

ANALYSE GÉOLOGIQUE DU BASSIN-VERSANT DE L'AA : À QUELLES CONDITIONS UN TEL TERRITOIRE EST-IL HABITABLE ?

Geological analysis of the Aa watershed: under what conditions is such a territory habitable?

Francis Meilliez

Université de Lille, Faculté des sciences et technologies, UMR 8187 LOG/CNRS/ULCO, F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex
francis.meilliez@univ-lille.fr

Résumé

Après deux années de déficit hydrique, le relief du Boulonnais a fixé un événement météorologique excessif pendant plusieurs mois. Des inondations périphériques se sont multipliées, d'abord parce que le sol était trop sec, puis saturé. Les dégâts ont d'autant plus frappé les populations que l'oubli s'installe vite dès lors que l'événement se raréfie. Il apparaît nécessaire de rappeler que l'irrégularité météorologique ignore notre vision saisonnière, et que le processus couplé érosion/sédimentation en est une conséquence inévitable qui, en permanence, mais par à-coups, sculpte nos paysages. La géologie témoigne autant de ces événements que de leur destruction partielle. Si les humains comprennent mieux les processus en jeu, on peut espérer qu'ils s'en préviendront.

Abstract

After two years of water deficit, the Boulonnais region was hit by excessive rains for several months. Peripheral flooding multiplied, first because the ground was too dry, then because it was saturated. The damage was all the more devastating for the local population, as the event is quickly forgotten. It's worth remembering that meteorological irregularity ignores our seasonal vision, and that the coupled process of erosion and sedimentation is an unavoidable consequence which, permanently but in fits and starts, sculpts our landscapes. Geology bears witness to these events as much as to their partial destruction. If humans can better understand the processes involved, we can hope to prevent them from happening in the first place.

INTRODUCTION

L'approche géologique d'un territoire est habituellement présentée sous une forme historique qui emmène d'entrée le lecteur quelques millions d'années en arrière. Et on s'étonne qu'il ne se sente pas concerné ! Cette contribution propose une autre méthode : accompagner l'utilisateur qui descend le cours de l'Aa de sa source à la mer. Avec lui, il s'agit d'apprécier l'état fonctionnel du réseau hydrographique de l'Aa, et de relever les questions pratiques qui se posent au regard des connaissances acquises sur les déterminants régionaux des cours d'eau (climat, géomorphologie, géologie). Le but n'est pas de s'adresser aux chercheurs qui décryptent l'articulation des mécanismes en jeu, ni à l'ingénieur qui calcule un circuit de collecte ou d'évacuation des eaux, mais vraiment à l'utilisateur qui, à son échelle d'observation, perçoit les effets de ces mécanismes et s'interroge sur eux car la plupart l'inquiètent.

Pourquoi oser une telle approche alors qu'on n'a jamais disposé, jusqu'à ce jour, d'autant de connaissances sur les territoires ? Disséminées sous des formes et en des endroits très divers, elles sont technologiquement accessibles dans un délai et à un coût qui auraient rendu envieux nos prédécesseurs. Qu'y a-t-il donc de nouveau à présenter ?

Les climatologues nous annoncent comme très probable, à l'échelle du siècle, une récurrence accrue de phénomènes météorologiques dont les effets sont estimés d'autant plus néfastes que les médias en amplifient l'écho. Pour quelles raisons les abondantes informations disponibles ne suffisent-

elles pas à contenir au moins partiellement ces effets ? Le blocage apparent réside en partie dans leur foisonnement. Leur volume ne permet sans doute plus de les traiter en prenant suffisamment le temps du discernement. L'accès à une information adaptée et accessible à l'utilisateur est un enjeu essentiel, dans l'esprit de cette revue.

Proposer cette analyse sur l'Aa n'est pas anodin. L'actualité météorologique de novembre 2023 à mi-janvier 2024 et les inondations conséquentes ont suffisamment contribué à sensibiliser tous les acteurs qui n'acceptent pas le déterminisme linéaire faussement facile : un effet → une cause → un responsable. La question des responsabilités, si elle a du sens en la matière, relève des juristes. Pour sa part le géologue peut aider à comprendre pourquoi un phénomène connu et récurrent se reproduit sur un même territoire, même si la périodicité est d'une variabilité que seul le climatologue peut tenter de justifier. De leur côté, les sciences humaines doivent rechercher pourquoi un tel événement est ressenti comme hors de contrôle ; les expériences récentes (2002, 2009, 2012...) n'ont-elles donc compté pour rien ?

Quelle espèce animale est capable de perdre une partie de sa famille et de ses biens dans une inondation, puis de revenir malgré tout s'installer au même endroit ? L'espèce humaine ! Les autres migrent, plus ou moins vite. Les castors reviennent, mais à dessein, en développant des techniques adaptatives. Même les espèces végétales migrent, certes, en prenant leur temps (Durand, 2020). Cette réflexion, valide

à l'échelle de la population, est certes difficilement audible à l'échelle de l'individu.

Le raisonnement qui suit repose sur l'hypothèse d'un oubli de savoirs simples, expérimentés par nos aïeux, sans doute au prix de pertes. S'agit-il aujourd'hui d'un excès de confiance dans les technologies dont nous sommes dotés ? Autrefois, l'Aa était surtout réputé pour inonder son voisinage entre Watten et Gravelines (Champion, 1863). Cet ouvrage ne recense que des événements très graves, attestés par des documents. Le souvenir d'autres événements, aléatoires, moins conséquents dans l'espace et le temps, n'est transmis qu'entre individus, de génération en génération. Mais la mémoire humaine est fragile et déformable. Par ailleurs, aujourd'hui, tout un chacun peut diffuser à tout moment une information (numérique et donc enregistrée) au monde entier, qu'il en soit l'auteur ou qu'il la relaie, et contribuer ainsi à amplifier et charger l'écho médiatique. Le bruit (au sens statistique du mot) d'un tel écho n'est pas un critère objectif ; il ne reflète que la capacité du témoin (victime ou simple observateur) à enclencher une transmission en chaîne d'une information locale.

