

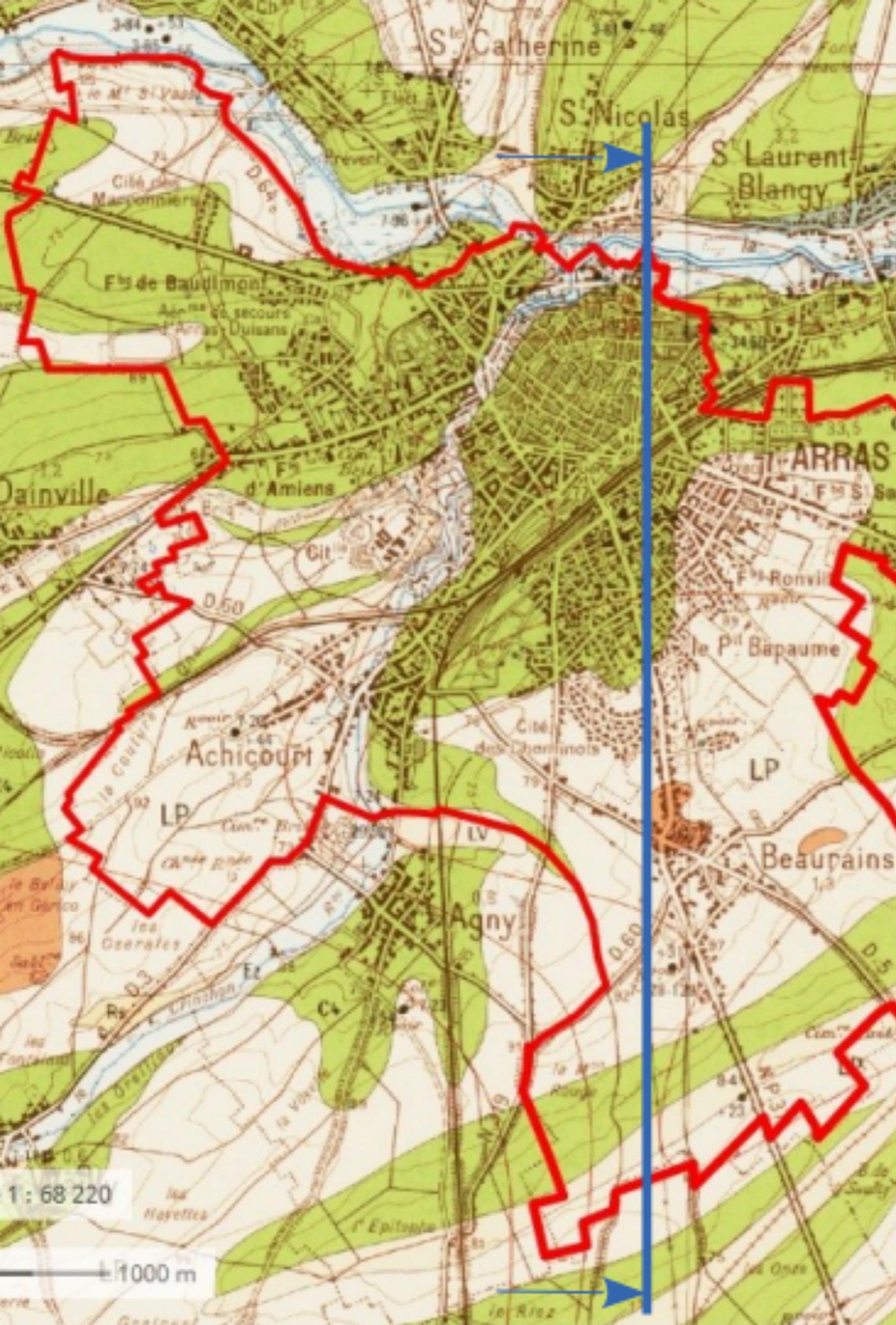
GÉOLOGIE ET HABITAT

Un exemple d'impact de l'action humaine, bénéfiques et risques à la surface de la Terre

ARRAS

LA VILLE SOUTERRAINE

7A



Thèmes abordés en relation avec les programmes scolaires :

- ▶ Impacts de l'action humaine, bénéfiques et risques, à la surface de la planète Terre
- ▶ Géosciences et dynamique des paysages
- ▶ Sédimentation et milieux de sédimentation
- ▶ L'érosion, processus et conséquences
- ▶ Erosion et activité humaine
- ▶ Géochronologie relative et absolue
- ▶ Climatologie et les climats du passé

GÉOLOGIE ET HABITAT

Un exemple d'impact de l'action humaine, bénéfiques et risques à la surface de la Terre

ARRAS

LA VILLE SOUTERRAINE



|.ACCUEIL

Introduction

Arras, belle ville des Hauts-de-France, est appréciée pour son architecture, ses maisons de style flamand, ses places, sa citadelle, son beffroi, mais il faut creuser un peu plus pour s'apercevoir qu'il existe une autre ville souterraine, celle-là, faite de carrières et de galeries qui sillonnent le sous-sol de la ville sur des kilomètres et qui permettent de découvrir le patrimoine géologique et historique très riche de cette ville. Cette visite souterraine permet également de comprendre l'origine des effondrements affectant certains quartiers.

Parmi les nombreuses carrières existantes, deux sites ouverts au public seront plus particulièrement étudiés.

Les boves d'Arras et la carrière Wellington

Ce sont des carrières d'extraction de craie exploitées depuis l'Antiquité. Dès le Moyen-Âge, on extrait cette roche pour construire les édifices religieux et les remparts de la ville. Elles sont situées en dessous du marché de la place des héros et s'étalent sur une vingtaine de kilomètres sous la ville à 12 mètres de profondeur.

Origine du mot « Boves » : du celtique « bau », caserne ou de l'espagnol



Par Jean-Pol GRANDMONT — Travail personnel, CC BY 4.0

« boveda », lieu où sont remisés les bœufs.

D'après le Larousse du XIX^e siècle « les Boves » est un nom donné en Picardie et en Artois aux excavations qui ont fourni la pierre de construction pour les villes. Le dictionnaire de l'ancienne langue française ajoute que « le mot Bove dans les Provinces d'Artois et du Cambrésis, désigne une arrière-cave dans laquelle on tient le vin sous clé plus fraîchement que dans la première cave servant à contenir la bière » ; la

définition précise que « dans la ville d'Arras, ce sont des caves profondes assez vastes, la plupart voûtées sans maçonnerie, mais soutenues par des piliers de pierre ».



Par ChrisO, CC BY-SA 3.0

GÉOLOGIE ET HABITAT

Un exemple d'impact de l'action humaine, bénéfiques et risques à la surface de la Terre

ARRAS

LA VILLE SOUTERRAINE



II. LOCALISATION

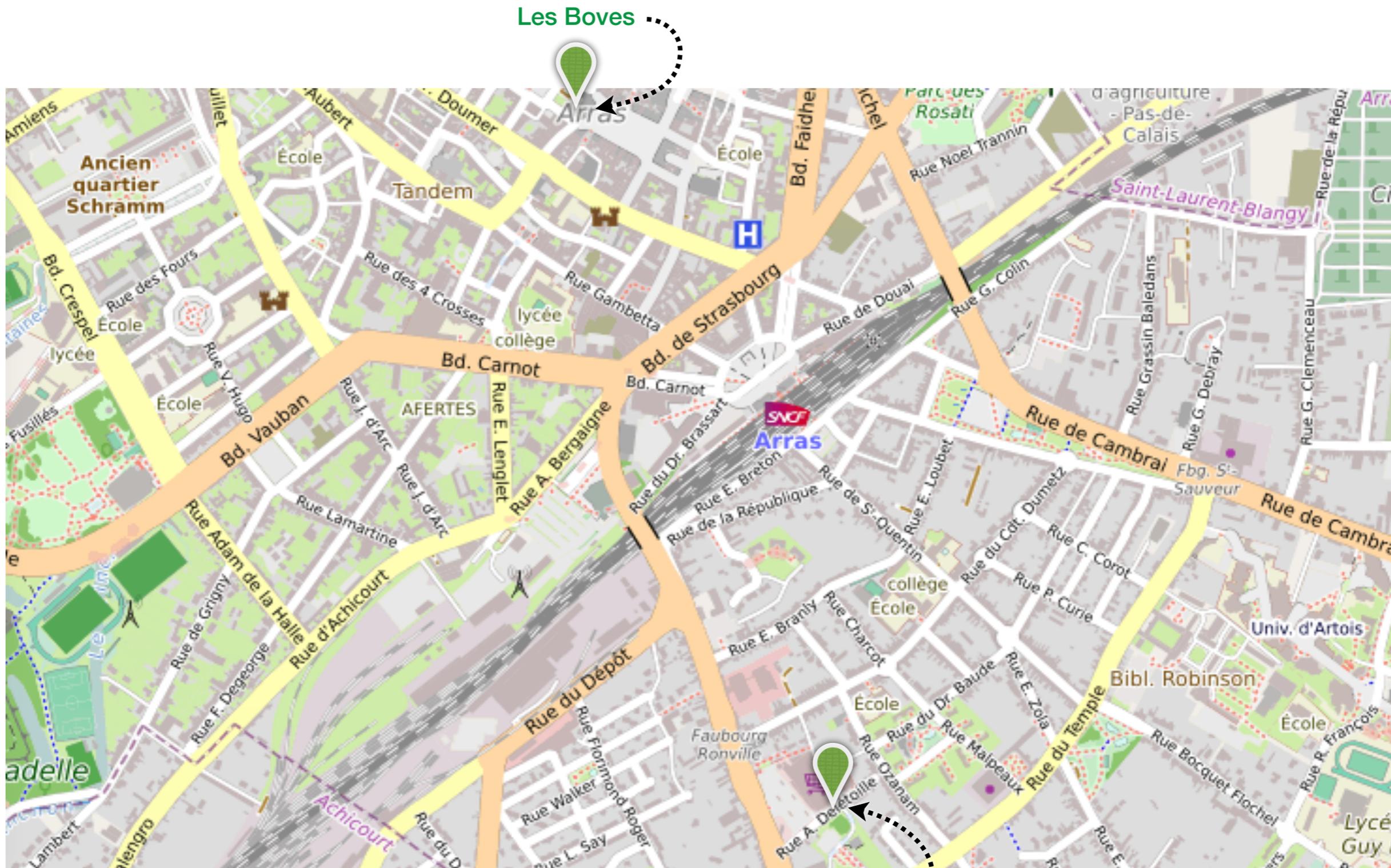


Fig. 1 : Carte générale d'Arras situant les deux sites

Source : openStreetMap

Carrière Wellington

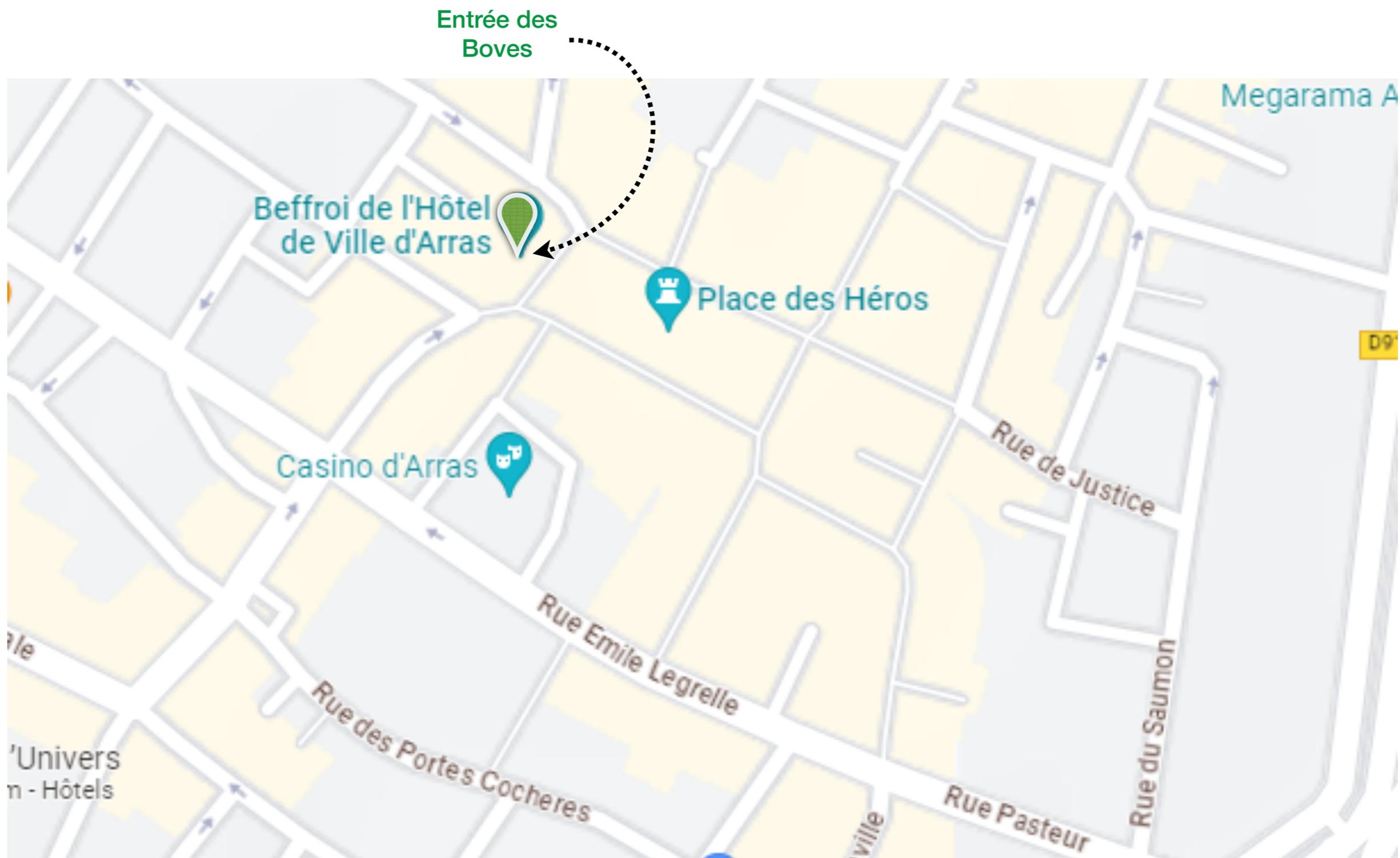


Fig. 2 : Entrée des Boves sous l'hôtel de ville

Source : cartesfrance.fr

Remarque

À partir de la carrière Wellington, on peut accéder à la carrière Auckland par un tunnel mais cette dernière n'est pas accessible au public.

