

Karsts des craies et calcarénites de la Montagne Saint-Pierre (Basse Meuse liégeoise)

LUC WILLEMS, Joël RODET, Camille EK, Michiel DUSAR, David LAGROU, Matthieu FOURNIER, Benoît LAIGNEL et André POUCKET

RÉSUMÉ

La Montagne Saint-Pierre, retombée du plateau hesbignon entre la basse vallée du Geer et la Meuse, abrite une grande carrière à ciel ouvert et de nombreuses carrières souterraines dont les galeries s'étendent sur des centaines de kilomètres. Ouverts dans les craies et calcarénites crétacées, ces réseaux permettent une observation inédite, en 3-D, de karsts développés dans une roche extrêmement poreuse et perméable, peu susceptible de provoquer une dissolution concentrée. Les plus nombreux et les plus connus sont les « tuyaux d'orgue » ou « tuyaux de terre ». Il s'agit de racines du manteau d'altération pouvant se développer sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur et dont la section reste étonnamment circulaire et régulière malgré l'enfoncement au sein du massif. Des réseaux en éponge et grottes subhorizontales sont trouvés, sans connexion apparente avec une quelconque fracturation au sein du massif. Enfin, à plus de 20 m sous le niveau de la plaine alluviale mosane, des noyaux d'altération pluridécamétriques sont observés, présentant une morphologie proche de celles des cavités naturelles trouvées au sein des calcarénites.

L'ensemble des karsts répertoriés permet de proposer un scénario de mise en place d'un système karstique polyphasé. Des grottes sont générées en profondeur, en milieu noyé (endokarsts), indépendamment des conditions de surface. Lors de l'enfoncement de la vallée de la Meuse, et en relation avec les terrasses fluviales, des racines d'altération (karsts d'introduction ou *input karsts*) se mettent en place. Ces dernières s'approfondissent parallèlement à l'encaissement du fleuve et à l'enfoncement de l'aquifère. Elles finissent par recouper les endokarsts. Une circulation concentrée des eaux au sein du massif peut alors s'organiser.

La partie supérieure dénoyée du système connaît un colmatage rapide des cavités horizontales recoupées par les racines d'altération. La grande porosité des calcarénites rend celles-ci comparables à une éponge. La roche absorbe très vite les écoulements venant de la surface, ce qui provoque un dépôt rapide des particules fines transportées alors au sein des conduits horizontaux. Le colmatage de ces derniers permet leur conservation dans une roche très friable.

MOTS-CLÉS : craie, calcarénite, genèse polyphasée, karsts d'introduction, endokarsts.

ABSTRACT

The "Montagne Saint-Pierre" (Sint Pietersberg) is a separate part of the Hesbaye plateau, isolated between the lower valleys of the Geer and the Meuse rivers. It is exploited by a big open-air quarry and by numerous underground quarries developing galleries on hundreds of kilometers long. Excavated in Cretaceous chalk and calcarenite, these artificial networks allow an exceptional 3-D observation of karsts inside a very porous and permeable rock, less favourable to a concentrated solution. The most numerous of them are "organ pipes" or "earth pipes". They are vertical tubular solution pipes that may exceed 60 m in depth. Sponge networks and subhorizontal caves occur, without any visible connection with fracturation. Finally, downwards to at least 20 m below the alluvial plain of the Meuse river, pluridecametric nodes of weathered chalk are found. By their size and rounded morphology, the nodes resemble to the natural caves occurring in the calcarenite and intersected by the underground quarries. All the studied karsts allow us to propose a scenario for the genesis of a polyphase karst system. Independently of surface conditions, caves are generated deeply in the phreatic zone (endokarsts). During the downcutting of the Meuse valley, and related to the fluvial terraces, solution pipes (input karsts) are generated. Due to the valley incision and to the lowering of the aquifer, these solution pipes progress downward and cut the endokarsts. A concentrated water circulation takes place. In the dewatered upper part of the system, caves cut by solution pipes are rapidly filled by superficial deposits. The high porosity of the calcarenite makes it comparable to a sponge. The rock absorbs quickly the out-flows coming from the surface and causes a rapid deposit of the fine particles transported inside horizontal passages. The sealing of these conduits allows their conservation inside a very crumbly rock.

KEYWORDS: chalk, calcarenite, polyphase genesis, input karsts, endokarsts.

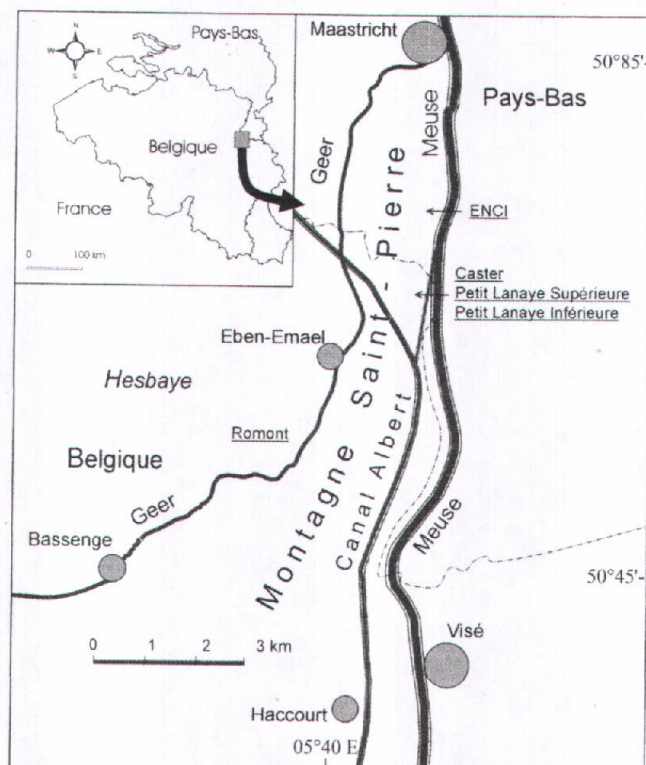


FIG. 1. – Localisation de la Montagne Saint-Pierre et des différents sites d'étude

1. Introduction

La Montagne Saint-Pierre est la retombée du plateau hesbignon, située entre la basse vallée du Geer et la Meuse (fig. 1). Des carrières souterraines et à ciel ouvert ont creusé de façon extensive les craies et calcarénites crétacées et ont dégagé un grand nombre de karsts¹ malgré la forte porosité des formations, donc peu favorable à la concentration de la dissolution.

Les différentes formes identifiées sont des racines du manteau d'altération (racine d'altération), des réseaux en éponge, des grottes et autres conduits subhorizontaux, ainsi que des noyaux profonds d'altération. Pourtant, leurs observations et interprétations restent limitées à ce jour et se sont focalisées essentiellement sur les « tuyaux d'orgue » ou « tuyaux de terre » (par ex. : de Saint Vincent, 1819; Smitshuysen, 1983; Didden, 1996; Rademakers, 1998).

Depuis 2003 (Willems *et al.*, 2004, 2005a et b, 2007), nous avons entrepris un examen systématique des différents karsts afin :

- 1) d'évaluer le potentiel karstique des formations crétacées dans cette partie de la Wallonie (type de morphologies et occurrence de celles-ci);
- 2) d'identifier les conditions génétiques des différents karsts découverts et des éventuels systèmes karstiques;
- 3) de comparer les karsts de la Basse Meuse avec ceux découverts dans les craies de Normandie et qui sont parmi les plus étudiés au monde bien qu'encore largement méconnus.

Nos recherches se sont focalisées essentiellement sur les trois plus grandes carrières souterraines belges de la Montagne Saint-Pierre : Caster, Petit-Lanaye inférieure et Petit-Lanaye supérieure. Nous y avons réalisé un inventaire des différents karsts qui y sont présents (voir cartes 1, 2 et 3 en annexe). Des observations complémentaires ont été effectuées dans la carrière à ciel ouvert ENCI, à l'entrée de Maastricht et dans celle du Romont, à proximité du village d'Eben-Emael (fig. 1).