Nos aïeux n'avaient que des occasions très limitées d'appréhender de tels effets. Les éboulements, glissements de terrain, inondations¹ sont toujours restés des expériences ponctuelles, dramatiques localement. L'expérience contraignait à l'adaptation ou à la migration. L'irrégularité temporelle des événements n'a pas empêché le développement de centres urbains importants, en dépit d'inondations conséquentes (Champion, 1863), ce qui persiste aujourd'hui. Et il est vrai aussi que certaines de nos activités exacerbent leurs effets : l'accroissement de la démographie, et corrélativement de l'urbanisation, depuis le début des années 1950 a davantage imperméabilisé les sols ; le travail des sols par des engins lourds facilite leur émiettement et leur mobilité, aggravant ainsi les effets des événements météorologiques, dans un contexte climatique lui-même défavorable. En corollaire, aujourd'hui, s'insinue une idée pernicieuse : imaginer qu'une inondation traduirait une insuffisance d'aménagement du territoire. C'est franchement oublier que nous vivons dans un environnement dynamique.

En substance, la suite de cette publication tente de montrer qu'une inondation :

- ✧ est un processus naturel inévitable, et nécessaire à l'agriculture ;
- ✧ peut être contrôlée, notamment en évitant d'en accroître artificiellement les effets ;
- ✧ n'empêche pas de développer des activités adaptées, y compris certaines formes d'habitat.

1. Nous n'évoquerons pas ici les autres phénomènes ponctuels dont les effets peuvent être catastrophiques (volcanisme, sismicité, ouragans, ...) car leur occurrence est exceptionnelle et modérée en région.

L'OPPORTUNITÉ D'UN ÉVÉNEMENT MÉTÉOROLOGIQUE REMARQUABLE

Pour qu'une inondation ait une étendue régionale il faut d'abord que l'événement pluvieux qui l'ait alimentée soit lui-même d'importance. En l'occurrence, les météorologistes expliquent qu'après la saison très sèche et aride de l'été 2023², un courant stratosphérique violent (*jet stream*) s'est installé durablement sur l'Atlantique nord à la base de la stratosphère (Kreitz & Sorel, 2024). Il a induit des courants atmosphériques qui, passant d'ouest en est au-dessus d'un océan surchauffé, se sont chargés d'humidité. Arrivant sur le continent européen dans l'axe de la Manche, ces courants ont rencontré leurs premières rugosités dans le sud de l'Angleterre et le Haut-Boulonnais : les crêtes déterminées par les couches crayeuses de l'anticlinal du Weald-Boulonnais (voir Encadré). La carte de Météo-France (Fig. 1) montre qu'au cours de la première quinzaine de novembre 2023, plus de 350 mm d'eau ont précipité sur un territoire restreint d'où partent les principaux cours d'eau rejoignant la Manche : la Liane, le Wimereux et la Slack qui drainent l'intérieur du Boulonnais, la Canche qui reçoit en rive droite la Course coulant sur le flanc sud du Boulonnais, enfin la Hem et l'Aa dont les estuaires confondus forment la plaine maritime qui longe la mer du Nord. La hauteur d'eau enregistrée représente plus de la moitié de ce qui était tombé sur le même territoire durant toute l'année 2022, année statistiquement sèche !

En ce 4 mars 2024, le pays niçois vient de vivre le même type d'événement, mais 7 à 8 fois plus violent : environ 180 mm d'eau sont tombés en 24 h ! La zonation climatique et la vivacité du relief justifient la différence des effets. Les dégâts sont très importants avec des glissements de terrain conséquents sur le bâti. Toutefois le processus en jeu est exactement le même qu'autour du Boulonnais.

RÉSUMÉ DE LA SÉRIE STRATIGRAPHIQUE RÉGIONALE

L'échelle d'observation retenue ici est celle du promeneur sur le terrain. Les relations entre l'eau et les cristaux qui composent les particules de sol sortent de l'objectif de cet article, focalisé sur le bassin-versant.

L'eau des précipitations se comporte différemment selon la nature, la texture et la structure des matériaux sur lesquels elle tombe. Un schéma (Fig. 2) résume les données disponibles sur les cartes géologiques régionales (webographie : Infoterre) et diverses cartes thématiques accessibles sur le site du CAUE (Conseil, Architecture, Urbanisme, Environnement) et son application interactive S-Pass Territoires (voir webographie). La série stratigraphique régionale témoigne de la succession des matériaux déposés au cours des temps géologiques et que l'érosion a préservés (Fig. 3).