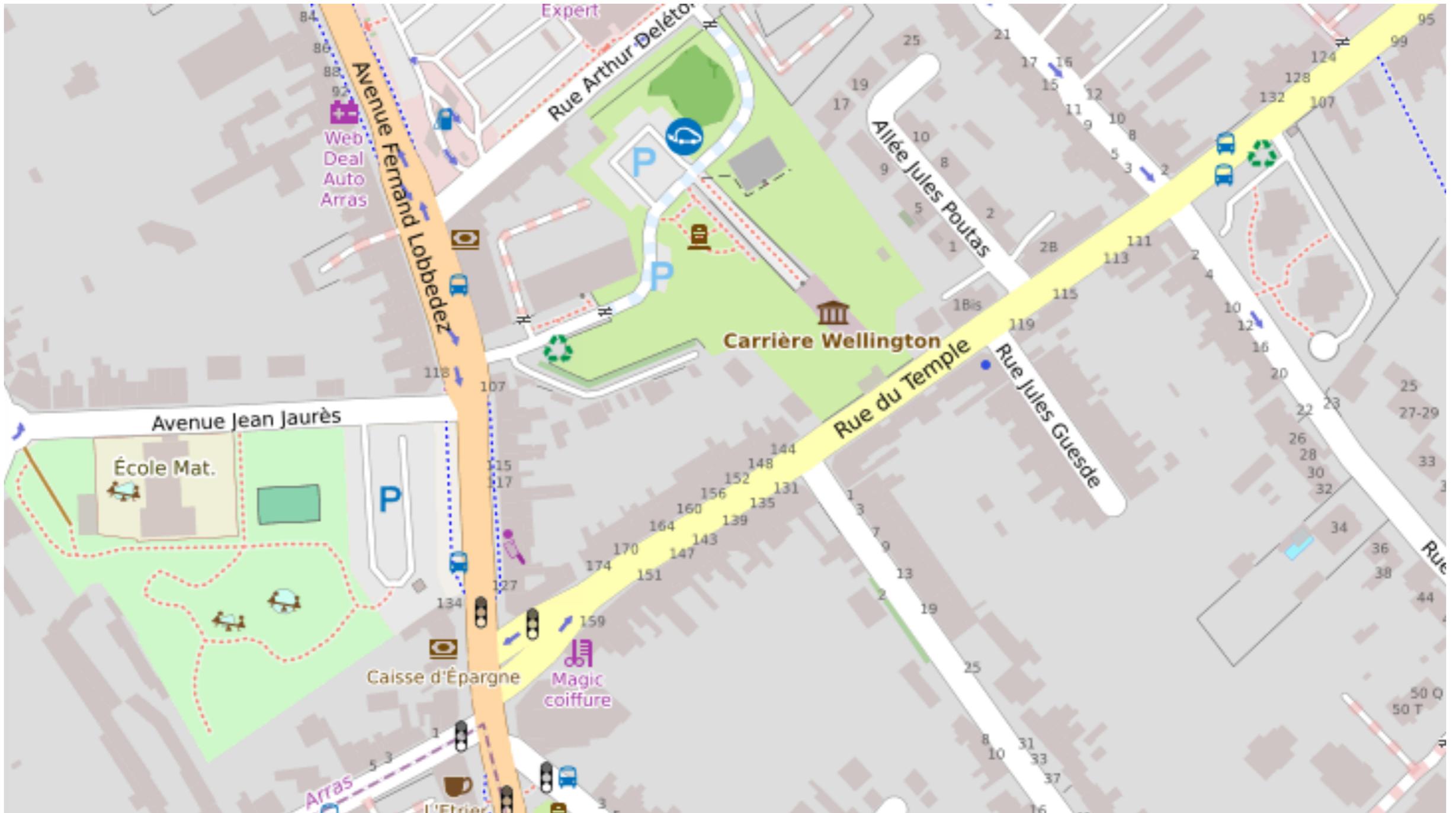


Fig. 3 : Carte figurant l'emplacement de l'entrée de la carrière Wellington

Source : cartesfrance.fr

GÉOLOGIE ET HABITAT

Un exemple d'impact de l'action humaine, bénéfiques et risques à la surface de la Terre

ARRAS

LA VILLE SOUTERRAINE



III. CONTEXTE
GÉOLOGIQUE

Le trait morpho-structural fondamental du Nord-Pas de Calais

est le bombement anticlinal faillé de l'Artois qui s'étend du Boulonnais à l'ouest jusqu'à la région d'Arras à l'est, en suivant un axe globalement WNW-ESE (fig.4). Il constitue une limite majeure tant sur le plan géologique que géomorphologique entre la plaine des Flandres, au nord, où affleurent principalement les sédiments tertiaires sableux et argileux, et le plateau picard au sud, constitué des formations crayeuses du Crétacé supérieur.

Cet anticlinal, bien marqué dans la topographie par les collines de l'Artois, est un pli dissymétrique à flanc sud doux et flanc nord plus redressé. Il est affecté, dans la couverture mésozoïque, de failles longitudinales classiquement liées au rejeu inverse de failles tardi-hercyniennes qui, sauf dans le Boulonnais où elles sont en partie visibles en surface, sont surtout connues grâce aux forages et aux profils sismiques.

La faille la plus orientale du système de failles de l'Artois – et la plus proche d'Arras – est la faille de Marqueffles qui a

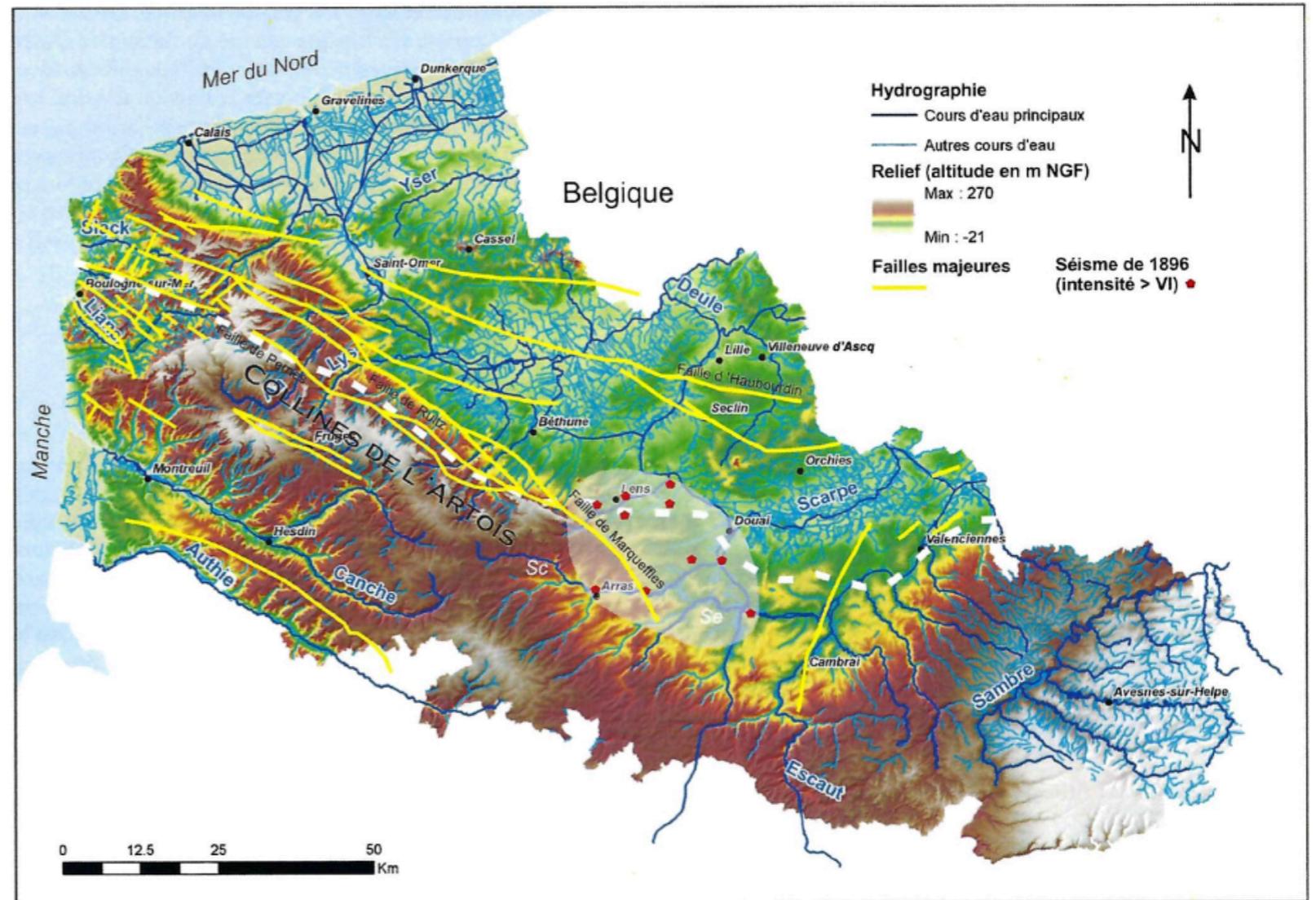


Fig. 4 : Grands traits morphologiques et géologiques du Nord-Pas-de-Calais. Relief et hydrographie

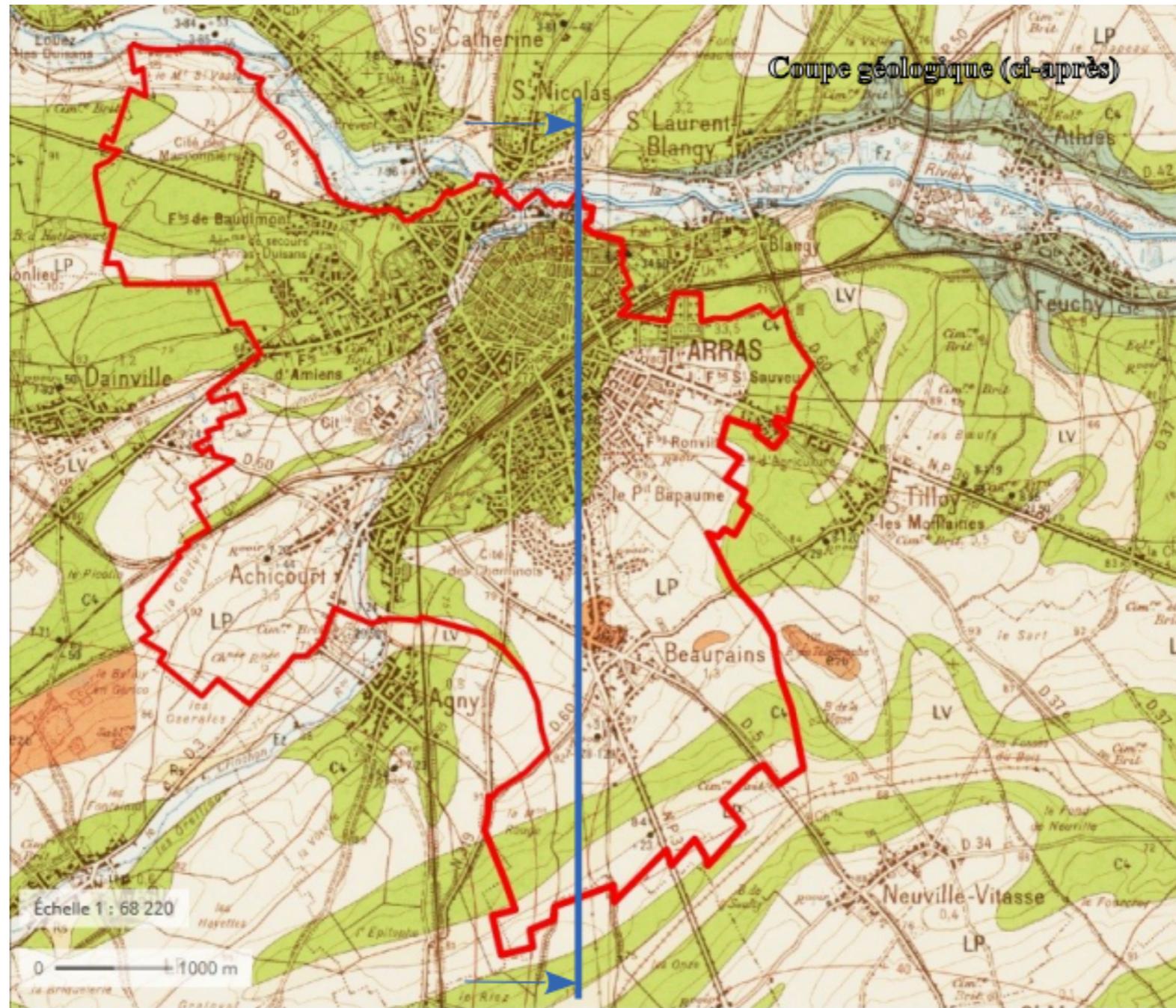
Source : cartograf.fr

probablement été la faille responsable de l'important séisme du 2 septembre 1896 dont la zone épiscopale comprend les villages de Vimy, Farbus, Vitry-en-Artois, Biache-Saint-Vaast et Fampoux (fig.4). L'intensité correspondrait à une magnitude de 4,6.

Remarque

Le tracé de La faille du Midi est indiqué par une ligne en pointillée blanche. L'ovoïde grisé représente la zone épiscopale du séisme de 1896.

La carte géologique



Légende

LV : Limon de lavage

LP : Limon Pléistocène

e2b : Landénien, sables et grès d'Ostricourt

C4 : Sénonien. Craie à *Micraster leskei*

Remarques

La **droite bleue** précise l'emplacement de la coupe géologique de la figure 6.

Le **tracé rouge** sur la carte représente les limites de la Communauté Urbaine d'Arras regroupant 46 communes dont Achicourt, Arras et Beaurains. Les deux villes d'Achicourt et de Beaurains constituent la banlieue sud d'Arras.