Les carrières souterraines sont généralement constituées de couloirs à section rectangulaire ou ogivale d'une dizaine de mètres de haut pour quelques mètres de large (fig. 2). La majeure partie des réseaux se situe 10 à 30 m sous la

¹ Dans cet article, le terme karst est utilisé pour « toute forme de la suite karstique classique où la dissolution a joué un rôle déterminant dans l'apparition des morphologies et ce, quelque soit la lithologie considérée » (Willems, 2000; Willems *et al.*, 2002).

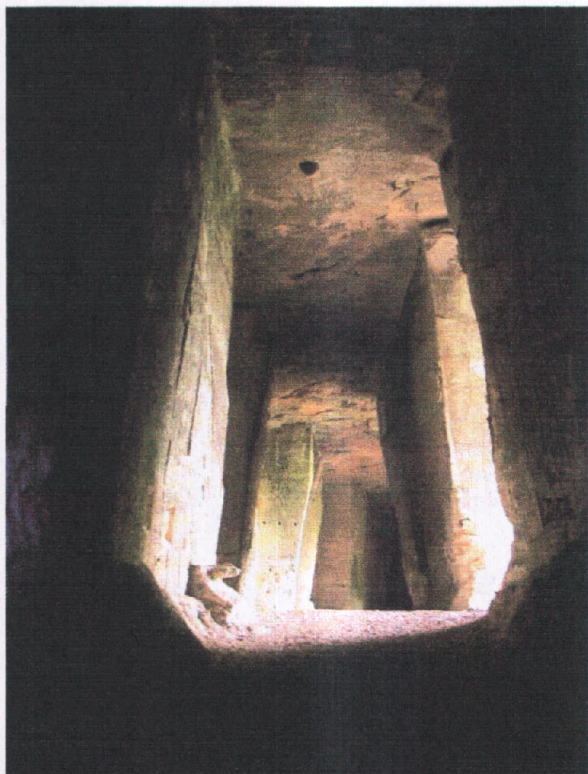


FIG. 2. - Exemple de galeries à section rectangulaire, carrière de Petit-Lanaye inférieure (Photo L. Willems).

surface du plateau, dans les calcarénites d'Emael et de Nekum (partie médiane de la Formation de Maastricht). Pour la carrière ENCI, la base de l'exploitation atteint la cote de -30 m par rapport au niveau de la Meuse, englobant toute la Formation de Maastricht et les membres de Lanaye et de Lixhe jusqu'au sommet du membre de Vijlen de la Formation de Gulpen (Felder & Bosch, 1998).

2. Le milieu physique

La Montagne Saint-Pierre a une altitude comprise entre 153 et 100 m, environ 70 m au-dessus de la plaine alluviale de la Meuse.

Les karsts étudiés se développent dans les formations de Gulpen et de Maastricht (Robaszynski *et al.*, 2001) visibles sur une centaine de mètres d'épaisseur. La partie supérieure du Maastrichtien, la formation de Maastricht, est constituée de calcarénite macroporée contenant des silex et subdivisée par des *hardgrounds*. La formation de Gulpen, partie inférieure du Maastrichtien, est essentiellement composée de très fines calcarénites dans sa partie supérieure

passant à des craies dans sa partie inférieure, le tout riche en lits de silex.

Une craie blanche, très pure, et des marnes imperméables, d'âge campanien, séparent les carbonates maastrichtiens des calcaires carbonifères sous-jacents, profondément altérés et kaolinisés (Felder & Bosch, 1998).

À la surface du Crétacé se sont déposés des sables marins oligocènes — sables tongriens — (Laga *et al.*, 2001) localement préservés dans des dolines présentes au toit des formations carbonatées. Durant le Pliocène, le réseau hydrographique de la Meuse se met en place et incise progressivement le paysage. Au Pléistocène moyen, la « paléo » Meuse façonne une plaine alluviale, ancêtre de la haute terrasse qui recouvre les formations les plus anciennes de la Montagne Saint-Pierre. Ces dépôts alluviaux, grossiers, protègent les sables et calcarénites de l'érosion. Au cours du temps, ils provoqueront une inversion de relief générant la Montagne Saint-Pierre. Durant la glaciation du Weichselien, l'ensemble du paysage est recouvert par une dizaine de mètres de loess (Juvigné, 1976).

Porosité efficace, perméabilité et transmissivité

Pour les calcarénites (tuffeau), la porosité efficace² peut y atteindre 50 %³. Cependant, elle peut être fortement réduite en présence de *hardgrounds* ou de niveaux fossilifères.

En Hesbaye, la perméabilité de la craie est d'environ 10^{-9} m/s, alors que dans les calcarénites elle peut atteindre 10^{-4} m/s. La transmissivité des eaux observée dans la craie est souvent plus importante (10^{-4} et 10^{-3} m/s) et généralement attribuée à des réseaux de fractures. Les vitesses élevées d'écoulement sont souvent observées sous les vallées sèches hesbignonnaises (Dassargues & Monjoie, 1993) et peuvent atteindre des vitesses de 2,2 à 13 km/jour, valeurs comparables à celles trouvées dans les aquifères fortement karstifiés (Harold, 1937; Atkinson & Smith, 1974; Rodet, 1992; Maurice *et al.*, 2006). Ces vitesses peuvent s'expliquer également par des conduits, de diamètre centimétrique, observés dans les galeries de captage (Ministère de la Région wallonne & Université de Liège, 2006).

² Permettant à l'eau de circuler dans la masse rocheuse.

³ Nous avons obtenu une première valeur de 42,5 % de porosité efficace pour un bloc de calcarénite provenant de la carrière du Romont.

3. Karsts

3.1. Karsts d'introduction

3.1.1. Dolines

La surface de la Montagne Saint-Pierre présente des dizaines de dépressions qui peuvent dépasser les 20 m de diamètre pour des profondeurs de plus de 10 m. Certaines sont de simples effondrements miniers, résultant de l'affaissement des galeries souterraines sous-jacentes. D'autres sont des dolines développées au toit des formations crétacées.

3.1.2. Racines du manteau d'altération

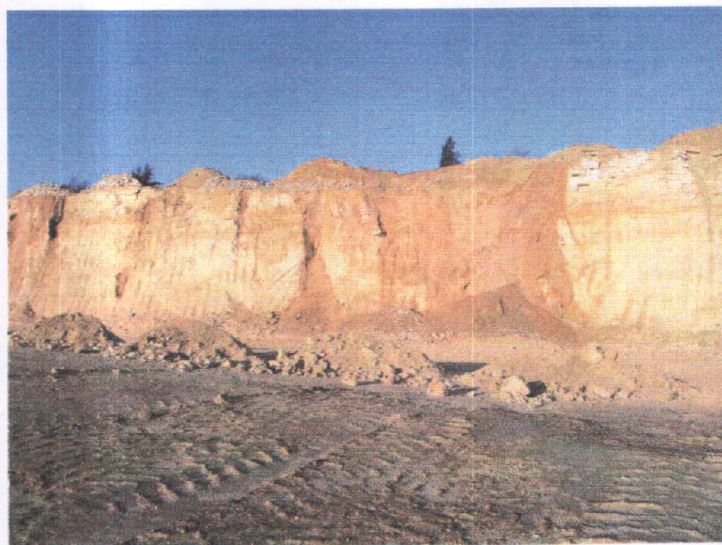
Dans de nombreux cas, les dolines se prolongent verticalement par des racines d'altération tubulaires pouvant atteindre plus de 60 m de profondeur (fig. 3). Ce sont de loin les karsts les plus abondants que nous avons répertoriés (voir cartes en annexe). Plus d'un millier a été comptabilisé sur la centaine de kilomètres de réseau que représentent les trois grandes carrières souterraines. Ces racines ont une section circulaire remarquablement régulière pouvant aller de quelques centimètres à quelques mètres de diamètre. Les racines d'altération contiennent généralement des sables oligocènes, des alluvions de la haute terrasse, des loess de la couverture, des blocs de calcarénite, altérée ou non, ainsi que des silex résiduels. La descente des dépôts superficiels au sein des racines démontre un enfoncement progressif de ces karsts dans les formations crétacées. L'élargissement des racines peut provenir de la coalescence de deux formes voisines (fig. 3c). Mathieu (1813) imputait déjà leur genèse à l'infiltration des eaux de pluie à travers la couverture oligocène. Dans les calcaires cristallins et compacts, les racines d'altération se développent le long de fissures (Jennings, 1985). Cependant, de telles formes sont également répertoriées en l'absence de fractures comme c'est le cas dans les craies du nord-ouest européen ou encore dans des calcarénites en Australie (par ex. : Kirkaldy, 1950; Rodet, 1992; Mouriaux, 1997; Jennings, 1985).