2. Succédant elle-même à une année 2022 déficitaire en eau.

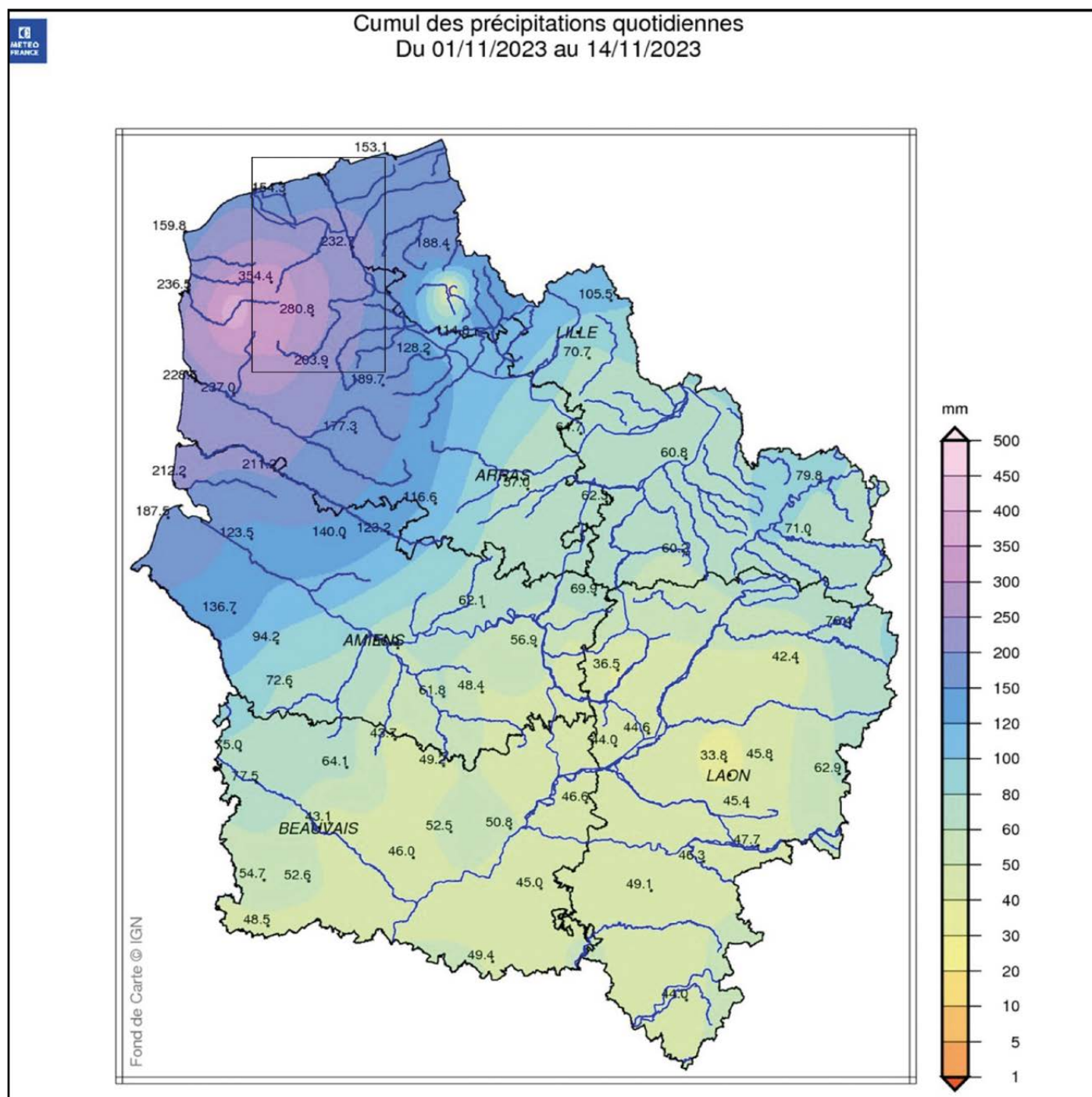


Fig. 1. Carte de l'événement pluviométrique de la première quinzaine de novembre 2023. Source : Météo-France. L'intensité maximale est centrée sur un territoire d'où divergent plusieurs cours d'eau. L'encadré cerne le territoire analysé plus précisément dans la suite.

Fig. 1. Rainfall event map for the first fortnight of November 2023. Source: Météo-France. The maximum intensity is centered on a territory from which several rivers diverge. The box shows the area analyzed in greater detail below.