Fig. 5 : Extrait de la carte géologique d'Arras au 1/50 000 (échelle non respectée)

Source : BRGM

Coupe géologique orientée du nord au sud et passant par Beaurains, Arras et Saint-Nicolas- les-Arras

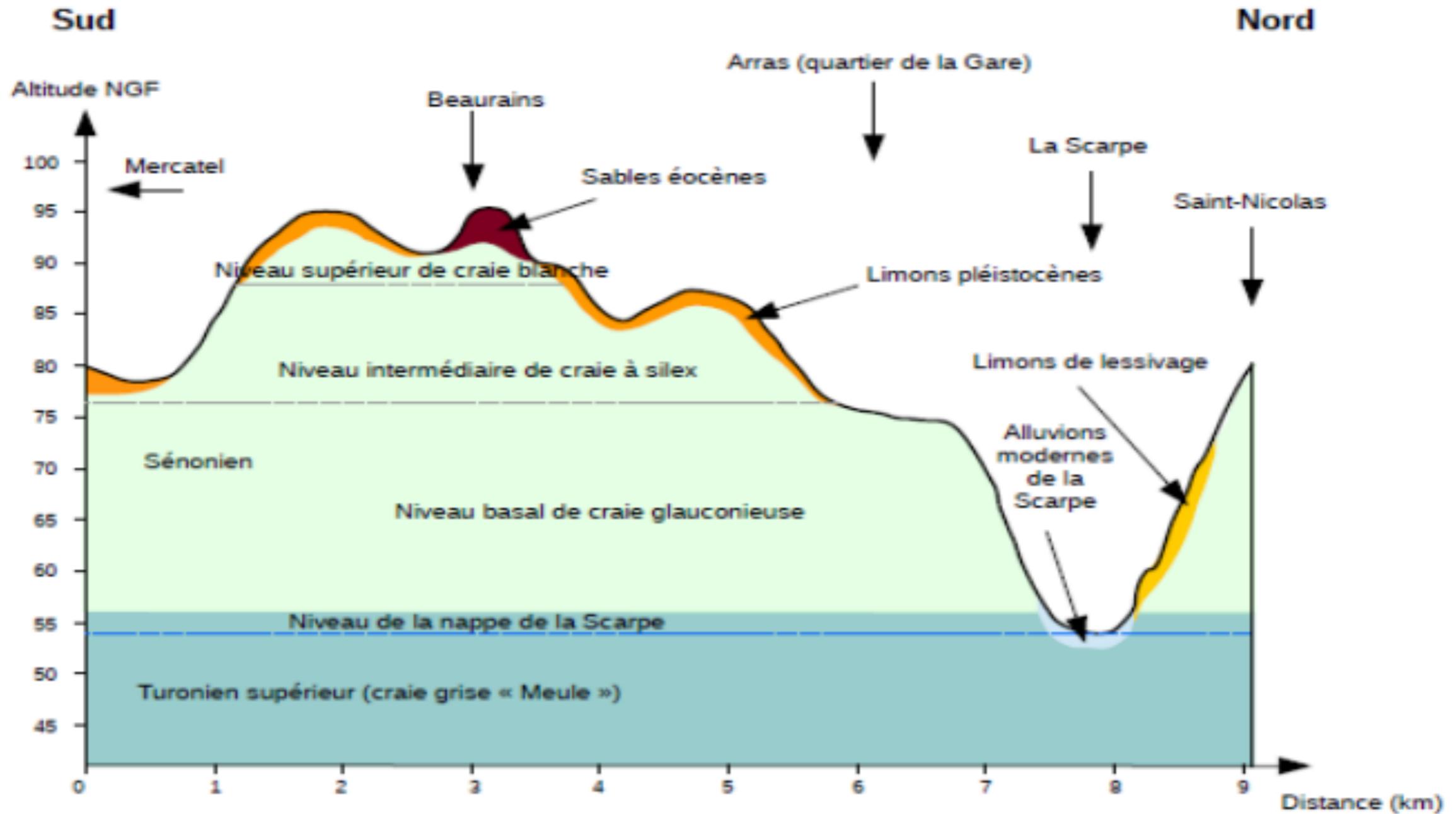


Fig. 6 : Coupe interprétative de la région d'Arras

Source : BRGM



**Fig. 7a : *Micraster coranguinum*
(Leske 1778)**

Source : Par I, porshunta, CC BY-SA

Description des différents terrains rencontrés (fig. 6)

La craie d'Arras est d'âge sénonien (C4), datant de -90 à -72 millions d'années. Elle atteint une cinquantaine de mètres et affleure au niveau du centre historique d'Arras.

La partie supérieure est constituée de craie très blanche, très pure, fine et ne renferme pas de silex. Ce niveau

représente vraisemblablement le Santonien. Elle peut être exploitée en catiches, pour le marnage des champs.

La partie inférieure est exploitée en chambres, piliers et catiches. Rapportée au Coniacien situé entre $89,8 \pm 0,3$ Ma et $86,3 \pm 0,5$ Ma, elle est mieux représentée dans la région. C'est la craie blanche à silex (zone à *Micraster coranguinum* (fig.7a). On y retrouve également *Inoceramus involutus* (fig. 7b).

Les bancs inférieurs de cette craie, plus gris, ou jaunâtres, légèrement glauconieux et plus résistants, ont été exploités comme pierre de taille, notamment dans des carrières souterraines de la région d'Arras.

Les marnes basales du Turonien moyen sont affleurantes au nord-est de la ville, dans le secteur de Feuchy.

Remarque

Le Sénonien est l'ancienne appellation qui correspond au Maestrichtien, Campanien, Santonien et Coniacien.

Fig. 7b : *Inoceramus involutus*



Origine des roches rencontrées

La craie a une structuration en couches horizontales. Elle est essentiellement composée par une accumulation de coccolithes (du grec Kokko « pépin » et lithos « pierre »).

Celles-ci sont des plaques en forme de disques qui proviennent d'algues unicellulaires (les coccolithophoridés) (fig. 8) qui font partie du nanoplancton



Fig. 8 : Coccolithes et spicule d'oursin qui mesure plusieurs dizaines de micromètres

Photo SGN 70 3612

(entre 5 et 50 micromètres).

Ces microalgues se caractérisent par leur squelette externe en carbonate de calcium et en forme de plaques circulaires qu'on appelle coccolithes (fig. 9).

Après la mort de l'algue, ces plaques se déposent au fond de la mer, elles forment une boue crayeuse qui se compacte sous le poids des sédiments et durcit pour former la craie.

On estime le taux de sédimentation après compaction à 0,025 mm par an, soit 2,5 cm par millier d'années, ce qui correspond à un dépôt initial de boue crayeuse d'environ 7 à 8 cm par millier d'années, la vase contenant en moyenne 70% d'eau.



Fig. 9 : Coccosphère préservée constituée de facettes calcaires (10 à 30 coccolithes). Observation au MEB (microscope électronique à balayage).

Photo SGN 70 3-1

La compaction ultérieure due au poids des sédiments a chassé l'eau, aboutissant à la genèse de la craie. On estime que cette craie s'est déposée dans la mer à une profondeur située entre 100 et 500 m.

En savoir plus

Géodéo : La formation de la craie
Vidéo du Conservatoire des espaces naturels montrant la formation de la craie.



Les silex

Ce sont des roches très dures, grises avec un cœur noir et cristallin comme du verre (en calcédoine). Ils sont alignés en bancs continus ou dispersés dans la craie.

Les géologues pensent qu'ils sont issus d'organismes marins microscopiques (radiolaires, diatomées, silicoflagellés...) et plus gros comme les éponges. Leur squelette, constitué de silice, se dissolvait peu à peu à leur mort.

Quand la teneur en silice dissoute dans l'eau était importante, les molécules de silice s'aggloméraient et imprégnaient le fond marin : la silice précipitait. Le gel siliceux ainsi formé glissait dans des terriers d'animaux vivant enfouis dans le sédiment.

Le silex en a gardé la forme. La silice qui continuait à précipiter, le faisait de préférence autour de ce premier noyau. Le centre s'épurait peu à peu et devenait de la calcédoine pure. Si le cœur de calcédoine est noir et lisse, la surface est blanchâtre, rugueuse ; elle est riche en résidus de craie (fig. 10 et annexe 3).



Fig. 10 : Silex avec son cœur de calcédoine et son cortex.

Photo A. Beucherie

Remarque

Dans les silex, le cœur noir correspond à de la calcédoine, riche en silice, avec autour un cortex plus clair car plus carbonaté. Le cortex est lié à la diffusion de la silice dans la craie autour, elle est donc moins concentrée.

Comment expliquer la présence de lits de silex dans la craie du Coniacien ?

Pour comprendre l'existence de ces silex, il est nécessaire d'élargir l'étude des roches de cette époque au Nord de la France

Dans le Nord de la France, existe un niveau marneux : l'East Cliff Marl (à Douvres), 4-5 cm d'épaisseur, gris beige avec des résidus de cendres volcaniques altérées, contenant des quartz choqués et des zircons, lié à un volcan explosif (au moins 5 explosions). Les éruptions ont provoqué une baisse de la luminosité, les cendres ayant couvert une partie de l'Europe. Il a donné une couche de bentonite (cendre altérée au fond de l'eau). C'est un bon niveau-repère, le volcan étant daté de la fin du Turonien.... C'est aussi un niveau visible dans des carrières qui se visitent sur Lille.

A ce moment, les eaux de l'océan Atlantique ont une température de 33° environ dans nos latitudes, avec un niveau marin eustatique 200 à 300 mètres plus élevé qu'aujourd'hui. L'océan Atlantique poursuivait son



Fig. 11 : Lit de silex tabulaires plus carbonaté.

Photo A. Beucherie

ouverture vers le nord, provoquant des rifts et des volcans associés. Il s'agissait de volcans basaltiques a priori effusifs, mais avec localement des volcans explosifs comme celui au sud de l'Angleterre à la fin du Turonien. Il pourrait s'agir de différenciations du magma.

Au-dessus, existent quelques niveaux marneux très fins (visibles sous forme

de marnes à Caffiers et Douvres). On les retrouve sous la forme de silex tabulaires dans le Boulonnais et à Arras, sauf à Haubourdin où le niveau est resté marneux.



2 lits successifs de silex cornus séparés par environ 50 cm de craie.

Chaque lit marque une diminution de la sédimentation calcaire et l'installation de terriers.

Fig. 12 : Silex cornus.

Photo A. Beucherie

Dans les Boves d'Arras, ces niveaux de silex tabulaires discontinus (fig.11) existent dans une craie tendre poreuse (30-40%), correspondant à un taux de sédimentation de la boue crayeuse (7-8 cm en mille ans) donnant après compaction 2 mm par an. La craie contient des coccolithes d'algues unicellulaires, sous environ 200-300 mètres de hauteur d'eau. La boue pouvait contenir 70% d'eau. Le niveau

inférieur de silex tabulaires très étendu dans le nord de la France et le sud de l'Angleterre a été daté par les inocérames (fig.7b).

Des silex cornus (fig. 12) formant des lits plutôt discontinus pouvant être séparés d'environ 50 cm sont également présents (20 000 ans environ séparent deux lits de silex cornus). Ces lits sont séparés par une craie uniforme. La craie s'est formée

pendant des périodes plus chaudes favorables à la production des algues et donc à la formation des coccolithes. Les lits de silex se sont formés pendant des périodes plus froides d'environ 4 degrés, la baisse de température pouvant provoquer un arrêt ou une forte diminution de la sédimentation calcaire. La répétition de ces lits de silex cornus est liée aux cycles de Milankovitch, en particulier à la précession des équinoxes.

Les silex cornus (fig. 12) ont pour origine des terriers de crustacés ou d'oursins, remplis ensuite par la silice solubilisée des algues radiolaires et des éponges. C'est cette silice déposée dans les terriers qui s'est ensuite transformée en silex. Au moment de sa formation, le terrier était enfoui de 10 à 15 cm dans le dépôt sédimentaire. Ces crustacés ne pouvaient y vivre que pendant les périodes plus froides de moindre sédimentation calcaire. On retrouve des lits plus marneux dans la craie avec ces alternances, tous les 50 cm, liées à un refroidissement au Cran d'Escalles. On trouve aussi ces bioturbations de terriers intacts sans silex à l'intérieur.

Il y a donc trois origines possibles aux silex en fonction de la source de la silice à l'origine du dépôt :

- L'apport de cendres volcaniques riches en silice déposées par retombées des cendres au fond de l'eau (bentonite, par exemple). Le niveau marneux se transforme alors en silex tabulaire (fig. 11).
- Les apports terrigènes par des rivières nécessitant une côte et donc un relief continental. Dans la région, c'est le cas dans le bassin de Mons, sur les marges du bassin sédimentaire, là où la colonne d'eau est moins profonde. Ces apports terrigènes siliceux produisent ainsi de grosses épaisseurs de silex.
- Des terriers liés à des bioturbations se remplissant a posteriori de sédiments plus siliceux et donnant des silex cornus (fig.12) ayant plus ou moins la forme des terriers.



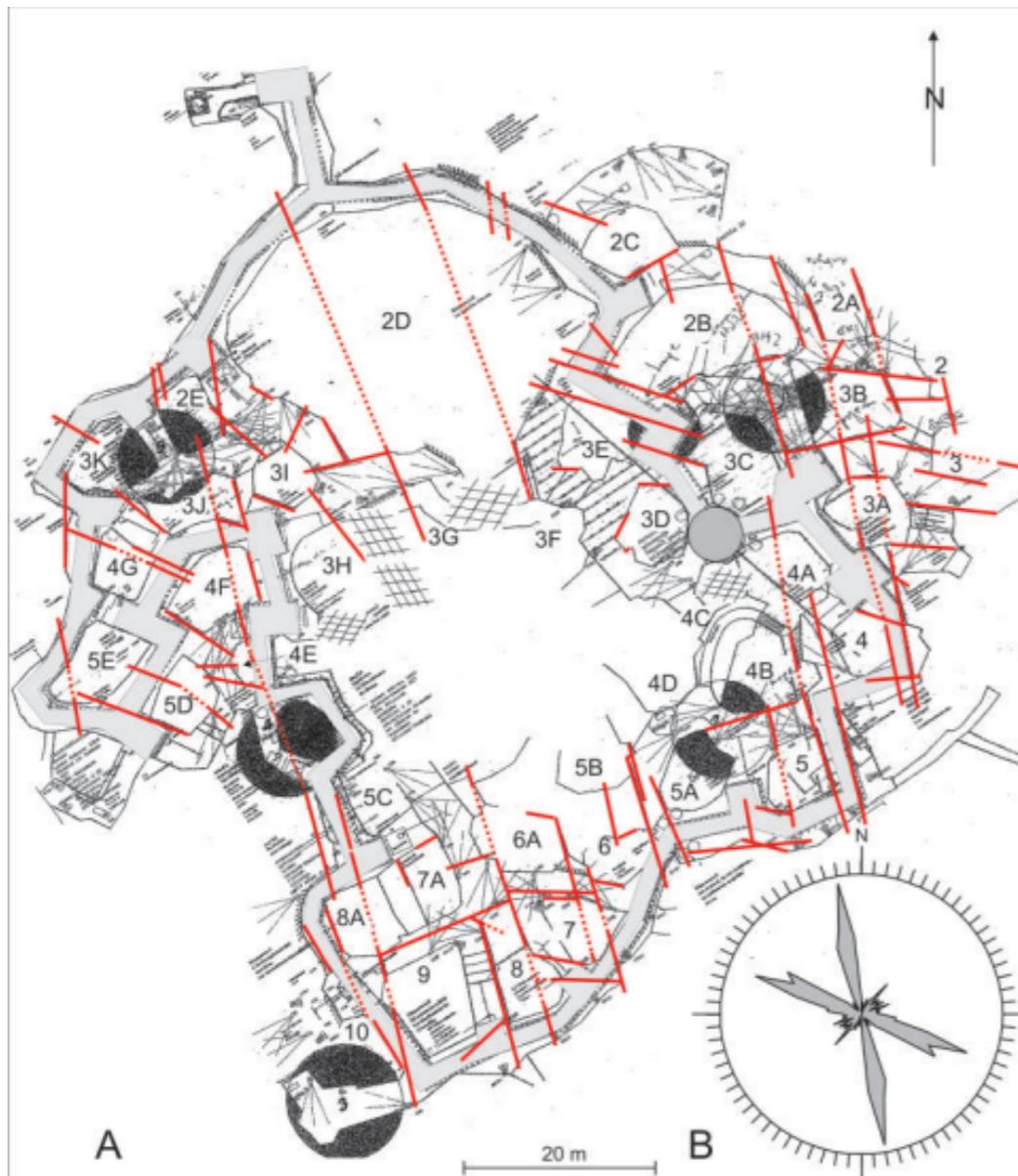


Fig. 13 : Carte des plans de fracture pluri-métriques à pluri-décamétriques (en rouge) relevés dans la carrière Wellington (A) et rosace directionnelle de l'ensemble des 561 fractures (failles et diaclases) mesurées (B). Plan de la carrière : Ville d'Arras, direction des services techniques. *Source : Bergerat et al 2018*

Le tracé et le cercle en grisé représentent le parcours touristique et l'ascenseur. Les hachures entrecroisées indiquent les murets et/ou tas de déblais.