Dans les carrières souterraines de la Montagne Saint-Pierre, à de rares exceptions près, les karsts se développent hors de toute fracturation subverticale. Jennings (1985) propose une genèse par altération, due à la respiration des plantes. Dans le bassin de Paris, Mouriaux (1997) note que ces racines d'altération sont

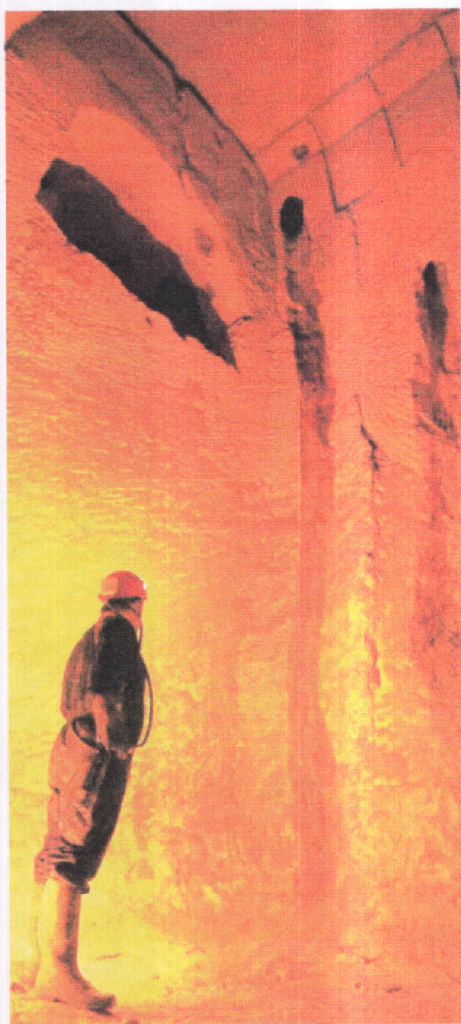
principalement présentes sous une fine couverture et sont absentes là où la craie affleure. Une observation similaire a été faite par Juvigné (1992) dans la carrière du Romont. Des dizaines de racines d'altération, développées dans les calcarénites, y ont été recoupées. Les karsts se concentrent sous la terrasse mosane, constituée essentiellement de matériaux grossiers (gravier, blocs décimétriques, ...), recouvrant directement la surface crétacée. Par contre, là où les calcarénites sont recouvertes par des sables argileux cénozoïques, aucune racine n'est présente. De ces observations, Juvigné (1992) conclut que leur genèse est due à une variation lithologique de la nature des dépôts superficiels. Une couverture hétérogène, composée de graviers et de couches perméables, a permis la concentration des eaux d'infiltration et une karstification ponctuelle. À l'inverse, les sables marins argileux ont inhibé cette concentration des eaux d'infiltration et l'apparition de karsts.

Aucune trace de racines (végétales) ou autre bioturbation importante n'a été constatée à l'aplomb des karsts, dans les formations superficielles recoupées par le front de taille de la carrière du Romont. Dans les carrières souterraines de la Montagne Saint-Pierre, des racines végétales sont seulement observées dans la partie supérieure des karsts localisés à proximité du versant de la vallée mosane. Les racines des plantes sont seulement présentes sur le pourtour des formes, entre le remplissage et la roche en place. En profondeur, les racines végétales sont absentes. Il semble donc que la formation initiale de ces karsts est indépendante d'un chevelu racinaire. Cependant, on ne peut exclure que certaines grosses racines végétales pivotantes servent de relais dans la concentration actuelle des eaux de surface. En accord avec Juvigné (1992), nous pensons que la formation des racines du manteau d'altération est favorisée par une couverture de dépôts grossiers appartenant à la haute terrasse mosane qui couvre le plateau.

La forme régulière de ces karsts, indépendamment de leur enfoncement, peut être la trace d'un abaissement progressif de l'aquifère, en relation avec l'incision de la vallée mosane. En accord avec Bögli (1964), un nœud de corrosion peut prendre place au point de rencontre et de mélange entre les eaux d'infiltration et l'aquifère (deux eaux saturées, d'origine différente, redeviennent sous-saturées si elles se rencontrent). La profondeur variable de développement des racines d'altération peut s'expliquer par une



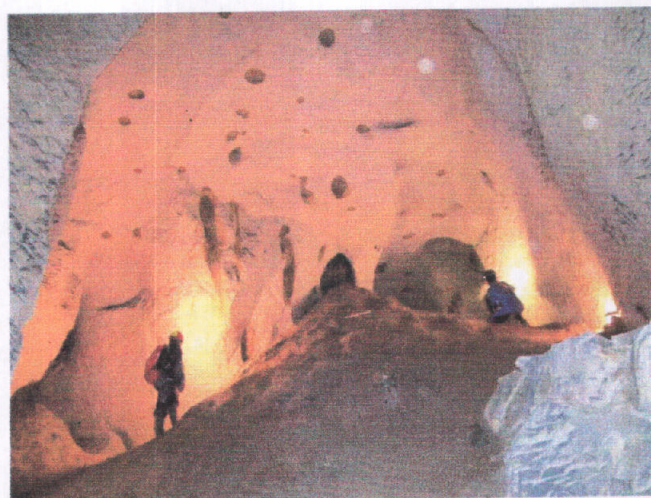
a



b



c



d

FIG. 3. - Exemples de racines du manteau d'altération. a : racines recoupées par un des fronts de taille de la carrière du Romont. La racine de droite a un diamètre de près de 10 m; b : racine d'altération recoupée dans la carrière souterraine de Caster, à plus de 20 m sous la surface du plateau; c : exemple de forte concentration de « tuyaux d'orgue » (carrière de Caster); d : vue sur une galerie dont la voûte est traversée par de nombreuses racines d'altération dont une s'est vidée de son contenu. Cette vidange peut entraîner l'obturation complète de passages artificiels (carrière de Caster). (Photos L. Willems & J. Rodet.)

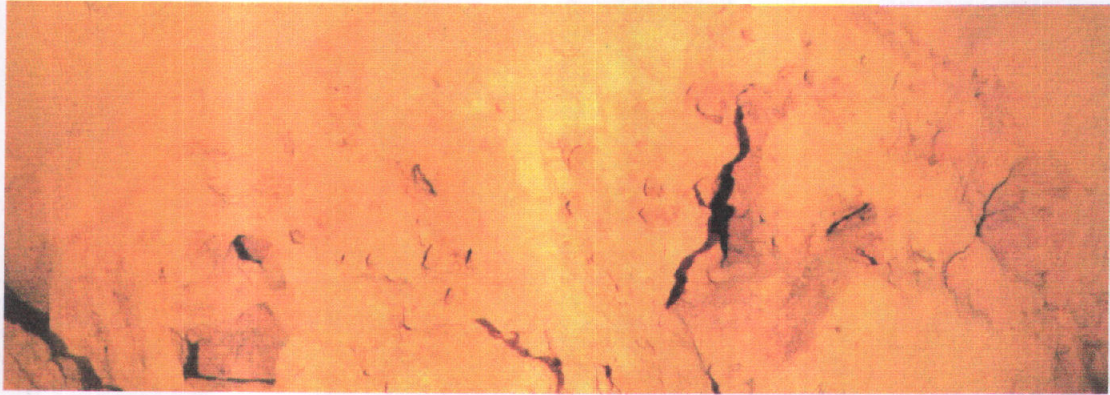


FIG. 4. – Exemple de réseau en éponge sur environ 10 m de paroi, carrière de Petit-Lanaye supérieure (photo L. Willems)

variation de perméabilité des dépôts de terrasse ou encore par des hétérogénéités au sein des calcarénites (*hardground*, lentilles argileuses, ...).