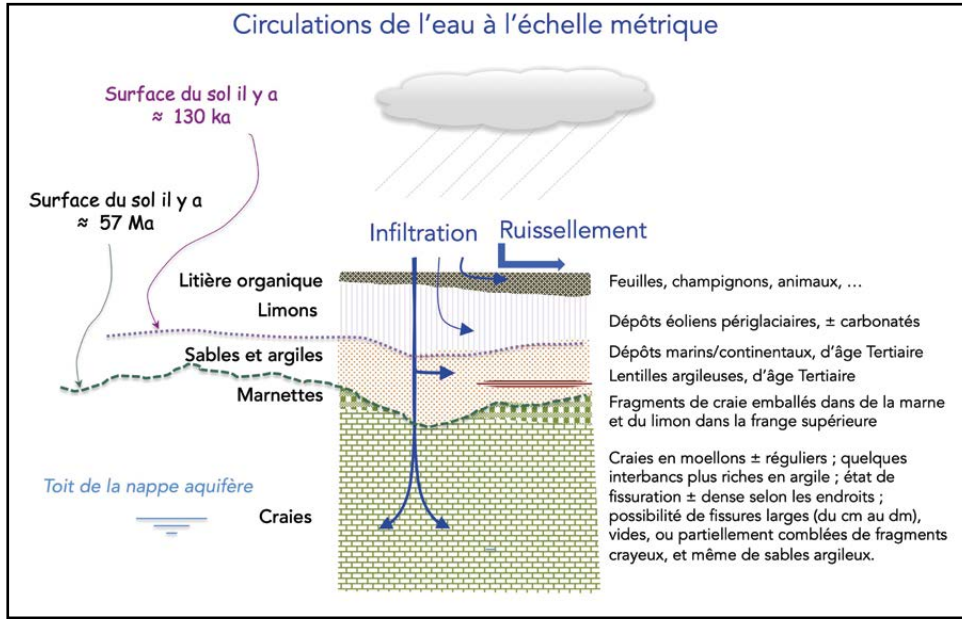
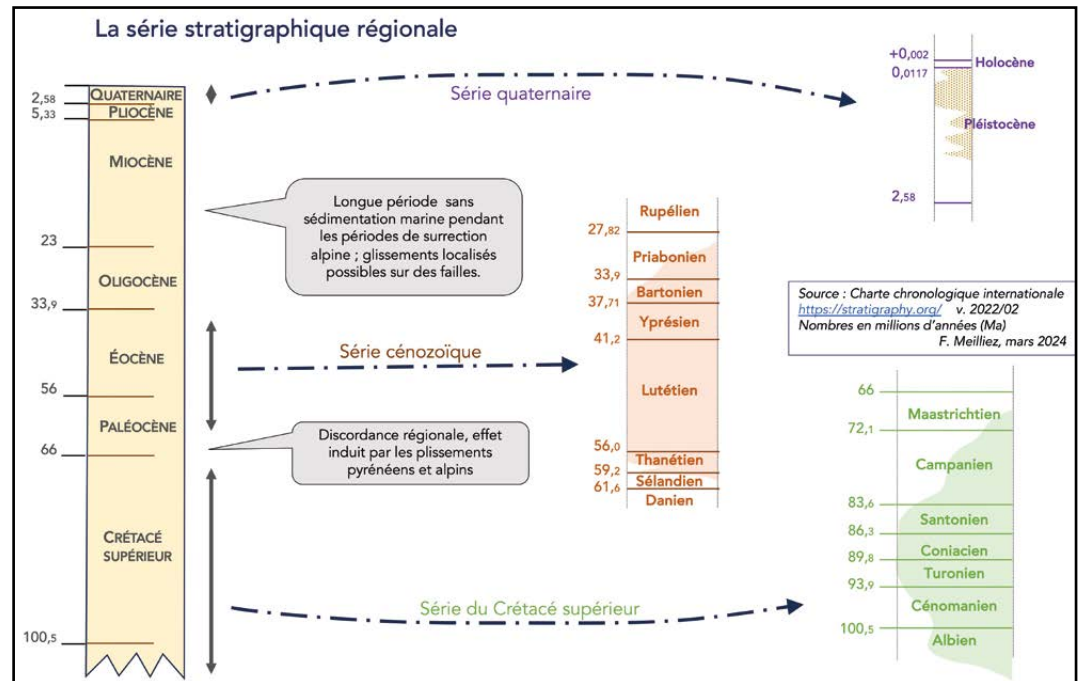


Fig. 2. Schéma illustrant la succession des terrains accessibles à l'observation à l'occasion d'un terrassement. Commentaires dans le texte. Les âges donnés pour les deux surfaces repères sont indicatifs de leur ordre de grandeur ; leur valeur précise peut varier selon le lieu.

Fig. 2. Diagram illustrating the succession of terrains accessible to observation during excavation. Comments in the text. The ages given for the two benchmark surfaces are indicative of their order of magnitude; their precise value may vary according to location.

Fig. 3. Série stratigraphique régionale. L'accumulation sédimentaire connue aujourd'hui est marquée par l'étendue de la teinte. L'échelle de temps diffère selon les colonnes, par raison de lisibilité.

Fig. 3. Regional stratigraphic series. The sedimentary accumulation known today is marked by the extent of the hue. The time scale differs from column to column, for reasons of legibility.



La première couche est généralement une *litière*, composée de deux fractions : l'une minérale, l'autre organique dite *humus* (Duchaufour, 1991). Un sol vivant comporte des végétaux, morts ou vivants, et des animaux de petite taille, dont ceux dits *décomposeurs*, qui brisent les molécules, organiques ou non. L'eau circule en partie au-dessus de la litière – c'est le ruissellement *s.str.* – et en partie dans son épaisseur, entre les divers composants – c'est le ruissellement dit de subsurface ou hypodermique (Bravard & Petit, 2000). L'eau joue un rôle très important dans les échanges de matière entre composants, transportant certains éléments dissous, en partie latéralement vers l'aval, en partie vers les couches plus profondes.

Sur les plaines et plateaux de toute la région le proche sous-sol est formé de *limons*, dépôts éoliens (*laess*) périglaciaires (Antoine *et al.*, 2013), accumulés sur une épaisseur d'ordre métrique ici mais qui dépasse les 20 m dans le Cambrésis. Sur les versants, ces limons alternent avec des *colluvions* qui, aidés par l'eau de ruissellement, descendent les pentes même très faibles, par glissements successifs sous l'action de la gravité (*solifluxion*). Ces colluvions sont composées de débris rocheux libérés par fragmentation (principalement cryoclastie = alternances gel/dégel) des roches situées en amont sur la pente. Chaque période glaciaire a livré ses flux de limons qui ont empâté le paysage sur lequel ils se déposaient. Il est donc fréquent d'observer aujourd'hui, en

coupe, une surface de base des limons plus accidentée que celle de leur toit.