La tectonique

Une étude tectonique des détails des failles et fractures dans la carrière Wellington (fig. 13) a débuté en 2014. Les relevés effectués montrent que les côtés des piliers sont très fréquemment constitués par de grandes diaclases ou des plans de faille, corroborant l'hypothèse

d'une exploitation de la roche largement guidée par la fracturation tectonique existante (fig. 14).

Remarque 1

Les diaclases sont des cassures sans déplacement apparent, alors que les failles sont accompagnées d'un mouvement relatif de deux compartiments.

Remarque 2

Un focus sur les diaclases et failles des carrières du Faubourg de Ronville (carrières Wellington et Blenheim) dans le Coniacien moyen et Crétacé est présenté en annexe 4.

Fig. 14 : Exemples de fractures formant les côtés des piliers dans la carrière Wellington.

A : Diaclase sur un côté du pilier 2B ; **B :** Failles normales (pendage 75°N) sur le côté du pilier 3 et la paroi de la carrière. *Source : Bergerat et al 2018*

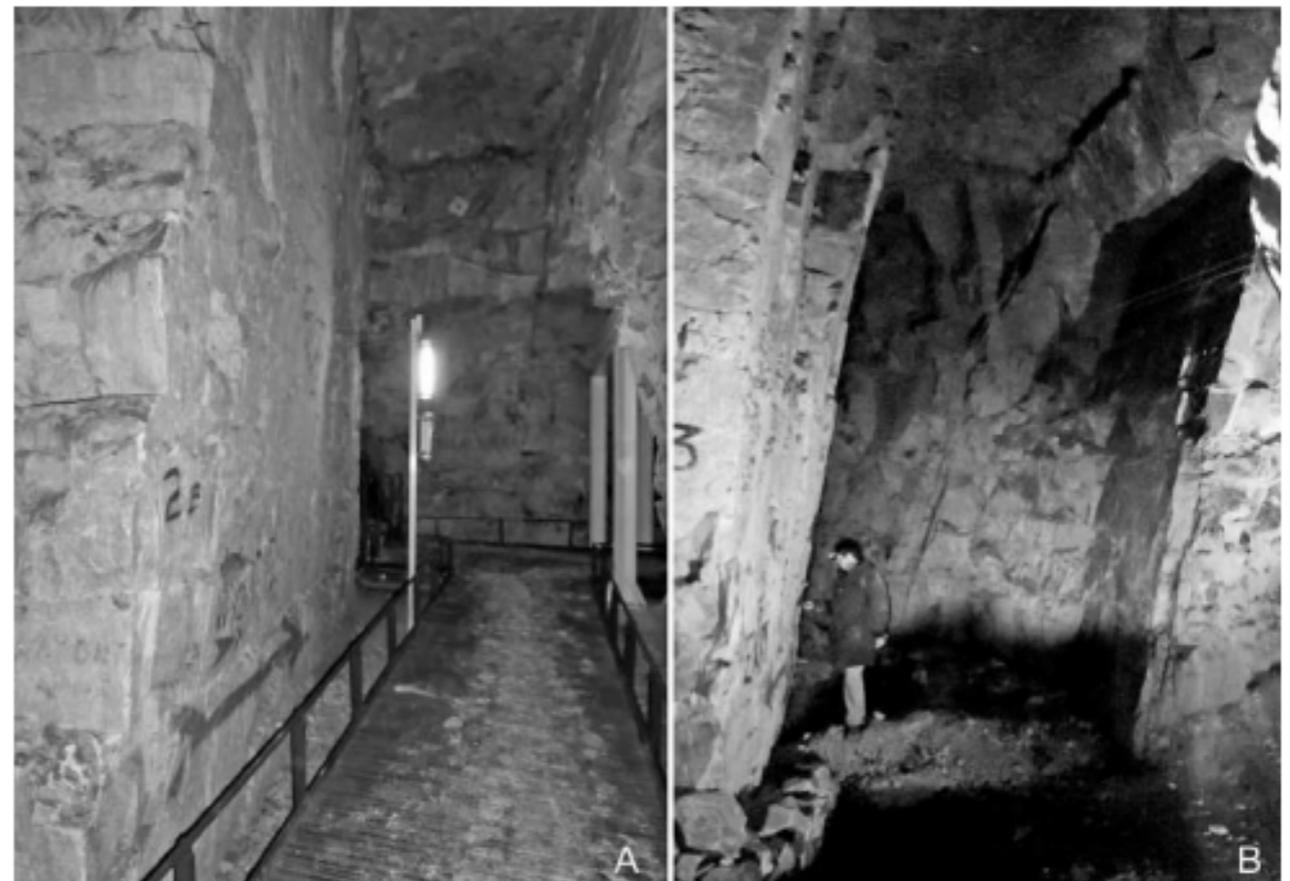




Fig. 15 : Puits de carrière en « bouteille » vu depuis le dessous. *Source : Y.Henry-SAM Arras*

L'exploitation de la roche

La présence d'un puits de carrière en forme de bouteille appelé « catiche » (fig.15) à Wellington montre que l'exploitation d'une carrière débutait par le percement d'une ouverture verticale depuis la surface. Celui-ci descendait jusqu'aux formations géologiques recherchées par le carrier afin d'y extraire la roche. Depuis ce point d'accès, des galeries étaient alors percées en suivant des repères géologiques précis, qui se matérialisent sous la forme de lits de silex renseignant sur la présence d'une roche de qualité spécifique. L'artisan était aussi guidé par la présence d'une fracturation naturelle qui lui assurait une prédécoupe de la roche. Une fois la paroi devant lui exploitée, l'artisan continuait d'avancer, formant ainsi une galerie principale. À partir de cette dernière, des couloirs secondaires étaient creusés. Le recoupement de ce réseau se faisait autour de piliers. Ces imposantes masses de roche inexploitées servaient à soutenir le ciel de carrière.

L'utilisation des fractures naturelles facilita sans conteste le travail du carrier en réduisant l'effort physique demandé pour extraire un bloc.

GÉOLOGIE ET HABITAT

Un exemple d'impact de l'action humaine, bénéfiques et risques à la surface de la Terre

ARRAS

LA VILLE SOUTERRAINE

IV. L'HISTOIRE DES CARRIÈRES



Fig. 16a : Exemple de galeries présentes dans la carrière Wellington. *Source : F. Duchaussois*

Des puits d'extraction de la craie sont présents dès l'époque antique sur le site d'Arras. Ils délimitent le noyau de la ville antique estimé à 3 ha. On retrouve des trous de pieux autour des puits qui supposent l'installation de treuils pour la

descente des carriers et la remontée des matériaux. Les carrières sont percées dans la craie à une profondeur d'environ 10 m.

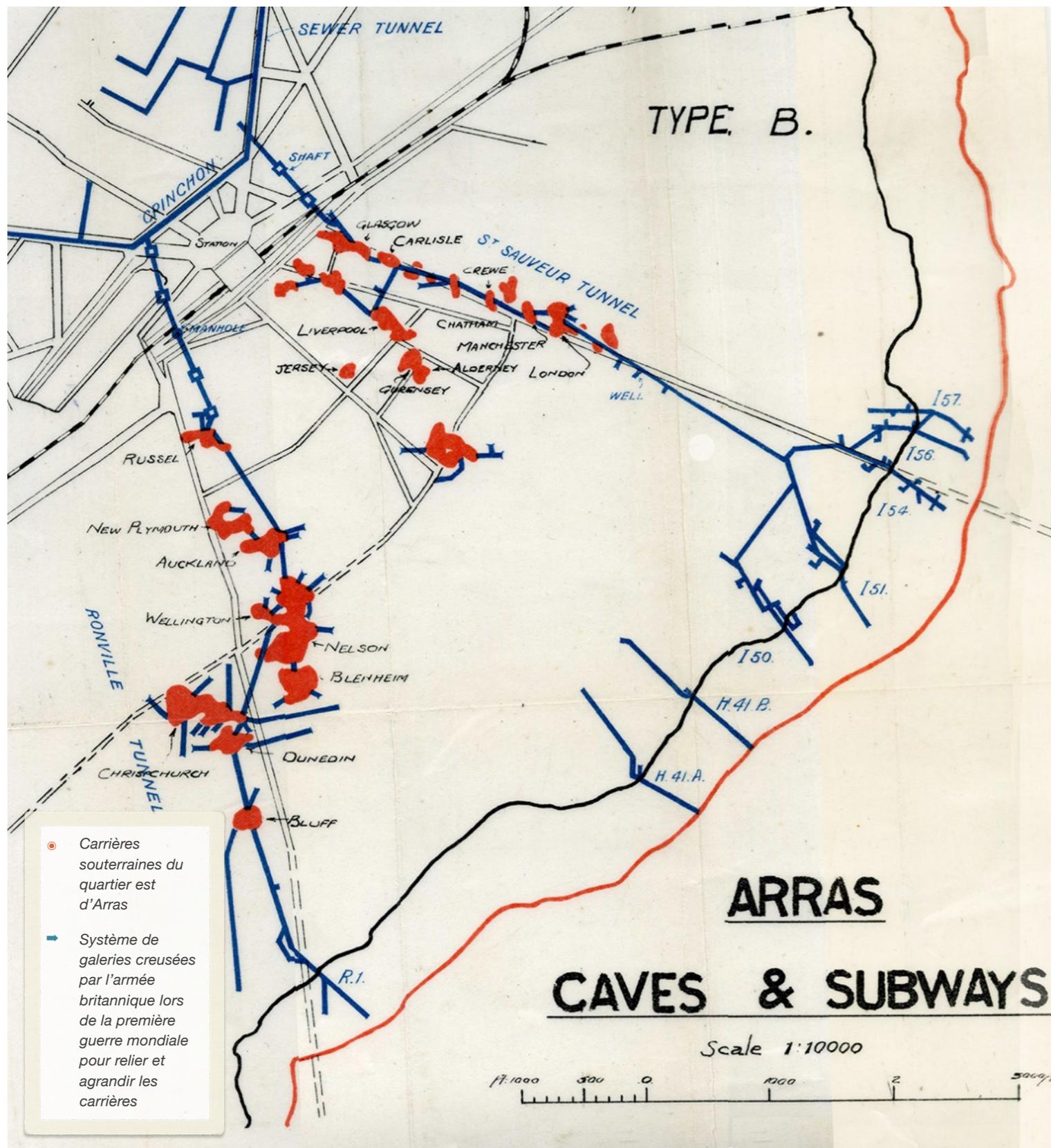
Au cours du 1^{er} siècle et jusqu'au IV^e siècle, le mode d'extraction change, des carrières à ciel ouvert sont exploitées pour fournir les chantiers de la ville en pleine expansion.

On retrouve ensuite des témoignages de l'exploitation de la craie datés du X^e et XI^e siècle. La ville médiévale est en pleine essor (remparts, édifices religieux,

maisons...) et la méthode d'extraction de la craie est identique aux pratiques romaines : creusement de puits verticaux d'environ 12 m de profondeur aboutissent à des galeries d'exploitation de 2,50 m de hauteur (fig.16) qui suivent les fractures tectoniques et qui sont donc irrégulières. Ces exploitations n'ont jamais été approfondies jusque la nappe phréatique, pour une évidente raison de sécurité.

Fig. 16b : Exemple de galeries présentes dans la carrière Wellington. *Source : J. Duchemin*





Les carrières sont exploitées jusqu'au XVIII^e siècle avant de tomber dans l'oubli.

Elles sont explorées et répertoriées en 1990 par les archéologues de la ville d'Arras qui découvrent l'histoire et le rôle qu'ont joué ces carrières souterraines notamment pendant la Première Guerre Mondiale.

Dès le XII^e siècle, avec le développement du marché, d'autres sites d'extraction sont privilégiés. Les Boves subissent de nombreuses transformations et sont témoins de moments importants de l'histoire. Elles deviennent alors des caves de stockage pour les marchands.

Pendant la **Première Guerre Mondiale**, elles sont utilisées stratégiquement par les soldats du Commonwealth. Les milliers de graffitis britanniques ont permis de révéler la place stratégique de ces carrières lors de l'offensive militaire de 1917.

Fig. 17 : Quartier est d'Arras, plan du réseau souterrain. Source : A. Jacques, 1997

Pour ne pas renouveler les grandes hécatombes de Verdun et de la Somme, l'état-major britannique utilise ces carrières souterraines, exploitées en

chambres et en piliers dans la craie de sous-sol d'Arras, avant l'assaut de la célèbre bataille d'Arras pour concentrer ses troupes et leur permettre de surgir à

quelques dizaines de mètres devant les premières lignes ennemies (fig.20).

Pour ce faire, de novembre 1916 à mars 1917, 500 tunneliers venus de Nouvelle-Zélande creusent et relient entre eux un vaste réseau de galeries souterraines.

Fig. 20 : l'un des escaliers creusés dans la carrière Wellington permettant aux soldats de surgir par surprise au plus près des troupes allemandes. *Source : J. Duchemin*





Fig. 18a



Fig. 18b

Fig. 18a, b, c, d : Témoignages de l'occupation de la carrière Wellington par les troupes de soldats durant la 1^{ère} Guerre Mondiale. *Source : F. Duchaussois*



Fig. 18c



Fig. 18d

C'est à la force de leurs bras qu'ils creusent 8 kilomètres de galeries soit 80 mètres par jour. Ce réseau rejoint les galeries souterraines présentes sous la ville d'Arras et constitue un ensemble de 20 kilomètres.

