108	ESTREUX	5	--	7/78	23/5/96	30 à 90 microns/an piliers rompus, chutes de toit
109	VALENCIENNES GLACIS	14	--	4/80	3/7/97	10 à 25 microns/an pas d'évolution apparente partiellement noyée
110	MALINCOURT PUITS LABELLE	4	--	10/81	22/5/96	20 microns/an pas d'évolution apparente
111	VILLERS-OUTREAUX	2	--	10/81	2/7/93	10 microns/an pas d'évolution apparente
112	SAINT-SAULVE BOIS D'ARDENNE PUITS 1 et 2	5	--	12/85	15/4/97	10 à 20 microns/an pas d'évolution apparente
113	**FACHES-THUMESNIL RN17**	**6**	**--**	**4/86**	**22/3/89**	**50 à 300 microns/an chutes de blocs REMBLAYEE**
114	CAMBRAI GARE	5	--	9/86	2/6/97	25 microns/an pas d'évolution apparente
115	FACHES-THUMESNIL STADE	2	--	4/87	6/5/97	10 microns/an pas d'évolution apprente
116	FACHES-THUMESNIL	1	5	3/89	11/5/93	100 à 220 microns/an ruptures piliers, chutes de blocs, délavements parements REMBLAYEE

BILAN DES CARRIERES SOUTERRAINES DU DEPARTEMENT DU NORD
EQUIPEES DE SYSTEMES DE MESURES DE DEFORMATION PAR L'INERIS
(CV :CONVERGENCEMETRES, EXP : EXPANSOMETRES)

TABLEAU 5 17/02/98

Vitesses moyennes	*Dégradations*
0 - 0,1 mm/an	Aucune évolution apparente, même en présence de toit ou de piliers fissurés.
0,1 - 0,3 mm/an	Petits écaillages, chutes intermittentes de petits blocs. Dégradation lente, de type discontinu.
0,3 mm/an	Chutes de toit, rupture de piliers. Eboulements plus ou moins fréquents, voire effondrement progressif de la carrière.

INERIS	Tableau 6 Analyse et diagnostic des conditions de stabilité des exploitations partielles
Vitesses critiques de déformation dans les carrières souterraines de craie du Nord (Scwartzmann, Bivert, Delporte, 1989)	