3.2. Endokarsts

3.2.1. Réseaux en éponge et alvéoles

Des réseaux en éponge sont répertoriés sur les murs des galeries souterraines (fig. 4). Il s'agit d'alvéoles millimétriques à métriques développées dans toutes les directions. Certaines sont de petits vides isolés dans la masse de la calcarénite, sans connexion apparente avec une quelconque fracture ou un changement de porosité au sein de la roche. D'autres semblent contrôlées par les joints de stratification, et par des réductions de porosité. Leur coalescence génère de plus larges alvéoles et peut former de petits conduits. Une fine pellicule d'argile de décalcification tapisse les parois de certains de ces vides. Ces argiles sont affectées par des fentes de dessiccation.

3.2.2. Grottes naturelles

Plusieurs grottes naturelles sont mentionnées au sein de la Montagne Saint-Pierre (Clere, 1814; Calembert, 1958; Felder, 1974) mais ont été détruites par les activités d'extraction. Généralement, elles étaient développées le long de surfaces de discontinuités, *hardgrounds* ou fractures. Felder (1974) avance l'hypothèse de passages phréatiques liés à des écoulements subhorizontaux des eaux souterraines au contact de couches de silex imperméables.

Nos prospections ont permis l'identification de deux nouvelles cavités dans la carrière de Petit-Lanaye inférieure. La première, une quinzaine de mètres sous la surface du plateau (fig. 5), est recoupée par une galerie d'exploitation. Seules trois parties de cette grotte sont restées intactes. Elles se composent de chambres plurimétriques arrondies. Aucune fracture ou racine d'altération n'est répertoriée à proximité. Quelques petites alvéoles décimétriques tapissent certaines parois de cette grotte.

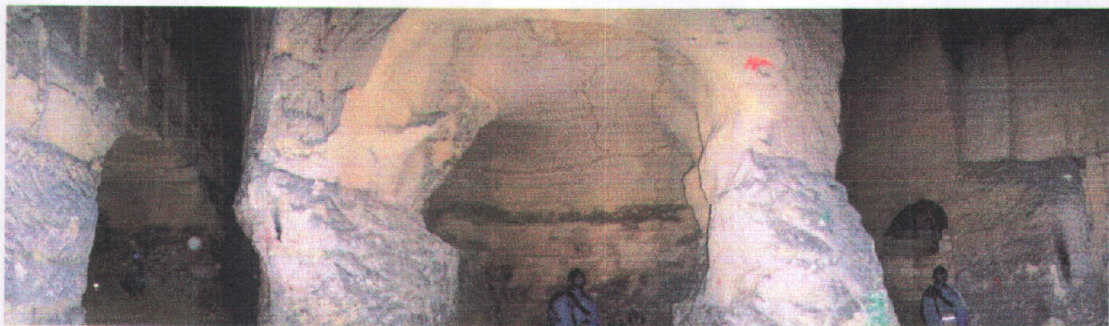


FIG. 5. – Grotte naturelle recoupée par des galeries artificielles. Photo montage (180°) montrant deux des trois chambres résiduelles d'une grotte (carrière de Petit-Lanaye inférieure. Au centre du cliché, la partie naturelle est celle située au-dessus des épaules du personnage. (Photo L. Willems.)



FIG. 6. - a. Grotte naturelle recoupée par des galeries artificielles. Détail de la galerie du CRSOA : extension latérale sous forme d'alvéoles emboîtées. (Photo L. Willems.) b. Grotte naturelle recoupée par des galeries artificielles. Détail de la galerie du CRSOA : partie de la grotte remblayée montrant notamment des structures de chenaux d'écoulement. (Photo L. Willems.) c. Chambre et conduit naturel dégagé une vingtaine de mètres sous le contact Tertiaire/Crétacé, dans les calcarénites du Romont. (Photo L. Willems.)

La seconde cavité découverte est la *galerie du CRSOA* (fig. 6a et b; fig. 7) située une vingtaine de mètres sous la surface du plateau. Il s'agit d'un conduit NO-SE pouvant atteindre par endroits 2 à 3 m de diamètre et dont la longueur apparente devrait atteindre les 70 mètres⁴. Si une fracture est visible dans le toit de la cavité, elle est souvent fermée et ne se prolonge pas dans le plancher de la grotte. Par endroits, une autre fracture fermée, avec des silex en place coupés en deux, est identifiée sur un des bords du conduit sans que sa morphologie en soit affectée. Cette observation est similaire à celle faite pour les racines d'altération qui se développent en dehors de toute fracturation, pourtant visible à quelques centimètres ou mètres des formes.

Un grand nombre d'alvéoles métriques façonne les parois de la cavité. Certaines sont développées dans le plancher et forment des bassins fermés (fig. 6b et 7). D'autres sont plutôt développées latéralement, contribuant à élargir le conduit à section initialement subcirculaire. Les plus grandes alvéoles sont souvent, elles-mêmes, re-sculptées par des alvéoles plus petites. Ceci est surtout vrai pour les alvéoles latérales. Par endroits, la base de la galerie montre des traces de ravinement de quelques centimètres à quelques décimètres de large. Ces traces de ravinement sont souvent peu organisées et peuvent se perdre dans une alvéole fermée développée au plancher de la galerie (fig. 7). Une grande partie de la grotte est comblée par des sédiments essentiellement silto-argilo-sableux. Ces derniers ont deux origines possibles : les résidus d'altération

⁴ Un chantier de désobstruction est entamé depuis 2004.