C'est une véritable ville souterraine équipée d'un éclairage électrique alimenté par sa propre petite centrale, de cuisines, de latrines et d'un centre médical entièrement équipé pourvu d'un bloc opératoire, qui peut abriter 24 000 soldats dans le plus grand secret (fig. 18 a,b,c,d).



Fig. 19 : Carte de la Nouvelle-Zélande et des carrières souterraines d'Arras du quartier de Ronville. Source : Open Edition Journals

La carrière Wellington fait partie du réseau du quartier de Ronville où les tunneliers néo-zélandais ont apporté leur savoir-faire de mineurs.

Ce réseau est doté de noms de villes néo-zélandaises qui respectent une certaine similitude avec la disposition topographique de ces appellations et la position géographique de ces villes

dans les îles néo-zélandaises (fig.19), ceci afin de permettre une circulation plus facile et aussi pour rendre hommage à ces hommes qui ont creusé la roche.

En savoir plus
L'histoire de la Carrière Wellington
Le site internet officiel du lieu présente un aperçu imagé de la Carrière Wellington.



En savoir plus
Un patrimoine caché : l'héritage de la guerre des mines à Arras
Article d'Antony Byledbal, publié en 2014 dans In Situ, Revue des patrimoines.

C'est le 9 avril que les soldats britanniques surgissent des tunnels et attaquent les lignes allemandes (fig. 20). Cet assaut marque le début de la bataille d'Arras qui durera jusqu'au 17 mai.

Des photos et des cartes témoignent de cette bataille parmi les plus meurtrières de la Grande Guerre (fig.21 a et b).

Pendant les bombardements de la Seconde Guerre Mondiale, elles servent d'abris anti-aériens pour la population d'Arras.

Fig. 21a et b : Projections sur les murs de la carrière Wellington en souvenir des combattants de la Première Guerre Mondiale. Source : J. Duchemin



Fig. 21a

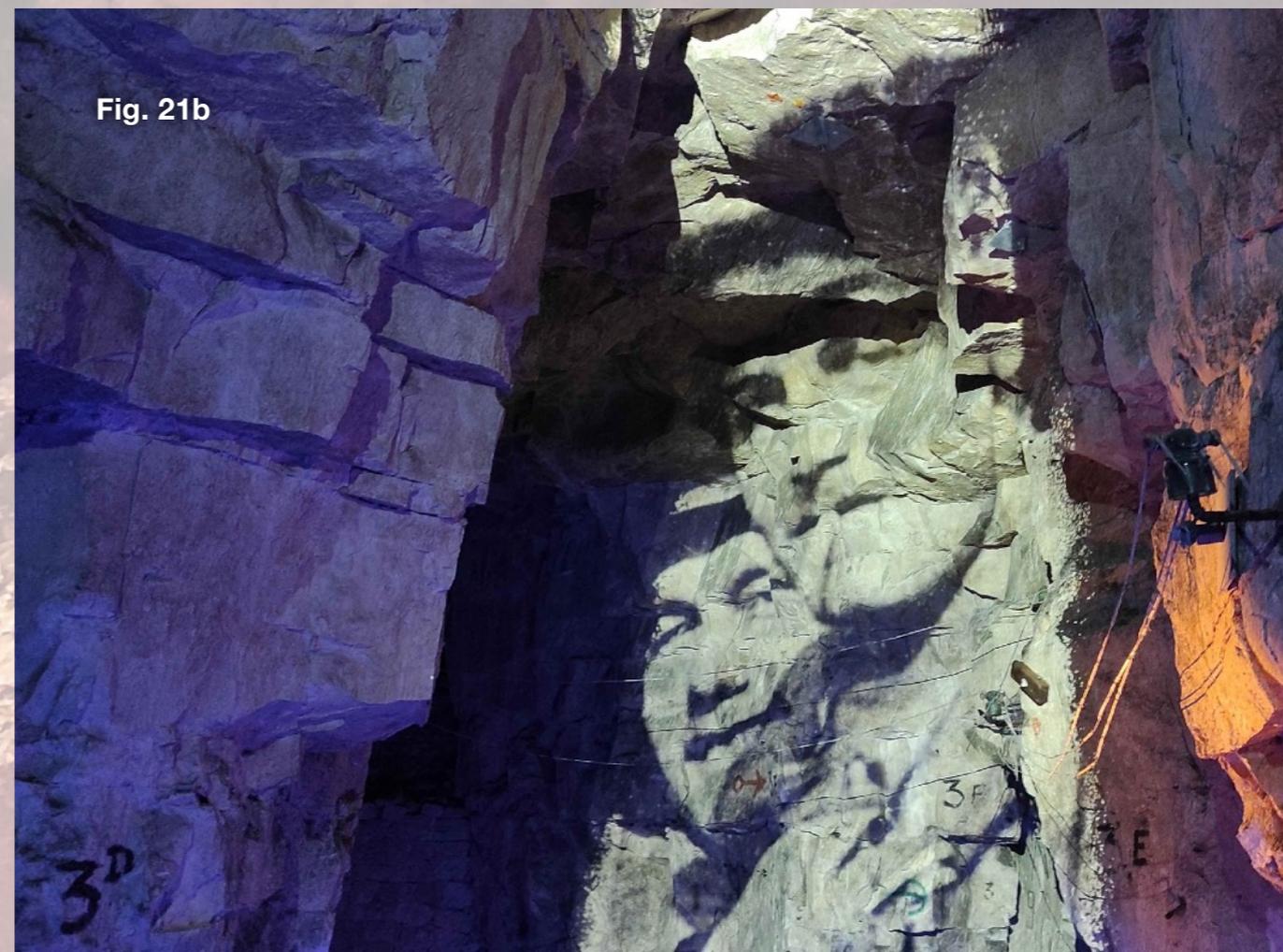


Fig. 21b

GÉOLOGIE ET HABITAT

Un exemple d'impact de l'action humaine, bénéfiques et risques à la surface de la Terre

ARRAS

LA VILLE SOUTERRAINE

V. LES RISQUES LIÉS
À LA PRÉSENCE DES
CARRIÈRES DANS LE
SOUS-SOL DE LA
VILLE



Fig. 22a

Ces carrières dans le sous-sol d'Arras se dégradent avec le temps et entraînent des mouvements de terrain de deux types :

- Des effondrements qui sont des ouvertures soudaines et brutales du sol suite à une rupture de pilier ou l'éboulement d'une galerie ou d'une salle souterraine (fig. 22a et b). La rupture des piliers en profondeur se répercute instantanément en surface par un abaissement violent et local de la surface du sol. Ce type des désordres peut provoquer de nombreux dégâts aux ouvrages et faire beaucoup de victimes physiques en raison de sa soudaineté.

Fig. 22a et b : exemples d'effondrement dans la ville d'Arras et trou formé sur la grand place lors du démontage du marché de Noël au niveau du parking à moto, près de la rue de la Taillerie.

Source : La voix du Nord

- Des affaissements (fig. 23) qui sont des phénomènes lents et progressifs qui se caractérisent par l'abaissement d'une surface suite à une perte de soutien. L'affaissement est caractérisé par une dépression topographique en forme de cuvette à fond plat. Il est spécifique des carrières souterraines mal remblayées, soit recouvertes de formations dites « souples » quand la cavité est profonde. Il est généralement peu dangereux pour l'Homme car la déformation est souple sans rupture mais peut entraîner des dégâts aux ouvrages.

Un périmètre de sécurité après un affaissement sur la Grand-Place d'Arras

Un trou s'est formé sur la Grand-Place d'Arras, au niveau du parking à motos, lors du démontage du marché de Noël. La communauté urbaine a mis en place un périmètre de sécurité.



Fig. 22b

Le trou s'est formé en bordure du trottoir, juste en face des distributeurs du Crédit Agricole.

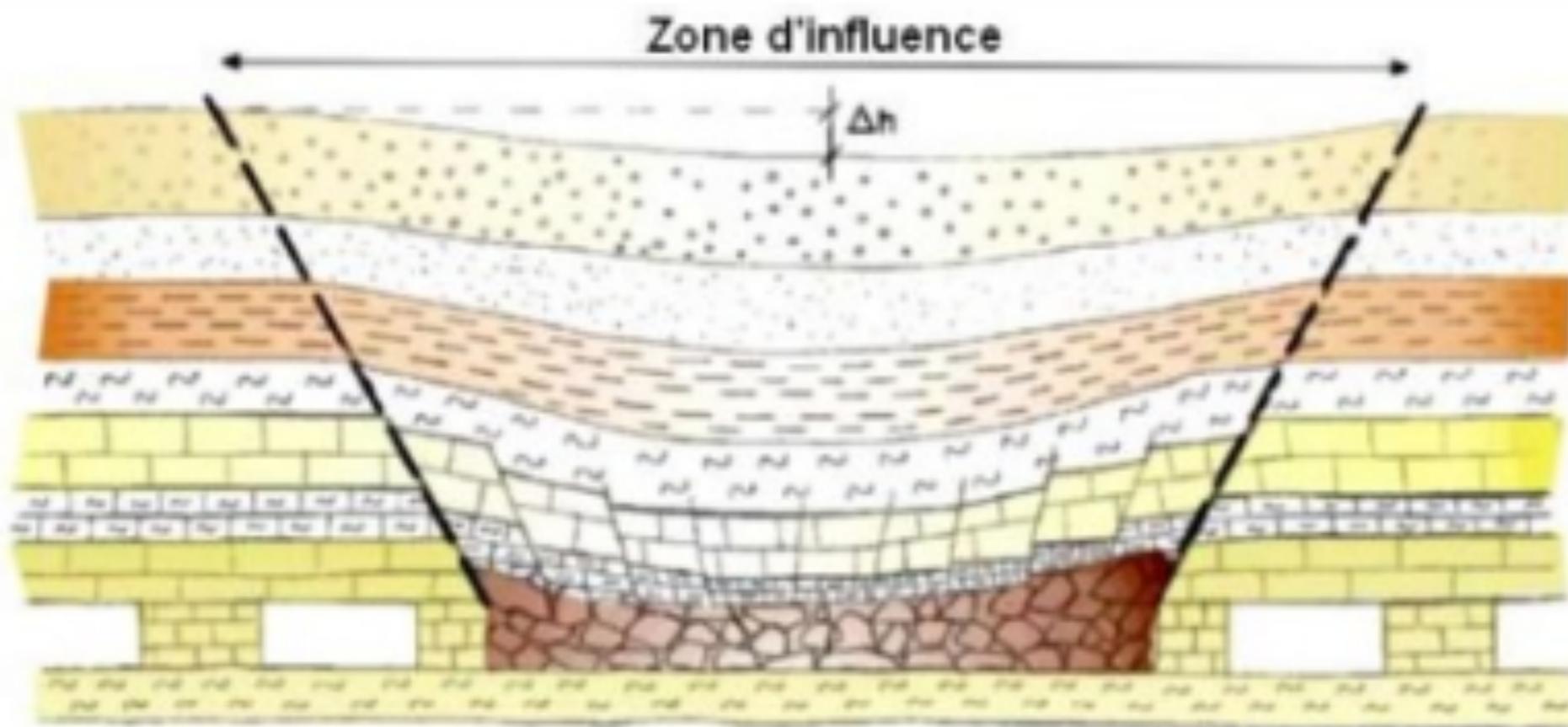


Fig. 23 : Schéma d'un affaissement.

Source : BRGM

Le recensement des cavités souterraines de l'Arrageois a été réalisé en 2018 par la Direction Départementale des Territoires et de la mer du Pas-de-Calais (fig.23) pour évaluer les risques de mouvements de terrain liés aux cavités souterraines sur le territoire de la communauté urbaine d'Arras (fig. 24).

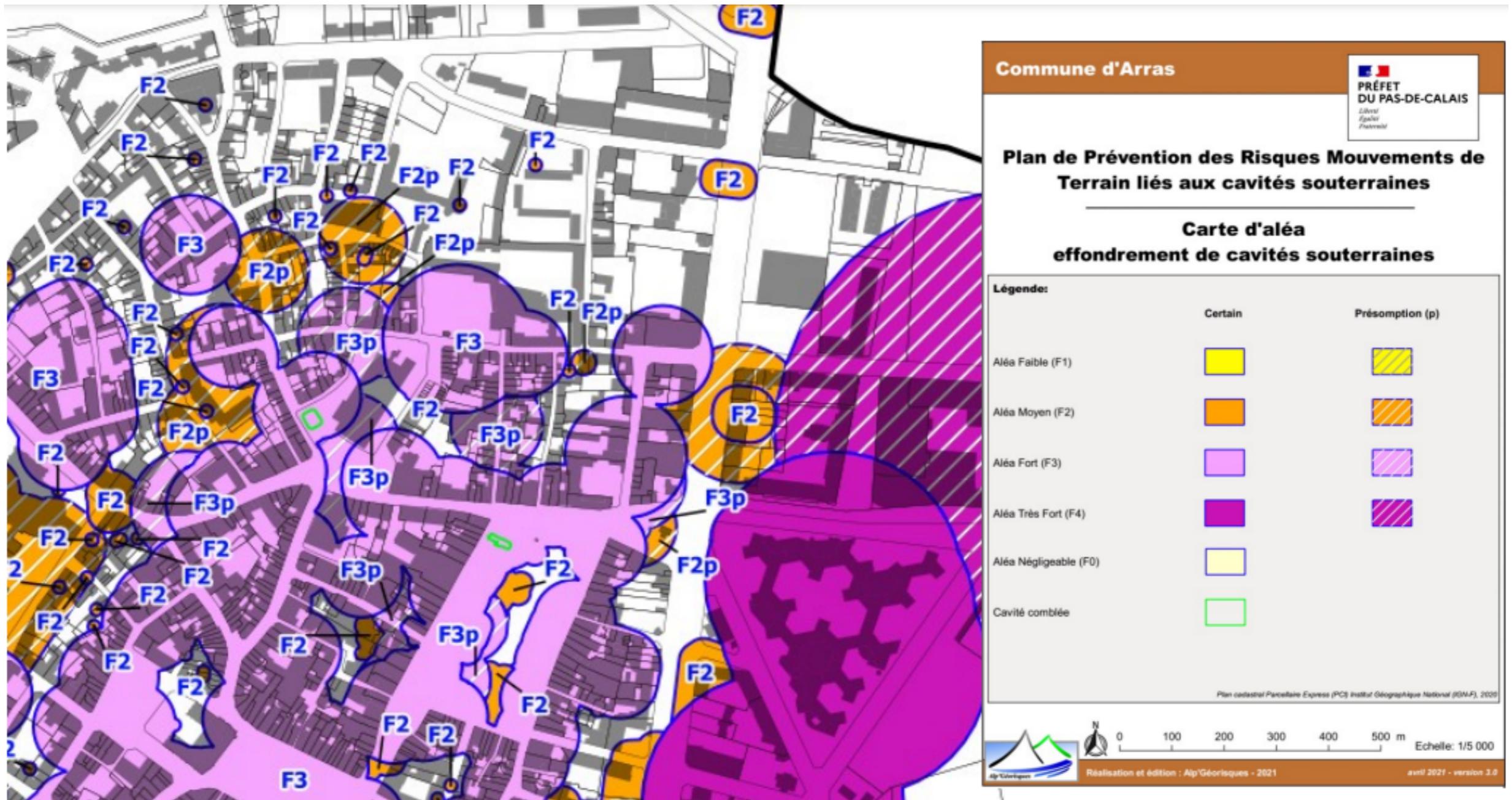
Type de cavité	Achicourt	Arras	Beaurains
Cave	2	80	
Bove		83	
Catiche		7	
Chambres et piliers	14	38	5
Galerie	38	35	2
Ouvrage militaire		1	
Sapes			1
Cavités d'origine non définies avec certitude	55	445	7
Total	109	689	15

Nb de cavités / km ²	18,4	59,2	2,5
---------------------------------	------	------	-----

Fig. 24 : dénombrement des cavités recensées dans la Communauté Urbaine d'Arras. Source : Pas-de-Calais.gouv.fr

Fig 25. cartographie des aléas effondrement des cavités souterraines – ville d'Arras.