En région, les limons recouvrent (Fig. 2) les dépôts marins (principalement) qui se sont déposés pendant le Paléocène et l'Éocène (Sommé, 1977). Ils constituent une série qui, au nord des collines d'Artois, est faiblement inclinée vers le nord-est. Mince et incomplète en Artois, Cambrésis, Thiérache, cette série s'épaissit et se complète en Flandre, Pays-Bas (Laga *et al.*, 2002; Houthuys, 2014) et sous la Mer du Nord. Sur le territoire régional, la série cénozoïque (Fig. 3) montre, de bas en haut (avec l'indice les désignant sur les cartes géologiques à 1/50 000) :

✧ **e2a** (Thanétien) : Argile de Louvil, sombre, qui surmonte par endroits un *tuffeau* (grès argileux à grain fin, à litages fins, plans, parallèles) comblant des paléocreux (Graveleau *et al.*, 2021) ; les Gallo-Romains ont utilisé ce niveau d'argile pour des poteries dans le Cambrésis (Deru, 2022), et certainement ailleurs aussi.

✧ **e2b** (Thanétien) : Sables d'Ostricourt, sables fins à grossiers selon le niveau et le lieu, plus ou moins argileux. Très utilisé en maçonnerie ; certains niveaux ont servi à la fabrication de tuiles et briques (voir webographie et Meilliez & Belin, 2022).

✧ **e3a** (Yprésien) : Argile des Flandres, bleuâtre, plastique. Plus riche en sables à l'est, en argile à l'ouest, cette formation a été exploitée aussi pour tuiles et briques, notamment à Watten (Fig. 4). La notice de la carte géologique de St-Omer (Desoignies & Thibaut, 1968) signale qu'à la base de cette formation peuvent se trouver de petits galets de quelques centimètres à quelques millimètres, très émoussés et aplatis, noirs à verdâtres. Ils témoignent d'une période de régression, érosion et apports fluviaux torrentiels, recouverts par les dépôts à grain très fin de la transgression suivante. Cette unité constitue le substratum des Monts de Flandres.

L'unité des Sables d'Ostricourt contient une nappe d'eau souterraine (Mania, 1972), captive sous l'Argile des Flandres, et dont le plancher est l'Argile de Louvil ou son équivalent local. Aujourd'hui interdite à la consommation humaine pour cause de forte vulnérabilité à la pollution, cette nappe alimentait par le passé toutes les populations de la plaine de la Lys et de la Flandre intérieure. En Artois, Cambrésis et Thiérache il n'est pas rare de voir les points hauts porter quelques bosquets qui trahissent la présence de sables dont la nappe locale suffisait à alimenter quelques bourgs (Gosselet, 1898 ; Pinchemel, 1954). Ces placages résiduels marquent la limite méridionale du prisme sédimentaire qui avait transgressé le paysage crayeux exposé aux intempéries, pendant la fin du Crétacé et le début du Paléocène. La craie, soluble, a été évacuée, laissant sur place les silex, argiles et oxydes insolubles qu'elle renfermait (Demangeon, 1973 ; Bonte, 1971 ; Bonte & Debrabant, P., 1973). On retrouve aujourd'hui ces éléments

tapissant tous les plateaux crayeux (*Argile à silex* des cartes géologiques : Dewolf, 2008). Après déplacement latéral par le ruissellement, une part de ces dépôts est préservée dans les poches de dissolution, ou jalonne d'anciens cours torrentiels. Toutes les formes que prennent ces dépôts sont souvent regroupées dans un ensemble ubiquiste dits *formations superficielles* dans les notices des cartes géologiques, et dont l'étude détaillée est très complexe (Dewolf & Bourrié, 2008).

En-dessous, la craie (Fig. 2) forme l'unité la plus visible de la géologie régionale, affleurant largement en Picardie, Artois, Mélandois et Cambrésis. Elle contient et protège le principal aquifère de la région (Manlay & Parmentier, 2024). Au nord de l'Authie, la *mer de la craie* (in De Wever *et al.*, 2010, p. 275-279) a directement recouvert des reliefs émoussés, exondés depuis la fin du Paléozoïque (Amedro & Robaszynski, 2014). En revanche, sous le sud de l'Angleterre et de la Manche, le Crétacé a recouvert en discordance les dépôts jurassiques accumulés dans un centre de dépôt très subsident, fermé au nord-est par un golfe identifié jusque sous le haut-Boulonnais. Vers l'est, les terrains jurassiques ne sont pas connus au nord d'une ligne joignant la vallée de l'Authie à la bordure sud du massif Ardennais.

LA DIVERSITÉ DES ACTIONS DE L'EAU QUI TOMBE SUR LE SOL

Pour comprendre comment opère le processus de l'érosion, il faut observer les mécanismes élémentaires en jeu à l'échelle des particules. En voici trois que tout le monde peut observer :

✧ Les gouttes de pluie qui tombent sur le sol ont un impact mécanique qui dépend de leur masse, donc de leur taille (Fig. 4). Cet impact peut suffire à déchausser certains grains (*effet splash*), les libérer et donc permettre leur reprise ultérieure par le ruissellement.

✧ Comme le sol est constitué de grains de nature et de taille variables, ce simple effet conduit à un tri, de telle sorte qu'après une pluie intense, les argiles, assimilables à des lamelles pour la plupart, s'accumulent au-dessus des particules globuleuses (limons, sables). Si une période sèche suit, cette pellicule argileuse durcit et constitue une *croûte de battance*, imperméable aux premières gouttes de la pluie suivante.