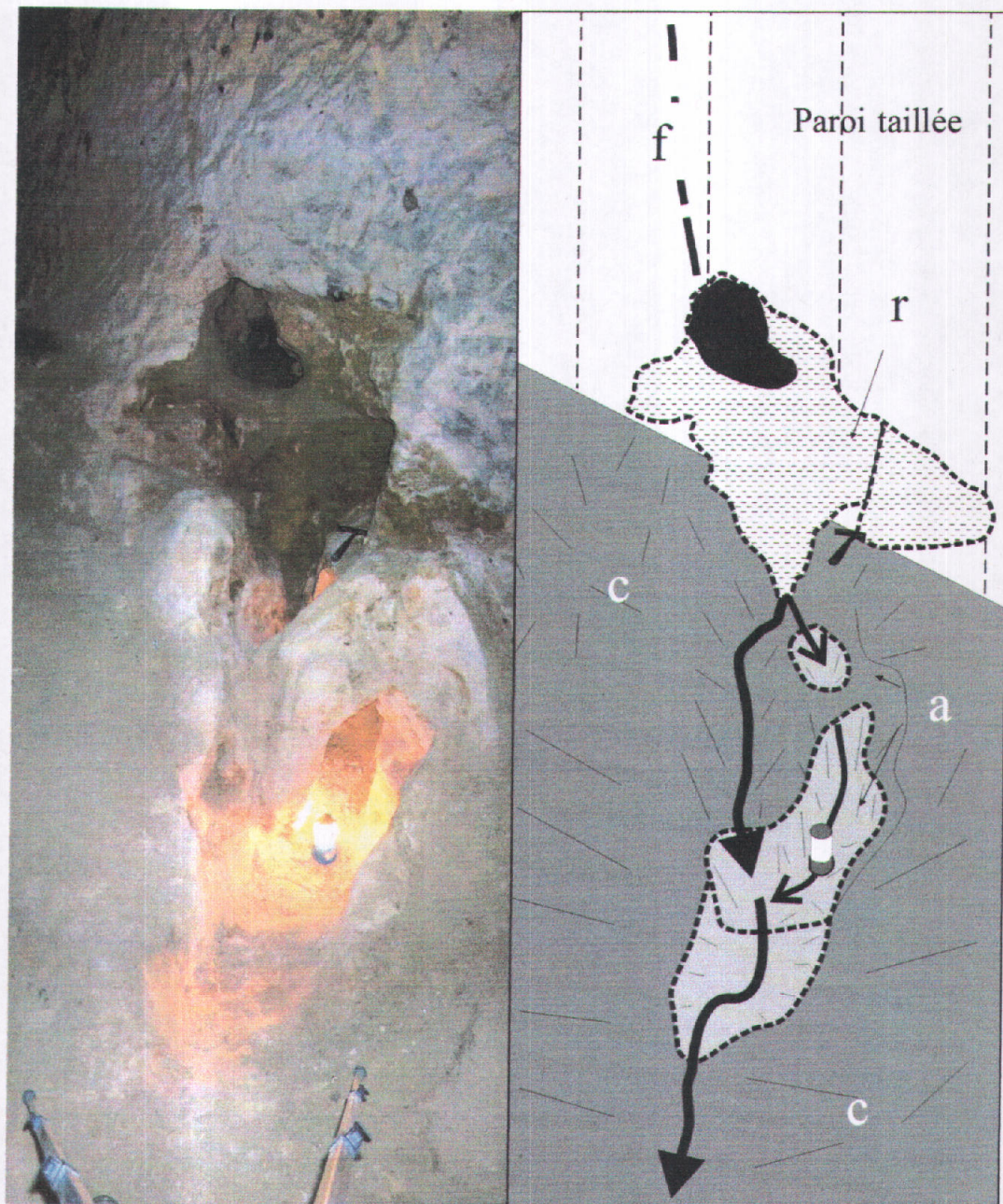


FIG. 7. – Exemple d'organisation complexe de la galerie du CRSOA. À droite, schéma explicatif. **r** : remplissage colmatant une grande partie du conduit; **a** : alvéole presque fermée dont le toit est constitué d'une arche de roche en place (lors du dégagement, cette alvéole était comblée par du sable grossier); **c** : chenaux d'écoulement; **f** : fissure. Les flèches représentent les sens d'écoulement reconstitués à partir de l'observation des chenaux. En noir, partie du conduit non comblée. L'avant-plan de cette partie de la galerie du CRSOA était recouvert sur près d'un mètre par des silex résiduels amassés par les carriers et par de la poudre de calcarénite. Ce comblement a permis de préserver les morphologies originales du karst malgré sa position dans un couloir à grand passage. (photomontage L. Willems.)

de la calcarénite (essentiellement des argiles) et les formations superficielles, sables tongriens, loess quaternaires (Minguet, 2006). En de nombreux endroits, l'argile de décalcification tapisse les bords du conduit alors que le centre du

remplissage montre des figures d'écoulement et est principalement constitué des sédiments provenant des formations superficielles. Des blocs de calcarénites, peu ou non altérés, ainsi que des silex sont présents au sein du remplissage.



FIG. 8. – Vues sur les noyaux d'altération (n) recoupé par la carrière ENCI près de Maastricht (personnages en bas à gauche de la photo). La photo de droite est prise sur un front de taille perpendiculaire à celui de la photo de gauche, permettant une vue en 3D des zones altérées. (photos L. Willems.)

4. Noyaux profonds de craies altérées

Le front de taille de la carrière ENCI, près de Maastricht, a dégagé un grand nombre de zones de craies altérées, aux limites arrondies. Nous les appelons *noyaux d'altération* (fig. 8). Leur taille peut atteindre plus de 20 m de long pour plusieurs mètres de large et de haut. Leur forme générale est peu influencée par les nombreuses fractures ou failles qui les traversent.

La plupart des noyaux d'altération se développent à au moins 20 m sous la plaine alluviale et n'ont pas de connexion visible avec les karsts d'introduction. Leur taille et leur forme ressemblent à l'aspect général des grottes naturelles trouvées au sein des calcarénites de la carrière de Petit-Lanaye inférieure.

Le processus d'altération, à l'origine de ces noyaux, serait comparable à celui générant les « fantômes de roche » trouvés dans les calcaires carbonifères du Tournaisis (Vergari, 1998; Quinif *et al.*, 1994) ou dans les craies normandes (Rodet, 1996, 1999). Ils résulteraient d'une altération isovolumétrique des roches carbonatées avec évacuation des éléments les plus solubles lorsqu'un gradient hydraulique se met en place.

5. Discussion

Les racines d'altération forment les plus nombreux et les mieux connus des karsts de la Montagne Saint-Pierre. Leur remplissage démontre qu'elles résultent d'une corrosion liée à l'infiltration des eaux de surface. Par

contraste, la genèse des endokarsts et des noyaux d'altération profonds pose un certain nombre de questions quant aux mécanismes responsables de leur genèse dans des milieux à forte porosité où la fracturation n'a joué qu'un rôle mineur dans leur formation. La morphologie générale de la galerie du CRSOA et les coupes sédimentaires que nous y avons réalisées permettent de reconstituer la mise en place d'un système karstique⁵. La coupe de la figure 9 nous servira d'exemple. Elle correspond à l'arrière-plan de la photo de la figure 7.

Au sein des formations crétacées se mettent en place des vides provenant eux-mêmes, peut-être, de simples noyaux d'altération de plus ou moins grande taille qui peuvent également former des réseaux en éponge. Cette genèse se déroule au sein d'un aquifère et permet le développement anisotropique d'alvéoles. La formation de la terrasse mosane principale et l'enfoncement du réseau hydrographique vont provoquer la mise en place de racines du manteau d'altération. Le développement vertical des racines serait lié à l'enfoncement de l'aquifère, lui-même s'ajustant à l'incision du sillon mosan. Pendant une durée qui reste indéterminée, l'actuelle galerie du CRSOA se trouve près de la limite supérieure de l'aquifère. Cette situation particulière fait que les eaux d'infiltration sont bloquées à ce niveau dans leur descente et un gradient hydraulique plus important doit se mettre en place. Celui-ci peut alors autoriser une érosion verticale des alvéoles initiales et

⁵ Système issu de la réunion de différents karsts, permettant une circulation concentrée des eaux.