Source : Pas-de-Calais.gouv.fr



Outre la couleur, les zones d'aléa d'effondrement seront repérées par un indice alphanumérique :

Négligeable : F0 • Faible : F1 • Moyen : F2 • Fort : F3 • Très fort : F4. L'aléa lié à la présomption de vide est cartographié à l'aide d'un indice « p ». On remarque que les aléas les plus importants (en violet foncé) sont situés au sud-est de la ville.

En savoir plus
Inventaire des cavités souterraines
Achicourt – Arras – Beaurains

Réunion de concertation du 24 avril 2018 - Diaporama.



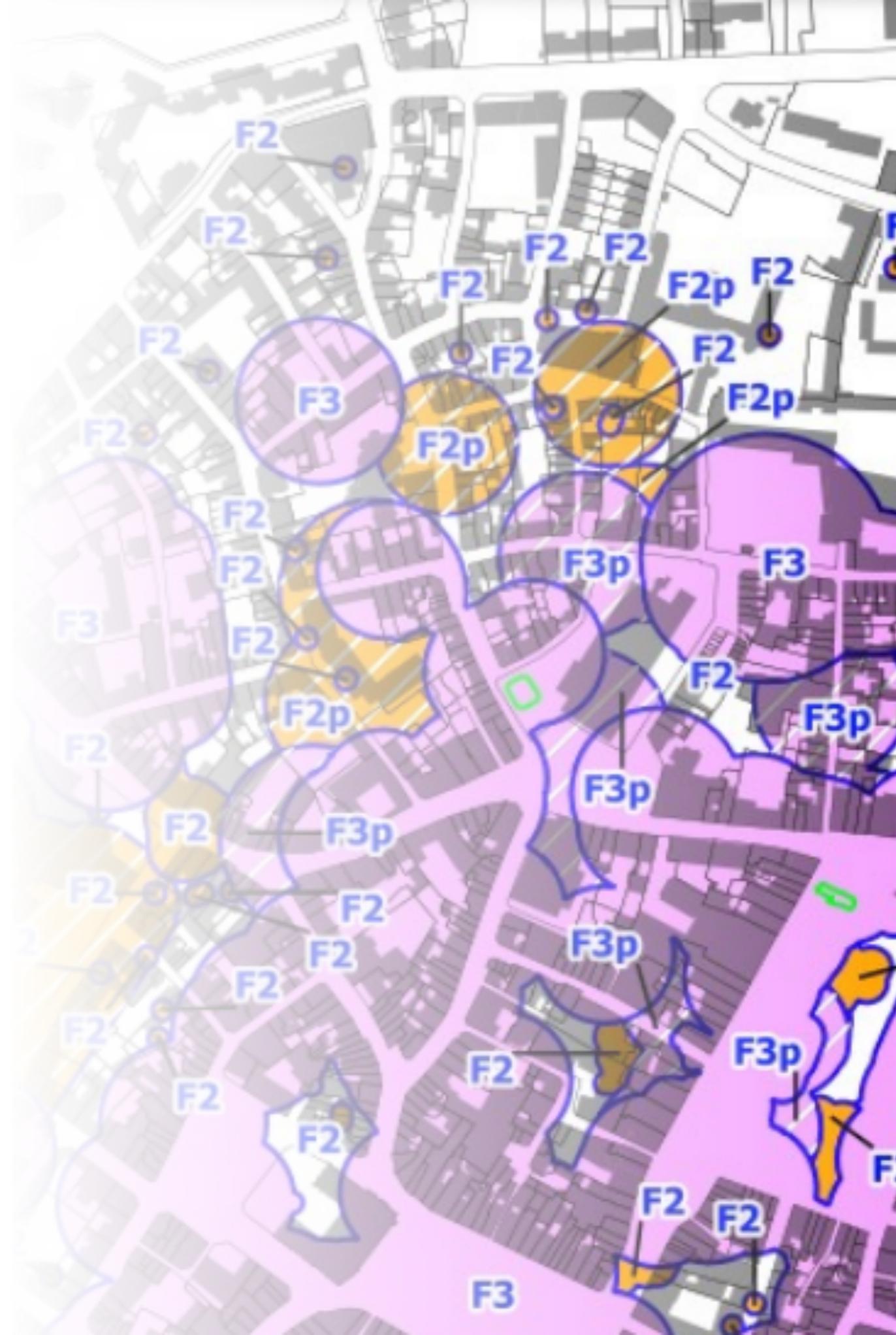
En savoir plus
Inventaire des cavités souterraines non minières et création d'une base de données numérique sur le département du Pas-de-Calais
Rapport du BRGM de 2012.

En savoir plus
Plan de Prévention des Risques Mouvements de Terrain liés aux cavités souterraines
PPR MT Achicourt Arras Beaurains : Projet de note de présentation soumis à enquête publique.



En savoir plus
Élaboration du Plan de Prévention des Risques Mouvements de Terrain liés aux cavités souterraines sur les communes d'Achicourt, Arras et Beaurains
PHASE 2 : Évaluation des aléas.

En savoir plus
Plan de Prévention des Risques Mouvements de Terrain liés aux cavités souterraines
Information sur les phénomènes et mécanismes d'instabilité.



GÉOLOGIE ET HABITAT

Un exemple d'impact de l'action humaine, bénéfiques et risques à la surface de la Terre

ARRAS

LA VILLE SOUTERRAINE

VI. ASPECTS PRATIQUES



Les boves de la place des Héros

- ▶ Entrée par l'Office de Tourisme d'Arras
- ▶ Hôtel de Ville (Beffroi), place des Héros
- ▶ Coordonnées : 50° 17' 27.68" N, 2° 46' 38.15"
- ▶ Présentation à l'accueil 10 min avant le début de la visite
- ▶ Hors vacances scolaires : Départs réguliers tous les jours 10h à 12h et de 14h à 18h
- ▶ Prévoir un vêtement chaud et des chaussures adaptées. Déconseillé aux personnes souffrant de claustrophobie ou ayant des difficultés à se déplacer.
- ▶ 20 personnes maximum par visite.
- ▶ Pour les visites de groupes, contacter le service commercialisation au 03 21 51 26 05 ou par mail : commercialisation@arraspaysdartois.com



La carrière Wellington : Faubourg de Ronville

- ▶ Entrée par la Carrière Wellington
- ▶ Rue Arthur Delétoille, Arras
- ▶ Coordonnées : 50° 16' 51.39" N, 2° 46' 58.81" E
- ▶ Carrière Wellington, Rue Arthur Delétoille à Arras
- ▶ Présentation à l'accueil 10 minutes avant le début de la visite.
- ▶ Tous les jours de 10h à 12h30 et de 14h à 18h.
- ▶ Fermeture exceptionnelle à 16h les 24 et 31 décembre..
- ▶ Durée de la visite : 1 heure 30
- ▶ Prévoir un vêtement chaud et des chaussures adaptées. Déconseillé aux personnes souffrant de claustrophobie.
- ▶ Accessible aux personnes à mobilité réduite.
- ▶ Tél . : +33 (0)3 21 51 26 95
- ▶ Fax. : +33 (0)3 21 71 07 34
- ▶ contact@arraspaysdartois.com
- ▶ www.carrierewellington.com

GÉOLOGIE ET HABITAT

Un exemple d'impact de l'action humaine, bénéfiques et risques à la surface de la Terre

ARRAS

LA VILLE SOUTERRAINE



VII. POUR ALLER PLUS LOIN

Annexe 1

Un exemple de corrélation des strates rencontrées dans les carrières du sous-sol d'ARRAS (fig. 26)

D'après F. Amedro et F. Robaszynski (2015).

L'observation des fossiles animaux et végétaux, couplée avec celle des caractères de la roche, permet non seulement de dater les couches mais aussi de les corrélérer, c'est à dire de comparer à distance des sites les uns par rapport aux autres pour les dater précisément. Ces niveaux-repères, ici les Hope Point Marls, sont caractérisés soit par une particularité lithologique (niveaux marneux de teinte sombre, lits de silex tabulaires...) soit par la présence de fossiles caractéristiques.

La figure 26 présente la suite lithologique visible dans plusieurs carrières souterraines du centre-ville d'Arras (les « Boves ») exploitées pour la pierre de taille entre les XIe et XIIIe siècles (puis utilisées comme lieux de stockage et caves), ainsi que dans la carrière Auckland située au sud-est de la ville (ancienne carrière souterraine de craie aménagée durant la Première Guerre mondiale). La coupe des « Boves » de la place des Héros et celle de la carrière Auckland montrent la succession composite sur 20 m d'épaisseur.

La moitié inférieure de la suite lithologique, dans laquelle se situent les « Boves » de la rue Saint-Denis, de la place des Héros, de l'abbaye de Saint-Vaast et la partie inférieure de la carrière Auckland jusqu'au niveau 5,20

m, montre une craie blanche, tendre, fine, traçante, entrecoupée de lits de silex noirs décimétriques en rognons. Mais la principale particularité de cet intervalle est la présence de trois lits de silex tabulaires noir, à cortex gris-blanc. Cet ensemble de trois lits de silex tabulaires, échelonnés sur une hauteur de 4 m, constitue un excellent repère visuel que l'on peut suivre dans toutes les carrières. Un test d'échinide appartenant à l'espèce *Micraster coranguinum* (Leske) a été observé à mi-hauteur de la coupe.

La moitié supérieure de la suite lithologique est visible uniquement dans la carrière Auckland. La présence d'un escalier remontant à la surface et dont la voûte est en partie non maçonnée permet d'observer la craie sur une hauteur de 13 m. L'ancienne carrière souterraine recoupe uniquement les 2,70 m inférieurs de la coupe. On observe ici aussi une craie blanche, tendre, fine et traçante, mais la succession lithologique est un peu différente de celle décrite dans les Boves.

La coupe montre un lit de silex tabulaire, puis un intervalle entrecoupé de lits de silex en rognons et enfin de la craie contenant relativement peu de silex, mais incluant des niveaux riches en fragments d'inocérames et

en éponges. En tenant compte de ces observations, le lit de silex tabulaire repéré à la base de la carrière Auckland est corrélé avec le lit de silex tabulaire le plus élevé visible dans les Boves et ce faisceau de trois lits de silex tabulaires est interprété comme représentant les Hope Point Marls définis dans le Kent par Gale et Smith (1982).

Remarque 1 : Ces silex tabulaires sont continus et présentent une grande extension géographique allant des falaises de la Manche à l'Artois et aux environs de Lille. Dans ce cas présent, il semble qu'il s'agisse à l'origine des niveaux marneux (les Hope Point Marls) du sud de l'Angleterre qui seraient oblitérés par une silicification coté France.

On se trouve donc dans la partie supérieure de l'étage Coniacien, à la base de la zone d'échinides à *Micraster coranguinum*.



Remarque 2 : Une coupe lithologique comparée des strates dans le Nord de la France et en Angleterre se trouve dans le dossier sur le pays de Lumbres : carrière de Cléty.

Carrière Auckland

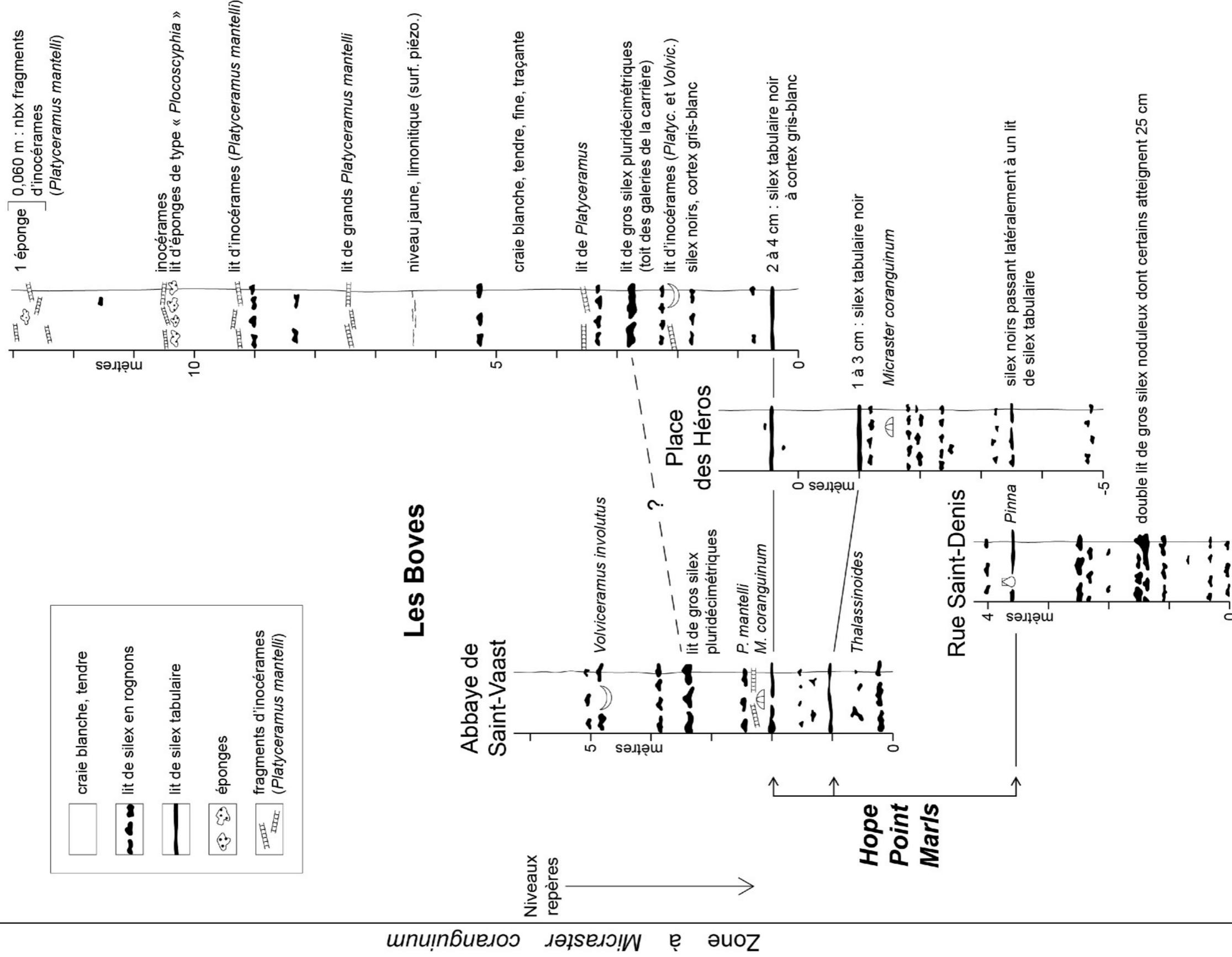


Fig. 26 : Coupe lithologique de la craie à silex coniacienne d'Arras. Les Hope Point Marls sont remplacés par les minces lits de silex tabulaires. Source : *Bulletin inf. Géol. Bass. paris (2015)*. F. Amedro et F. Robaszynski.