✧ Là où l'abondance de particules argileuses forme un dépôt bien visible, une sécheresse, même modeste provoque l'apparition de craquelures par retrait superficiel : les *fentes de dessiccation*. Partout dans le monde, les photos de telles fentes symbolisent une situation de sécheresse. Apparues par temps sec, elles drainent les premières gouttes lors des pluies suivantes.

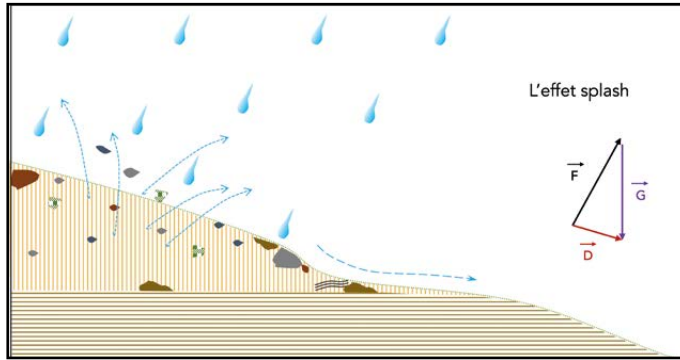


Fig. 4. L'effet *splash* est un moyen pour déplacer modestement les particules de surface, comme le démontre le triangle des déplacements : F = soulèvement par effet splash ; G = chute par effet de la pesanteur ; D = déplacement résultant parallèle à la pente.

Fig. 4. The splash effect is a means of modestly displacing surface particles, as shown by the displacement triangle: F = lift by splash effect; G = fall by effect of gravity; D = resulting displacement parallel to the slope.

Arrivée sur le sol, l'eau se distribue entre ruissellement et infiltration (Fig. 2). Tous les matériaux participent de façon différenciée aux paysages en réponse aux agressions que leur porte la biodiversité dans son ensemble. Les plantes, par leurs racines, extraient de la roche les nutriments nécessaires à la croissance végétale; en même temps, le développement racinaire contribue à la fragmentation du matériau rocheux. En même temps, la partie aérienne de toute plante ralentit le ruissellement. Chaque espèce animale (surtout les fouisseurs) intervient avec des processus physiques et/ou chimiques qui lui sont spécifiques (sécrétion, appendices, dentition...). Il faut bien reconnaître que l'espèce humaine, qui a inventé un outillage externe d'abord en bois puis en acier, s'est ainsi dotée d'une efficacité redoutable (labour, bêchage). Le résultat est une fragmentation qui favorise la pénétration de la minuscule molécule d'eau (0,1 nanomètre) et facilite la dégradation minérale par dissolution, cryoclastie (alternances gel/dégel) et/ou transformation d'une espèce minérale en une autre.

Partout, l'eau est un vecteur, transportant les éléments sous forme ionique ou granulaire. Partout aussi elle obéit aux lois de la pesanteur qui lui font suivre la plus grande pente locale. Sur terrain nu, plus la pente est forte et longue, plus grande est l'énergie cinétique de l'écoulement, et donc sa capacité à emporter des particules.

Ruissellement versus infiltration

La répartition entre ruissellement et infiltration dépend de la perméabilité du sol. Les prairies et autres terrains plantés ralentissent le ruissellement et favorisent une infiltration locale.

Un excès de ruissellement provoque une inondation, au moins locale et temporaire. Les divers recouvrements imperméables (bétons, carrelages, revêtement bitumineux) que l'espèce humaine a déployés sur de nombreuses voies de circulation et de stationnement empêchent l'eau de pénétrer dans les couches sous-jacentes.

Lorsque l'épisode pluvieux persiste, l'infiltration sature les nappes souterraines qui, alors, débordent, jusqu'à réactiver des sources intermittentes, même inactives depuis des années. Leriche (1932) a décrit par le détail plusieurs phénomènes de ce genre dans le Cambrésis, composé de la même série stratigraphique que celle sur laquelle coule le cours supérieur de l'Aa. Au passage de la source, le jet d'eau peut emporter quelques grains de la roche aquifère, l'excaver et ainsi affaiblir sa stabilité (Fig. 5).

Érosion versus sédimentation

Parmi les activités humaines, labours et bêchage contribuent fortement à la fragmentation du matériau, et donc à sa mise en disponibilité pour qu'un ruissellement puisse l'emporter. La granulométrie la plus sensible à l'enlèvement est à peu près comprise entre 0,125 et 0,750 mm selon l'abaque (Fig. 6) construit par Hujlström (1939). Lorsqu'un agriculteur, excédé, recourt à une pelle mécanique pour curer la partie inférieure d'un cours d'eau, il ne fait que récupérer la terre arable qui constituait la richesse agronomique du plateau d'où l'eau l'a fait descendre.

La vitesse du courant dépend de l'énergie cinétique de la masse d'eau, donc de la pente. Un exemple récent, hélas dramatique, l'illustre très bien. Le 2 mai 2024, un violent orage s'abat au sud de Soissons (carte géologique : Pomerol et coll., 1984). Le village de Courmelles occupe les parties basses de la vallée de la Crise. Le plateau est couronné par les formations résistantes du Lutétien (e5) (Fig. 3), tandis que le versant, concave, est formé des Sables de Cuise (e4a) que couvre une mince pellicule caillouteuse dans la partie supérieure. Le versant de rive droite est exposé à l'ouest, sous le vent dominant. Il est entièrement cultivé; les images télévisées montrent que la parcelle la plus en amont a été labourée et ensemencée dans le sens de la pente. Dans ces conditions, chaque sillon forme une gouttière. De plus, là où les traces de tracteur sont visibles, ces gouttières sont plus profondes et plus imperméables qu'ailleurs, comme dans tous les champs labourés. L'eau qui ruisselle ne peut que prendre de la vitesse et emmener les particules libérées en surface (Fig. 6). La morphologie de détail du terrain et un mur de clôture ont dirigé le flux vers un jardin dépourvu de protection à l'amont. La soudaineté du flux a défoncé la maison et emporté ses deux occupants, dont un seul a réchappé.