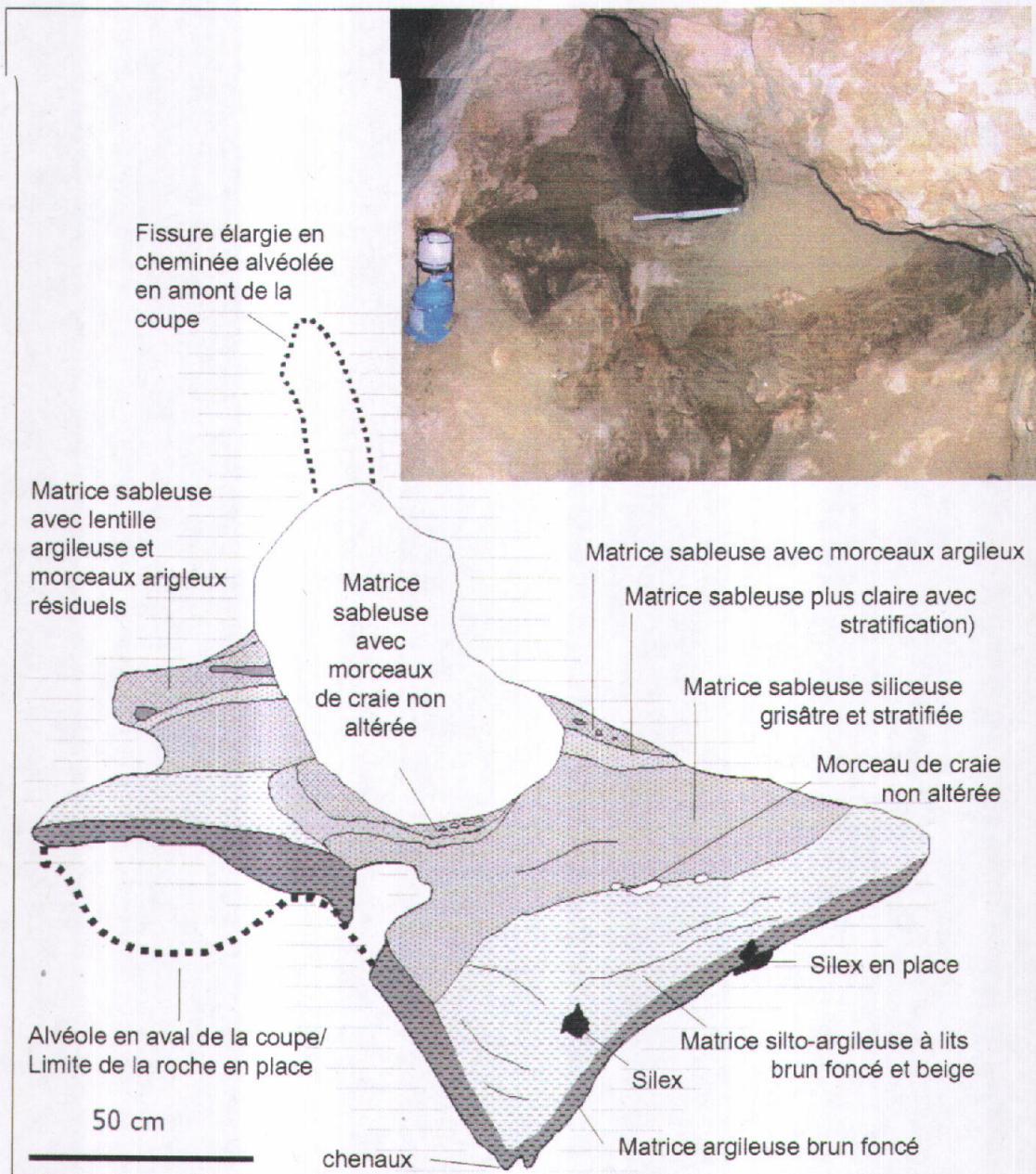


FIG. 9. - Coupe et analyse d'un remplissage de la grotte du CRSOA (photo L. Willems)

façonner à certains endroits des chenaux d'écoulement. L'argile de décalcification est partiellement enlevée et transportée par endroits, avec mise en place de galets mous visibles à la base des premiers dépôts sédimentaires. Ces galets mous sont les restes de polyèdres de dessiccation d'argile, remobilisés par un courant d'eau, ce qui leur donne cet aspect arrondi. L'aquifère poursuivant sa descente, la galerie du CRSOA se trouve peu à peu dénoyée. Les eaux d'infiltration ne sont plus stoppées dans leur descente vers l'aquifère à cet endroit. Les écoulements sont de plus en plus limités, la roche se comportant comme une véritable éponge. Les quelques

blocs de craie effondrés de la voûte sont laissés pratiquement intacts au sein du dépôt. C'est à cette période que commence véritablement le comblement des karsts initiaux. Le dépôt argileux, avec alternance de lits clairs et foncés, caractériserait cet épisode. La sédimentation de sable oligocène (sable gris de la coupe) témoigne d'une autre étape dans la mise en place du système karstique : la connexion de la grotte avec la surface, soit par le biais d'une fissure élargie par l'altération, soit par le biais d'une trépanation par une racine d'altération. Des phases d'érosion des dépôts antérieurs peuvent épisodiquement se dérouler comme le montre,

par exemple, le profil en V du dépôt sableux visible sur la figure 8⁶. La galerie continue de se colmater avec, par moment, la mise en place de quelques chenaux d'écoulement liés peut-être à l'imperméabilisation partielle des sédiments par des apports plus fins, argiles de décalcification remaniées ou loess provenant de la surface. Ce colmatage se poursuit encore de nos jours, comme le montrent les restes d'animaux cavernicoles ou de mammifères retrouvés au sein des sédiments et mélangés avec de petits blocs effondrés de la voûte.

La densité et la diversité des karsts répertoriés au sein de la Montagne Saint-Pierre démontrent l'importance de la dissolution concentrée dans un milieu très poreux et, de ce fait, peu réputé pour sa karstification. Les craies et calcarénites de la Basse Meuse abritent un système karstique complexe, issu de la rencontre entre karsts d'introduction et endokarsts, elle-même provoquée par le creusement de la vallée de la Meuse.

Beaucoup de questions restent en suspens, notamment pourquoi observe-t-on une dissolution concentrée à certains endroits? Quels sont les processus de renouvellement des solutions qui doivent nécessairement se dérouler en profondeur pour permettre la mise en place de noyaux d'altération? Quelles sont les cinétiques de développement des différents types de karst les uns par rapport aux autres? Quelles conséquences peuvent avoir ces karsts sur les écoulements de surface ou souterrains actuels? Des études ultérieures devraient permettre de répondre à ces interrogations.

Remerciements

Cette recherche a bénéficié du programme franco-belge Tournesol et du programme de coopération CNRS-FNRS/CGRI. Nous tenons à remercier chaleureusement tous les membres du Club de Recherche Spéléologique Ourthe-Amblève (CRSOA) pour leur participation aux différentes campagnes de relevés et autres travaux souterrains nécessaires à cette recherche. Tous nos remerciements à John Jagt (*Natuurhistorisch Museum Maastricht*) qui nous a facilité l'accès à la carrière ENCI. Nous remercions également l'Échevinat du développement durable de la ville de Visé, la S.A. Cimenteries CBR - ENCI Group et la Région wallonne pour leur coopération. Nos remerciements vont également au professeur

Ét. Juvigné pour les remarques et aides qu'il a pu nous apporter sur le terrain.

Bibliographie

- ATKINSON T.C. & SMITH D.I., 1974. « Rapid groundwater flow in fissures in the Chalk: An example from South Hampshire », *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 7 : 197-205.
- BÖGLI A., 1964. « Mischungskorrosion, ein Beitrag zum Verkarstungsproblem », *Erdkunde*, 18 : 83-92.
- CALEMBERT L., 1958. « Phénomènes karstiques holofossiles dans le Crétacé supérieur du bassin du Geer », *Annales de la Société géologique de Belgique*, 81 : 495-506.
- CLERE J.F., 1814. « Notice géologique sur l'espace et la nature du terrain des environs de Maëstricht », *Journal des Mines*, 36-214.
- DASSARGUES A. & MONJOIE A., 1993. *Hydrogeology of the chalk of North-West Europe*. Chap. 8 : *Chalk as an aquifer in Belgium*, Oxford University Press, p. 153-169.
- DE SAINT VINCENT B., 1819. « Sur le plateau de St-Pierre, près de Maestricht », *Annales générales des Sciences physiques*, 1-10 : 185-189.
- DIDDEN J.M., 1996. « Tektoniek, karst en speleothemen in de kalksteen van het Laat-Maastrichtien van Zuid-Limburg », *Natuurhistorisch Maandblad*, 85 : 72-82.
- FELDER P.J., 1974. « Horizontale karstverschijnselen in de groeve Caster van de E.N.C.I. », *Natuurhistorisch Maandblad*, 63 : 112-115.
- FELDER W.M. & BOSCH P.W., 1998. « Geologie van de St. Pietersberg bij Maastricht », *Grondboor & Hamer*, 52 : 53-63.
- HAROLD C., 1937. *The flow and bacteriology of underground water in the Lee Valley*. Metropolitan Water Board 32nd Annual Report, p. 89-99. in Maurice *et al.*, 2006.
- JENNINGS J.N., 1985. *Karst Geomorphology*, Basil Blackwell Ed., 82 p.
- JUVIGNÉ ÉT., 1976. *La stratigraphie du Quaternaire. Géomorphologie de la Belgique*, in *Hommage au Prof. P. Macar*, Laboratoire de Géologie et Géographie physique, Université de Liège, p. 169-179.

⁶ Certains lits argileux observés peuvent avoir été déformés par compaction différentielle ou par expulsion d'eau des argiles.