Annexe 2

Plan des carrières d'Arras dans le quartier de Ronville (fig. 27).

Source : *New Zealand Engineers Tunneling Company.*

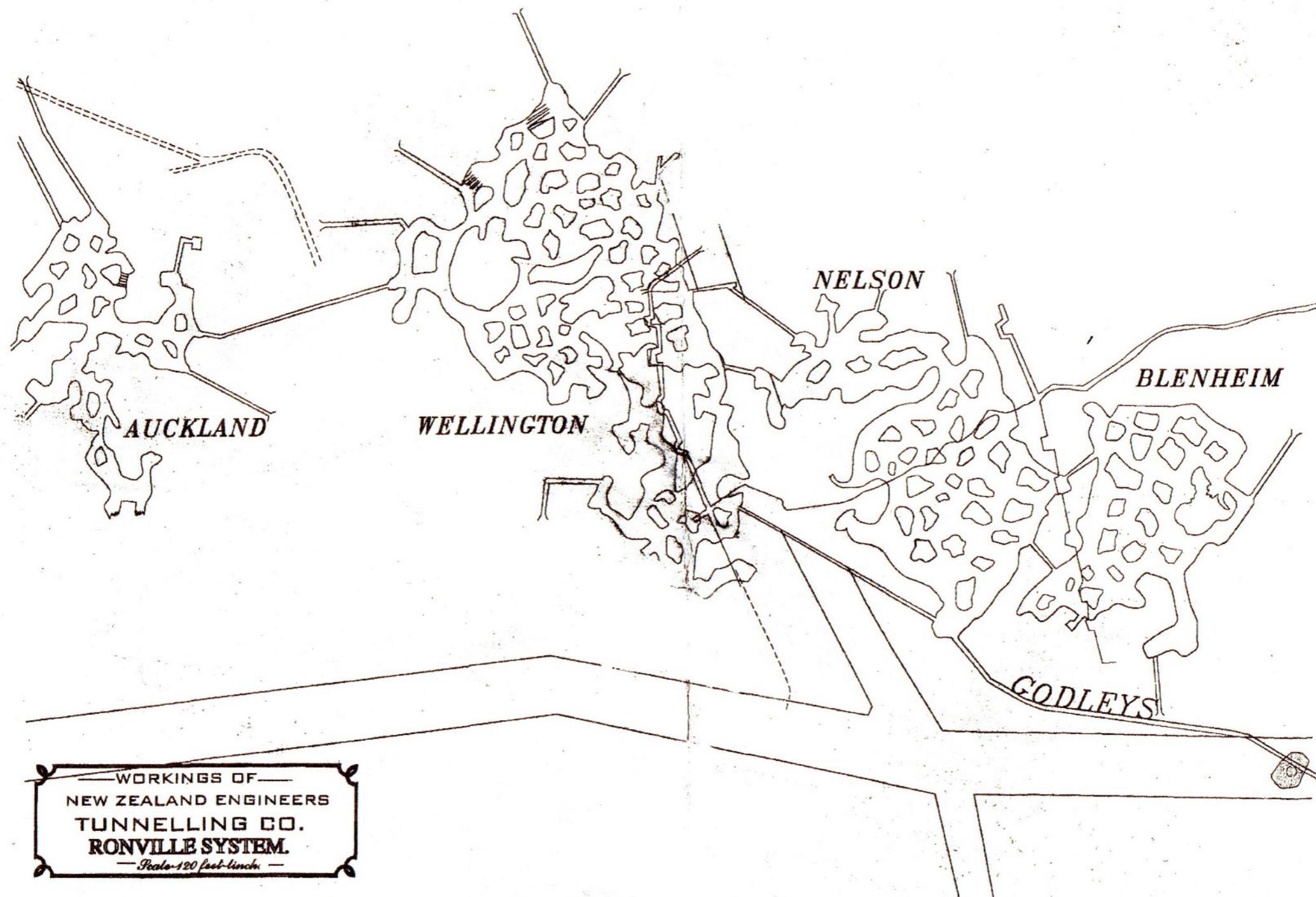


Fig. 11. – Carte des carrières Auckland, Wellington, Nelson et Blenheim dans le système carrières de Ronville (document *New Zealand Engineers Tunelling Company*).

Annexe 3

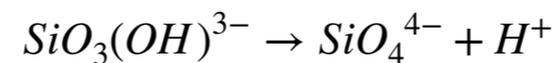
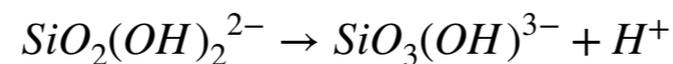
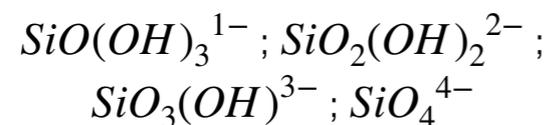
Le silex, une roche particulière

Source : Extrait de l'article de Hoyez, B. 2010. À la découverte géologique des falaises d'Étretat, présentation d'une excursion allant de la plage du Tilleul (Antifer) à la porte d'Amont (Étretat Nord). Planet Terre, ISSN 2552-9250, 8 p.

L'origine de la silice des silex

Le silicium (Si) contenu dans l'eau de mer provient originellement de l'altération des minéraux silicatés constituant la croûte continentale et est amené par les cours d'eau ou par les vents (poussières). Ce silicium peut également provenir des volcans océaniques (silice lithogénique) ou de phytolithes (silice biogénique continentale).

Dans des conditions normales de pH, le silicium est dissout dans l'eau de mer sous forme d'acide orthosilicique $SiO(OH)_4$ (encore écrit H_4SiO_4). Cette molécule fonctionne comme un acide tétraproté, les 4 protons se dissociant successivement et produisant une série d'ions monosilicates :



À un pH de 8,1, la forme neutre $SiO(OH)_4$ est dominante (96.2% du Si total).

À un pH compris entre 9,75 et 12,2, c'est $SiO(OH)_3^{1-}$ qui prédomine.

Le silicium primaire, sous ses différentes déclinaisons, est consommé par certains organismes animaux ou végétaux pour la fabrication d'un test qui les supporte ou qui les protège (silice biogénique océanique).

La plupart d'entre eux vivent dans le plancton (diatomées avec un frustule, radiolaires, ébriédiens, silicoflagellés avec un endosquelette), mais il existe des métazoaires benthiques, les spongiaires hexactinellidés et lithistidés,

qui ont un squelette formé d'un feutrage de spicules siliceux.

Ces animaux ou ces végétaux (diatomées, silicoflagellés) très anciens ont connus différentes périodes de recrudescence au cours des temps géologiques. Le Crétacé supérieur est l'une de ces périodes privilégiées, ainsi la gaize albienne est constituée en grande partie de spicules ou bien encore la craie cénomanienne contient une grande quantité d'éponges préservées en silex.

Les diatomées, qui se diversifient au Tertiaire, constituent actuellement une pompe à silice importante. Intervenant moins au Crétacé, la concentration en acide silicique de l'eau de mer devait être au moins dix fois supérieure.

Annexe 3

Le silex, une roche particulière

Source : Extrait de l'article de Hoyez, B. 2010. À la découverte géologique des falaises d'Étretat, présentation d'une excursion allant de la plage du Tilleul (Antifer) à la porte d'Amont (Étretat Nord). Planet Terre, ISSN 2552-9250, 8 p.

La précipitation biogénique de la silice est dominante. Cette silice, dite opale-A, est une silice faiblement cristallisée ou amorphe contenant jusqu'à 10% d'eau.

C'est l'activité enzymatique de l'organisme qui permet la production et la stabilisation de cette opale. Du fait de la sous-saturation en silice de l'eau de mer, lorsque l'individu meurt, son test est remis en solution.

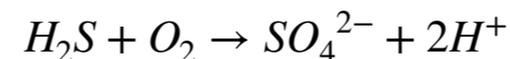
La silice bioprécipitée, bien que bénéficiant d'une assez forte production, n'est donc qu'une phase temporaire, car dans la grande majorité des cas, elle repart en solution, prête à être réutilisée dans un autre cycle. Cette dissolution des tests s'opère dans les centimètres superficiels du sédiment.

Les fluides interstitiels s'enrichissent en silice dissoute sous forme de monomères $Si(OH)_4$ qui regagnent généralement l'eau de mer. Cependant, sous certaines conditions, cette silice peut reprécipiter et entreprendre une

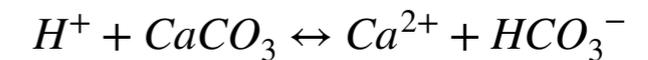
évolution diagenétique qui la préservera à l'état solide.

La formation du silex

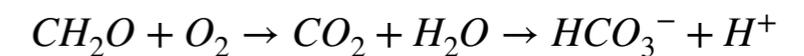
Actuellement moins de 3% de la silice biogénique est préservée dans le sédiment. La reprécipitation de la silice conduit à sa préservation. Dans le cas d'une forte productivité, une boue riche en calcite et silice se dépose sur le fond. La boue crayeuse est riche en matière organique. En profondeur, dans cette matière organique, prolifèrent les bactéries sulfato-réductrices produisant de l'hydrogène sulfuré. À la frontière rédox, c'est-à-dire entre la boue bactérienne anoxique inférieure et la boue riche en oxygène supérieure (à une profondeur d'environ 30 cm dans les sédiments actuels, ne dépassant pas le mètre), ce gaz se dissocie, s'oxyde en sulfate et produit des protons qui diminuent donc le pH, selon la réaction :



La calcite réagit et tend à disparaître ce qui entraîne une forte concentration en ions carbonate.



La calcite est substituée par la silice si la concentration de cette dernière atteint un certain seuil. Des discontinuités dans la boue (restes organiques, terriers tapissés de mucus, fissures ou fractures, zones à faible porosité) servent souvent de germes sur la paroi desquels la silice se met à cristalliser et à les pseudomorphoser. En particulier, les animaux fouisseurs pompent l'eau de mer et en irriguent le sédiment, provoquant une diffusion de l'oxygène et une dégradation de la matière organique. L'oxydation du carbone organique conduit à la suite de réactions suivante :



Annexe 3

Le silex, une roche particulière

Source : Extrait de l'article de Hoyez, B. 2010. À la découverte géologique des falaises d'Étretat, présentation d'une excursion allant de la plage du Tilleul (Antifer) à la porte d'Amont (Étretat Nord). Planet Terre, ISSN 2552-9250, 8 p.

À la suite, la silice secondaire formée, une variété d'opale dite opale C-T car elle est constituée d'une interstratification de cristobalite (C) et de tridymite (T) de basse température, se propage dans le sédiment sous forme de petits cristaux lamellaires ou de

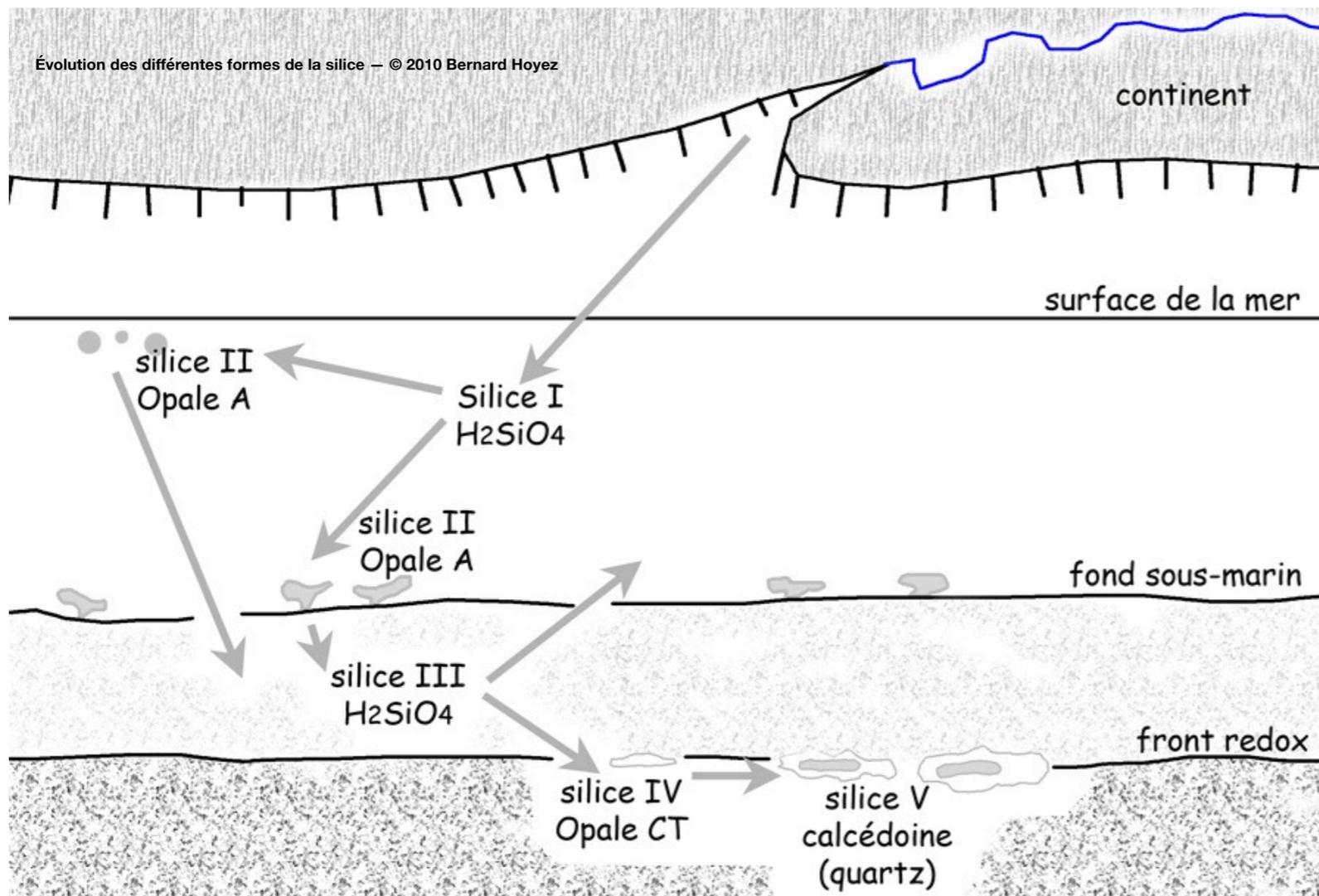
microsphérules d'environ 10 µm appelées lépisphères. L'opale C-T, métastable, va évoluer au cours de la diagenèse et de l'enfouissement. Elle se transforme en quartz alpha, en passant d'un état microcristallin à un état cristallin fibreux, la calcédoine. C'est

l'opinion générale, mais certains pensent que les deux silicifications (opale CT et calcédoine) se réalisent indépendamment. La calcédoine remplace point par point la calcite de la craie. Le protosilex va ainsi grossir et par dilatations successives former un banc complet.