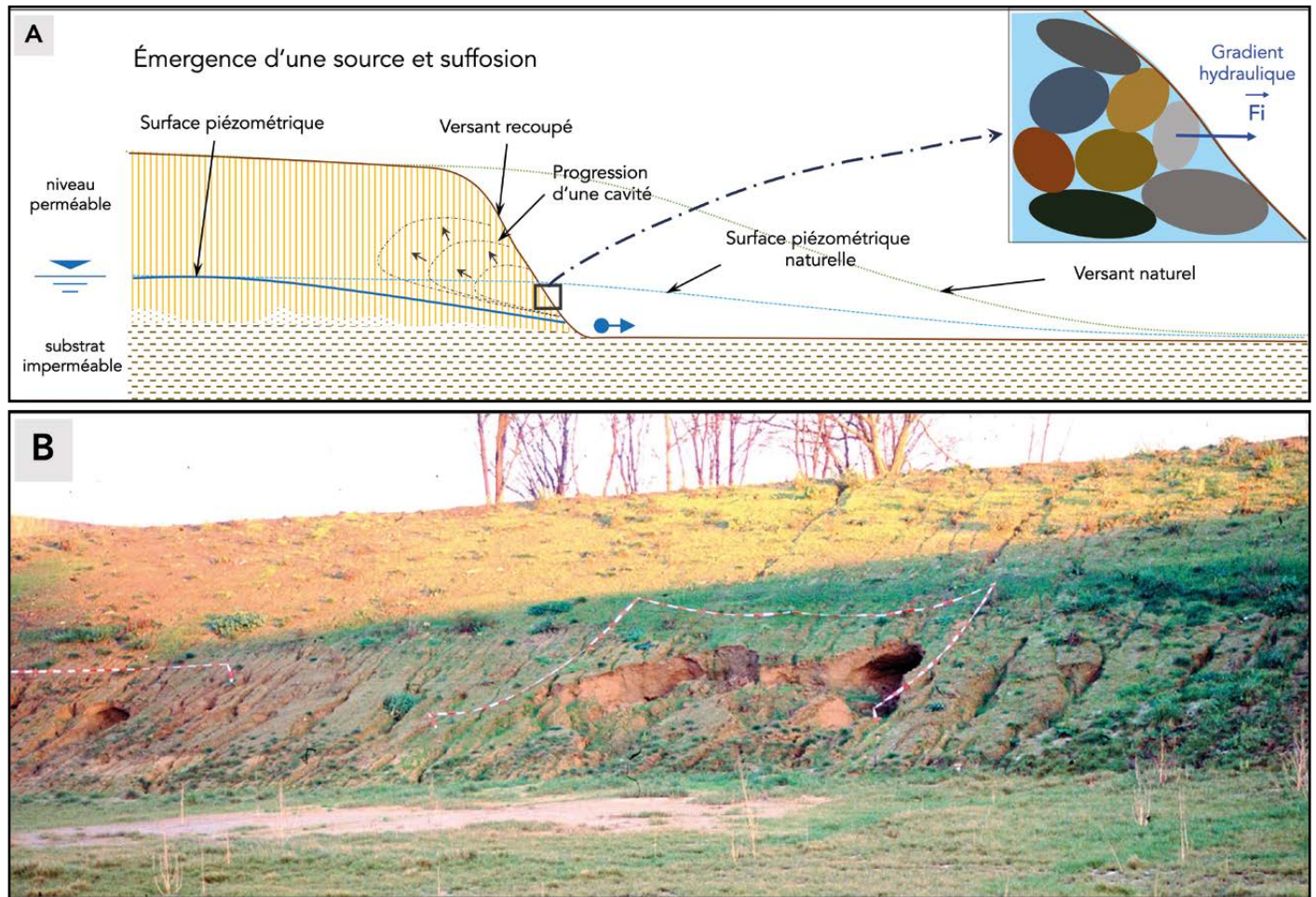


Fig. 5. A) Une source émerge là où la surface piézométrique (toit de la nappe phréatique) est intersectée par le versant naturel. L'eau souterraine exerce une pression sur les grains au niveau de la surface libre. Si cette pression est supérieure à la résultante des forces qui lient ces grains à leurs voisins, alors des grains sont éjectés et se déplacent sur le versant (voir détail encadré). C'est le mécanisme de suffosion, une forme d'amorçage d'une érosion qui peut être très active si le matériau est lâche. B) Dessin d'après une observation réalisée en rive droite de la Deûle (à Lille, 1995), où les berges ont été retaillées : les alluvions (Fz) ont subi une érosion spectaculaire par suffosion. C'est une situation très fréquente à chaque terrassement, quelle qu'en soit la hauteur.

Fig. 5. A) Spring emerges where the piezometric surface (water table) is intersected by the natural slope. Groundwater exerts pressure on the grains at the free surface. If this pressure is greater than the resultant of the forces binding the grains to their neighbors, grains are ejected and move down the slope (see inset). This is the suffosion mechanism, a form of erosion initiation that can be very active if the material is loose. B) Drawing based on an observation made on the right bank of the Deûle river (Lille, 1995), where the banks have been reshaped: the alluvium (Fz) has undergone spectacular erosion by suffosion. This is a very common occurrence whenever earthworks are carried out, whatever the height.