- JUVIGNÉ Ét., 1992. « Les formations cénozoïques de la carrière C.B.R. du Romont (Eben/Bassenge, Belgique) », *Annales de la Société géologique de Belgique*, 115 : 159-165.
- KIRKALDY J.F., 1950. « Solution of the Chalk in the Mimms valley », *Hertz. Proc. Geol. Ass.*, 61 : 219-24. In Jennings (1985).
- LAGA P., LOUWY S. & GEETS S., 2001. « Paleogene and Neogene lithostratigraphic units (Belgium) », *Geologica Belgica*, Vol. 4/1-2 : 135-152.
- MATHIEU M.L., 1813. « Notice sur les orgues géologiques de la colline Saint-Pierre, près de Maëstricht », *Journal des Mines*, 34 : 197-208.
- MAURICE L.D., ATKINSON T.C., BARKER J.A., BLOOMFIELD J.P., FARRANT A.R. & WILLIAMS A.T., 2006. « Karstic behaviour of groundwater in the English Chalk », *Journal of Hydrology*, 330 : 63-70.
- MINGUET M., 2006. *Un exemple de remplissage sédimentaires dans le karst de la craie de Belgique (Montagne Saint-Pierre) : caractérisation, origine et fonctionnement hydro-sédimentaire*, Rapport-Mémoire Master 2, Département de Géologie de l'Université de Rouen, 46 p.
- Ministère de la Région wallonne (D.G.R.N.E.) & Université de Liège, Géomac Hydrogéologie, 2006. *Carte hydrologique de Wallonie, Allier-Liège 42/1-2*, Notice explicative, 52 p.
- MOURIAUX P., 1997. *Phénomènes de karstification dans le calcaire grossier lutétien du nord de l'Île-de-France et de la Picardie*, in *Actes du 1^{er} Congrès franco-belge de Spéléologie*, Fromelennes, p. 47-69.
- QUINIF Y., VERGARI A., DOREMUS P., HENNEBERT M. & CHARLET J.M., 1994. « Phénomènes karstiques affectant le calcaire du Hainaut », *Bulletin de la Société belge de Géologie*, 102 : 379-384.
- RADEMAKERS P.C.M., 1998. « Geologische orgelpijpen », *Grondboor & Hamer*, 52 : 71-76.
- ROBASZYNSKI F., D'HONDT A. & JAGT W.M.J., 2001. « Cretaceous lithostratigraphic units (Belgium) », *Geologica Belgica*, 4/1-2 : 121-134.
- RODET J., 1992. *La craie et ses karsts*, Caen, Centre normand d'Étude du Karst et des Cavités du Sous-sol, Elbeuf, & Groupe Seine-CNRS, 560 p.
- RODET J., 1996. « Une nouvelle organisation géométrique du drainage karstique des craies : le labyrinthe d'altération, l'exemple de la grotte de la Mansonnière (Bellou-sur-Huisne, Orne, France) ». *C.R.A.Sc. de Paris*, 322 (12), IIa : 1039-1045.
- RODET J., 1999. « Le réseau de fracturation, facteur initial de la karstification des craies dans les collines du Perche : l'exemple du site de la Mansonnière (Bellou-sur-Huisne, Orne, France) », *Geodynamica Acta*, 12 (2-3) : 259-265.
- SMITSHUYSEN E., 1983. *S.O.K Mededelingen*, 2 : 13-16.
- VERGARI A., 1998. « Nouveau regard sur la spéléogénèse : le "pseudo-endokarst" du Tournais (Hainaut, Belgique) », *Karstologia*, 31/1 : 12-18.
- WILLEMS L., 2000. *Phénomènes karstiques en roches silicatées non carbonatées. Cas des grès, des micaschistes, des gneiss et des granites en Afrique sahélienne et équatoriale*, thèse de doctorat de l'Université de Liège, 257 p., 145 fig., 137 photos.
- WILLEMS L., POUCKET A. & VICAT J.P., 2002. « Existence de karsts en roches cristallines silicatées non carbonatées en Afrique sahélienne et équatoriale, implications hydrogéologiques », *Bulletin de la Société géologique de France*, 173-174 : 337-345.
- WILLEMS L., RODET J., MASSEI N., FOURNIER M., LAIGNEL B., DUSSART-BAPTISTA L., SCHYNS J.-Ch. & EK C., 2004. *Chalk karsts - Saint-Pierre Mountain - Basse-Meuse (Belgium)*. Poster - « Meuse-Rhine Euregio Geologists Meeting », Maastricht, 28-29 mai 2004.
- WILLEMS L., RODET J., MASSEI N., FOURNIER M., LAIGNEL B., DUSSART-BAPTISTA L., SCHYNS J.-Ch. & EK C., 2005a. *Genèse d'un système karstique dans la craie en Basse Meuse (Frontière belgo-néerlandaise)*. Poster, Colloque international « Karst et aménagement du territoire », Région wallonne, Jambes, mai 2005.
- WILLEMS L., RODET J., FOURNIER M., MASSEI N., LAIGNEL B., DUSSART-BAPTISTA L., SCHYNS J.-Ch., DUSAR M., LAGROU D. & EK C., 2005b. *Karst system genesis in the chalk of the lower Meuse (Belgian-Dutch*

border), 14^e Congrès de l'UIS, Athènes-Kalamos, 23-28 août 2005, CDRom Full Paper : O-36 (6 p.).

WILLEMS L., RODET J., FOURNIER M., LAIGNEL B., DUSAR M., LAGROU D., POUCKET A., MASSEI N., DUSSART-BAPTISTA L., COMPÈRE Ph. & EK C., 2007. « Polyphase karst system in Cretaceous chalk and calcarenite of the Belgian-Dutch border », *Z. Geomorphologie* N.F., Berlin-Stuttgart, 51 (3) : 361-376.

Adresse des auteurs :

Luc WILLEMS
EuReKarst, Laboratoire de Pétrologie sédimentaire,
Département de Géologie, Pétrologie et Géochimie,
Université de Liège Bât. 20
Boulevard du Rectorat, 15
4000 Liège
BELGIQUE
LucWillems65@versateladsl.be

Joël RODET
EuReKarst, UMR 6143 CNRS
Morphodynamique continentale et côtière
Laboratoire de Géologie
Université de Rouen
76821 Mont-Saint-Aignan Cedex
FRANCE

Camille Ek
EuReKarst
Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection
Dpt. de Géographie physique et quaternaire
Allée du 6 août, 2
Université de Liège
4000 Liège
BELGIQUE

Michiel DUSAR
Institut royal des Sciences naturelles de Belgique
Service géologique de Belgique
Rue Jenner, 13
1000 Bruxelles
BELGIQUE

David LAGROU
Flemish Institute for Technological Research (VITO)
Materials Technology
Boeretang, 200
2400 Mol
BELGIUM

Matthieu FOURNIER
EuReKarst, UMR 6143 CNRS
Morphodynamique continentale et côtière
Laboratoire de Géologie
Université de Rouen
76821 Mont-Saint-Aignan Cedex
FRANCE