Certains silex sont creux car la silicification primaire est incomplète. La circulation de l'eau dans la cavité conduit parfois à une dissolution ou une précipitation de silice secondaire sous forme de calcédoine mamelonnée aux jolis reflets bleutés ou encore de petits cristaux de quartz mimant une géode.

Facteurs favorisant la formation des silex

Les facteurs déclenchant la précipitation de la silice sont vraisemblablement multiples, c'est la conjonction de certains de ces facteurs qui permet de réaliser un phénomène qui "normalement" (en se référant à l'actuel) est très rare. Différents paramètres peuvent jouer.



Annexe 3

Le silex, une roche particulière

Source : Extrait de l'article de Hoyez, B. 2010. À la découverte géologique des falaises d'Étretat, présentation d'une excursion allant de la plage du Tilleul (Antifer) à la porte d'Amont (Étretat Nord). Planet Terre, ISSN 2552-9250, 8 p.

La concentration en silice des boues superficielles

La concentration en silice dépend surtout de la quantité de squelettes siliceux enfouis. L'accumulation d'opale est donc couplée à la productivité. Les facteurs écologiques favorisant la prolifération des organismes siliceux doivent jouer un rôle important dans la préservation de la masse de silice. Dans le cas du bassin épicontinental de la craie, il peut y avoir :

- des causes locales : profondeur faible (limitée vraisemblablement à une centaine de mètres) du biotope des spongiaires, zones assez calmes protégées des courants, proximité du continent ;
- des causes globales de nature géodynamique (tectonique, volcanisme) modifiant la composition générale de l'eau de mer, en particulier sa concentration en silice ;

- des causes globales de nature climatique :
 - la position des continents à des latitudes où prévaut un climat tropical humide favorise l'altération des silicates et l'enrichissement des océans en silice dissoute ;
 - la formation de blooms de grande ampleur à l'occasion desquels la matière organique et les tests produits se sédimentent rapidement sous forme d'agrégats. Ces phénomènes sont corrélés à une forte saisonnalité climatique. Ils sont favorisés par des modifications de la circulation thermohaline, de la CCD ou des upwellings. Ces derniers sont clairement associés aujourd'hui à des eaux de surface très fertiles où pullulent les radiolaires et aux sédiments siliceux qui en dérivent. La configuration orbitale qui favorise le plus le contraste entre les saisons correspond à une excentricité forte et une inclinaison forte.

La température de l'eau

La solubilité de la silice diminue lorsque la température diminue. Les eaux froides préservent la silice.

La proximité du continent

La solubilité de la silice est plus élevée dans les eaux douces. En se jetant en mer, les cours d'eau augmentent la charge en silice à proximité des estuaires, favorisant la précipitation de l'opale CT préférentiellement dans la bande côtière. Ainsi au Crétacé supérieur, les faciès siliceux se répartissent à la marge du Massif armoricain, du Massif central et du Massif ardennais qui restent émergés. On passe de nombreux bancs de silex continus à des nodules de plus en plus petits et de plus en plus rares.

Annexe 3

Le silex, une roche particulière

Source : Extrait de l'article de Hoyez, B. 2010. À la découverte géologique des falaises d'Étretat, présentation d'une excursion allant de la plage du Tilleul (Antifer) à la porte d'Amont (Étretat Nord). Planet Terre, ISSN 2552-9250, 8 p.

L'oxygénation du sédiment

Le déclenchement de la précipitation du silex serait lié à une modification des propriétés physico-chimiques de l'eau de mer au contact du sédiment.

Comme il a été vu, la silicification s'opère au voisinage du front rédox dans la boue dysoxyque. Le déplacement de ce front a une influence sur les réactions chimiques, particulièrement celles qui conduisent à la substitution de la calcite par la silice. Si les eaux sont plus oxygénées, le front rédox aura tendance à être bloqué et les premiers cristallites formés peuvent continuer leur croissance car ils restent dans une zone favorable.

La pénétration de l'oxydation peut être guidée ou facilitée par des différences de perméabilités au sein de la boue, en particulier par l'existence de terriers ou d'empreintes de bioturbation. Une trop forte oxygénation qui placerait les premiers germes dans la zone oxyque pourrait avoir un effet contraire.

En résumé, il est raisonnable de penser que l'oxygénation et également le refroidissement de l'eau (solubilité de la silice) sont des facteurs principaux dans la formation des silex. La paléo-oxygénation des océans, en particulier les fluctuations de la ZMO (zone à minimum d'oxygène) est un sujet actuellement bien étudié. Elle se révèle être sous la dépendance des paramètres de Milankovitch.

Annexe 4

Focus sur les Diaclases et Failles des carrières des Faubourgs de Ronville (carrières Wellington et Blenheim) d'Arras dans le Coniacien moyen du crétacé

Deux familles directionnelles de fractures ont été observées dans les carrières.

- azimut 160° à 180° , avec de grands décrochements senestres
- azimut 105° à 125° , avec de nombreuses et longues diaclases et quelques failles normales.

Il est difficile d'établir une chronologie entre les deux familles et donc entre les épisodes de fracturation. Le seul élément de chronologie fiable est l'âge des terrains affectés ! Ceux-ci étant datés du Coniacien, les deux épisodes de fracturation sont forcément soit daté du Coniacien (crétacé supérieur), soit postérieur au crétacé supérieur.

Plusieurs hypothèses sont possibles sur l'origine des failles :

- Un régime divergent de failles normales et de diaclases aurait été provoquée par la subsidence thermique du Crétacé supérieur. Les décrochements senestres seraient

postérieurs, peut-être liés à la convergence tertiaire.

serait alors un épisode tectonique tardif, peut-être mio-pliocène.

- Les failles normales, diaclases et décrochements senestres auraient été synchrones pendant un seul épisode de fracturation qui pourrait, dans ce cas, être récent, probablement au miocène ou après le miocène.



Fig. 28 : grande diaclase formant la paroi d'une carrière.

- Le régime décrochant senestre aurait été antérieur. L'événement divergent

Annexe 4

Focus sur les Diaclases et Failles des carrières des Faubourgs de Ronville (carrières Wellington et Blenheim) d'Arras dans le Coniacien moyen du crétacé

Plans de faille avec stries horizontales.

Les plans de faille présentent de petites irrégularités de surface permettant de caractériser leur mouvement.

Remarque

Parfois des objets plus durs que la surface du plan de faille (souvent de petits morceaux de silex) marquent cette surface par des rainures plus ou moins prononcées. Les deux critères (zones lissées/abritées et traces d'objets striateurs) indiquent ici un mouvement senestre.

Fig. 29a et b : plans de faille

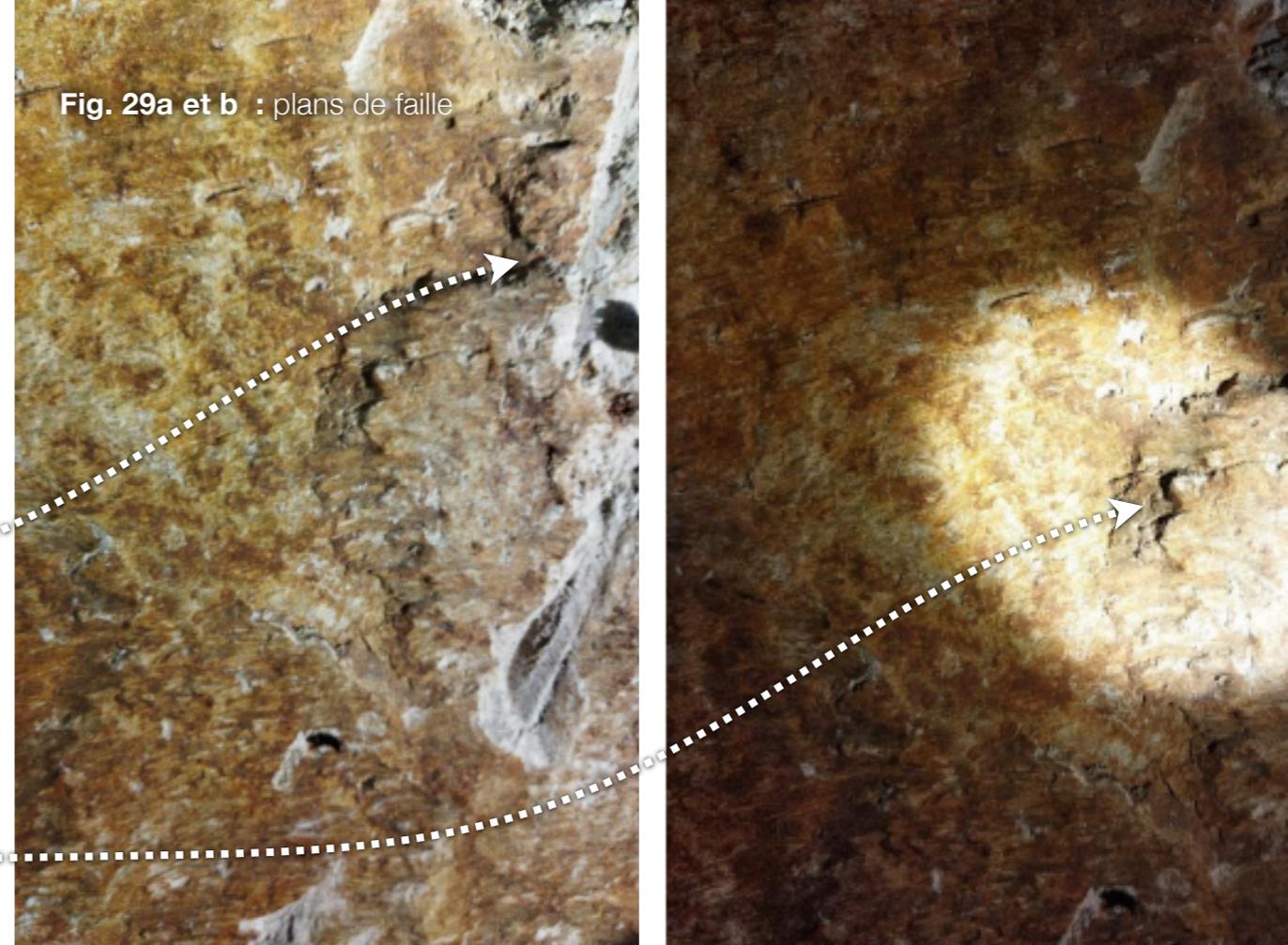


Fig. 30 : silex qui marque la surface



Bibliographie & Webographie

- **AMEDRO, F. & BERGERAT, F. (2023).** Une excursion de la société Géologique du Nord dans les carrières souterraines d'Arras 21 octobre 2023.
- **BERGERAT, F. (Dir.) (2018).** 14-18, la Terre et le Feu - Géologie et géologues sur le front occidental. AGBP-COFRHIGEO-SGN, Mémoire Hors-Série de l'AGBP, 10, 480 p.
- **BERGERAT, F., JACQUES, A. AMEDRO, F., ROBAZINSKI, F. & FAY. O. (2015).** Les carrières souterraines d'Arras : géologie, archéologie et histoire. Bulletin d'information des géologues du bassin de Paris, 52, 3, 3-26.
- **BREHERET. J-G** Nature et genèse du silex dans le contexte du Turonien de Touraine. Bulletin d'information des géologues du bassin de Paris n°2-2016
- **BYLEDBAL, A. (2014).** Un patrimoine caché : l'héritage de la guerre des mines à Arras. In Situ, 25, 2014, 1-13. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/insitu/11466>
- **Carrière Wellington (s.d.).** L'histoire de la carrière Wellington. Une base militaire secrète 20 mètres sous terre, 1 p. Disponible sur : <https://www.carrierewellington.com/histoire-de-la-carriere>
- **DDTM 62/Service de l'Environnement Unité Gestion des Risques (2018).** Inventaire des cavités souterraines Achicourt – Arras – Beaurains. Réunion de concertation du 24 avril 2018, 41 diapos. Disponible sur : <https://www.pas-de-calais.gouv.fr/contenu/telechargement/31938/210109/file/180424Diaporama-ilovepdf-compressed.pdf>
- **HOYEZ,,B. (2010).** À la découverte géologique des falaises d'Étretat, présentation d'une excursion allant de la plage du Tilleul (Antifer) à la porte d'Amont (Étretat Nord). Planet Terre, ISSN 2552-9250, 8 p.
- **JACQUES, A. (1997).** La Bataille d'Arras avril-mai 1917. Cercle archéologique arrageois. Archives départementales du Pas-de-Calais, BHC 2264/5.
- **Préfecture du Pas-de-Calais. Direction départementale des territoires et de la mer (2023).** Plan de Prévention des Risques Mouvements de Terrain liés aux cavités souterraines PPR MT Achicourt Arras Beaurains, 84 p. Disponible sur : <https://www.pas-de-calais.gouv.fr/contenu/telechargement/67443/383239/file/3NotepresentationEP.pdf>

GÉOLOGIE ET HABITAT

Un exemple d'impact de l'action humaine, bénéfiques et risques à la surface de la Terre

ARRAS

LA VILLE SOUTERRAINE

Ce dossier a été réalisé à partir de la sortie géologique de la SGN d'octobre 2023 par le groupe « médiation » de la SGN.

Membres du groupe : A. Beucherie, F. Duchaussois, R. Duchemin, J.C. Dupuis, C. Maréchal, J.P. Nicollin, N. Sarrazin.

Le groupe remercie vivement Françoise Bergerat et Francis Amedro pour les documents, les photos et les articles scientifiques mis à sa disposition.

Mise en page : Benoît Crépin

© SGN - MAI 2024