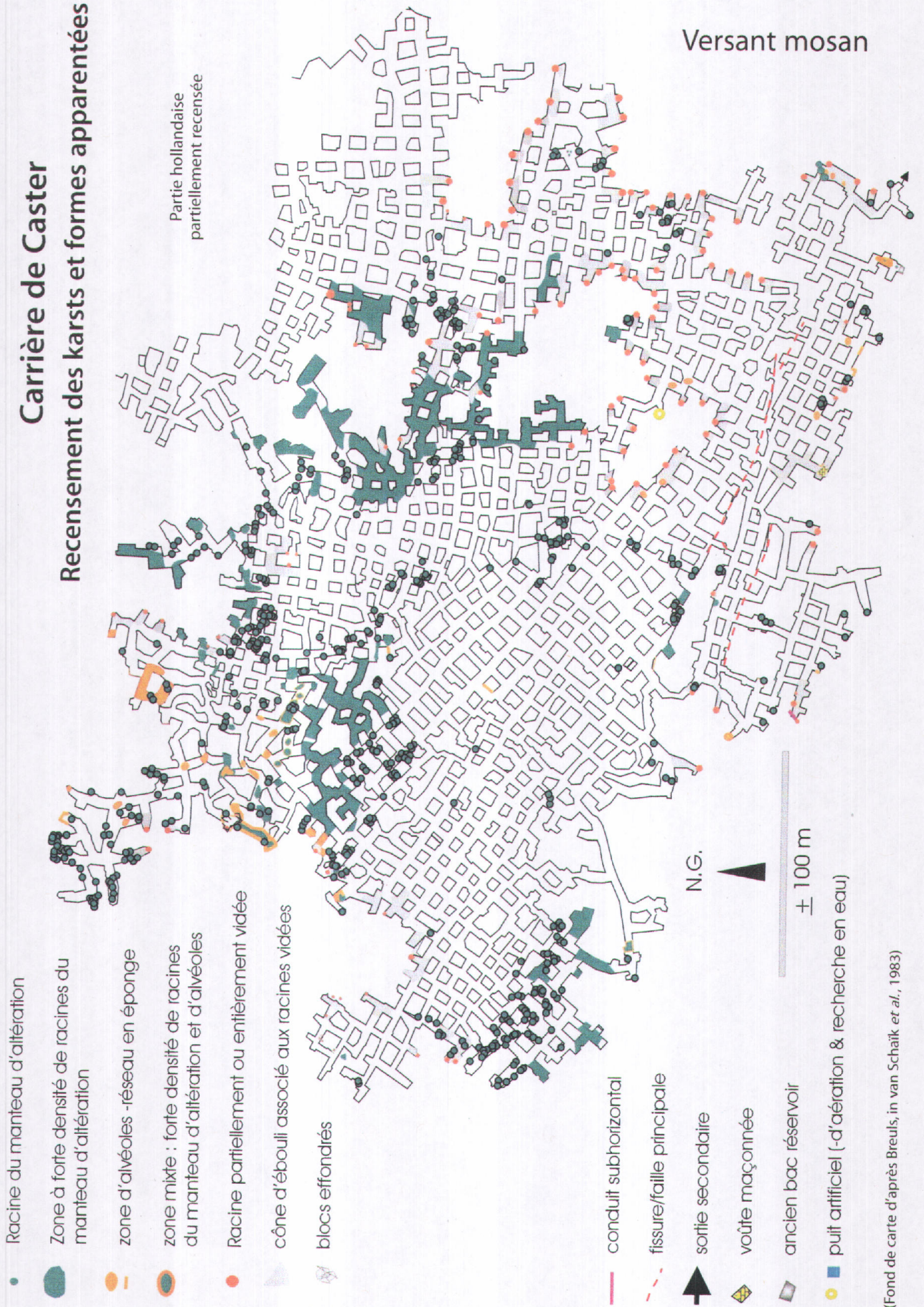
Benoît LAIGNEL
EuReKarst, UMR 6143 CNRS
Morphodynamique continentale et côtière
Laboratoire de Géologie
Université de Rouen
76821 Mont-Saint-Aignan Cedex
FRANCE

André POUCKET
ISTO, Université d'Orléans,
Rue de Saint-Amand
Bâtiment Géosciences, BP 6759
45067 Orléans Cedex 2
FRANCE

En Annexe : plans des trois carrières avec relevé des karsts

Carrière de Caster

Recensement des karsts et formes apparentées



● Racine du manteau d'altération

● Zone à forte densité de racines du manteau d'altération

● zone d'alvéoles -réseau en éponge

● zone mixte : forte densité de racines du manteau d'altération et d'alvéoles

● Racine partiellement ou entièrement vidée

● cône d'ébouli associé aux racines vidées

● blocs effondrés

— conduit subhorizontal

- - - fissure/faïlle principale

▲ sortie secondaire

◆ voûte maçonnée

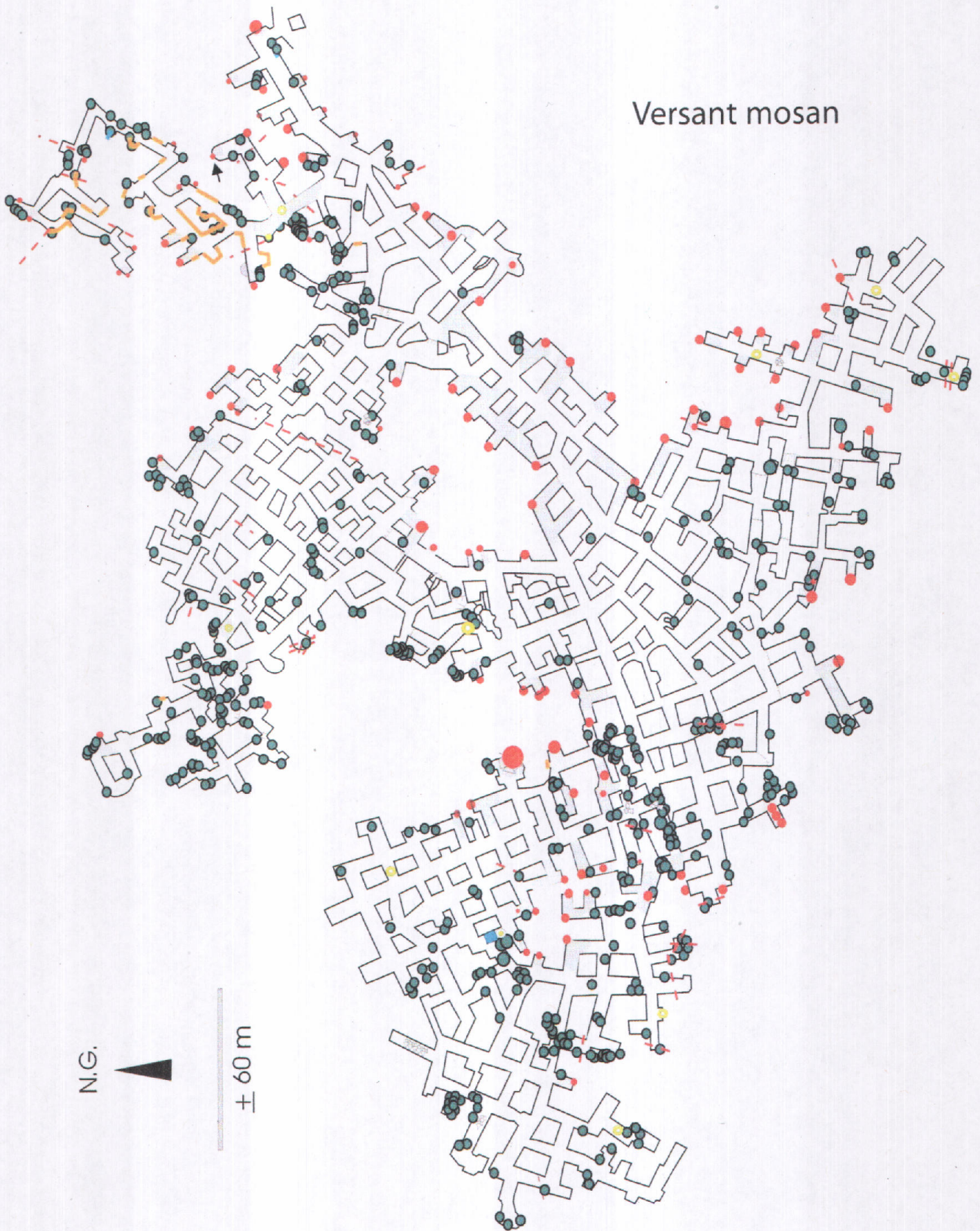
■ ancien bac réservoir

● puits artificiel (-d'aération & recherche en eau)

Carrière de Petit-Lanaye supérieure

Recensement des karsts et formes apparentées

Versant mosan



(Fond de carte modifié d'après Sluiter, Bezem et Van Heerdt, 1972, in van Schaik *et al.*, 1983)

Carrière de Petit-Lanaye inférieure

Recensement des karsts et formes apparentées



(Fond de carte d'après De Grood, 1967, 1983, in van Schaik *et al.*, 1983)