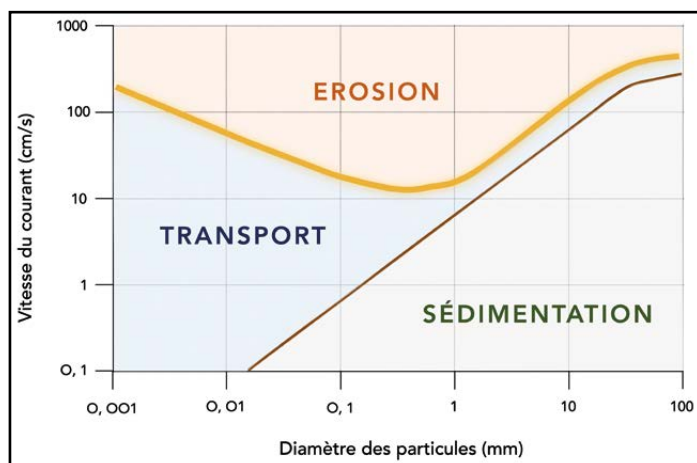


Fig. 6. Abaque simplifié d'après les travaux de Hujlström (1939). Un flux chargé de particules sédimentaires abandonne celles-ci au fur et à mesure que sa vitesse diminue, selon une relation linéaire en-dessous d'une vitesse de l'ordre de 3 à 5 m/s (cycliste en promenade). L'érosion est la plus efficace pour les particules de granulométrie comprise entre 0,125 et 0,750 mm, alors que le flux s'écoule à environ 0,10 m/s (promeneur à pied). Ceci vaut pour les particules libres sur le sol; si leur granulométrie plus fine, et/ou leur nature (minéraux en lamelles) les rend cohésives par capillarité, la vitesse du flux doit être plus élevée pour les arracher de leur substrat.

Fig. 6. Simplified chart based on work by Hujlström (1939). A flow laden with sedimentary particles abandons them as its speed decreases, according to a linear relationship below a speed of the order of 3 to 5 m/s (cyclist on a walk). Erosion is most effective for particle sizes between 0.125 and 0.750 mm, while flow occurs at around 0.10 m/s (walker). This applies to loose particles on the ground; if their finer granulometry and/or their nature (lamellar minerals) makes them cohesive by capillary action, the flow speed must be higher to tear them from their substrate.

UN PROFIL EN LONG RÉSULTE D'UN ÉQUILIBRE DYNAMIQUE ENTRE ÉROSION ET SÉDIMENTATION

Cette publication est focalisée sur l'incision verticale qui, peu à peu, sculpte le lit d'un cours d'eau. Les déterminants du tracé en carte ne sont pas discutés ici mais font l'objet d'une prochaine publication. L'érosion arrache en amont des grains au substrat, les transporte (divers modes : reptation, saltation, portage) pour les déposer plus loin en aval. Une variation de l'alimentation en eau (densité de la pluie, apport latéral d'autres filets d'eau) ou de la densité du courant qui se charge progressivement de petites particules, modifie l'énergie cinétique de la masse en écoulement et donc sa capacité à éroder vs déposer (Fig. 6). Le profil en long se modifie donc sans cesse; l'analyser a du sens à l'échelle de l'ensemble du cours d'eau mais pas à l'échelle de la parcelle.

Tout promeneur au long d'une berge peut constater que la partie centrale d'un cours d'eau s'écoule régulièrement (*écoulement laminaire*). Il n'en est pas de même à proximité des rives et du fond, dont les irrégularités provoquent des tourbillons dans la tranche d'eau (*écoulement turbulent*). Les dimensions et l'état de surface du lit mineur du cours d'eau déterminent la répartition spatiale entre les deux types d'écoulement, qui passent en continu de l'un à l'autre.

Un schéma très simple (Fig. 7) résume comment les turbulences préparent les particules à être arrachées à leur substratum. Dans son principe, ce schéma est transposable à toutes échelles, autant dans le plan vertical qu'horizontal. Il permet entre autres de comprendre pourquoi les piles d'un pont peuvent être affouillées, et comment un torrent de montagne peut saper le remblai latéral d'une voie de communication, jusqu'à entraîner son effondrement.

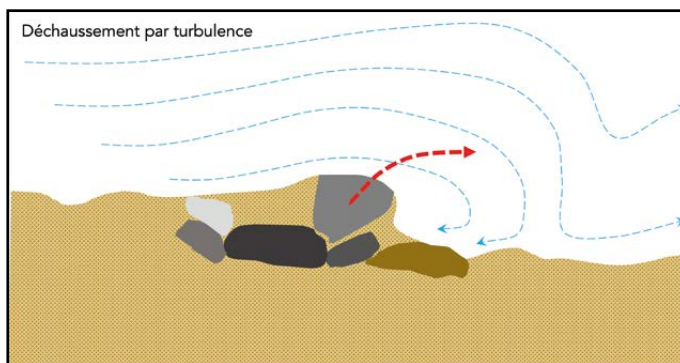


Fig. 7. Effet de rugosité d'un sol hétérogène : les plus grosses particules déterminent une face abritée sous l'effet du flux. Un retour de flux, dont les dimensions dépendent de la géométrie du dispositif et de la vitesse du fluide, entraîne une érosion très localisée qui, peu à peu, déchausse les particules les plus grosses et les rend disponibles au transport.

Fig. 7. Roughness effect of a heterogeneous soil: larger particles create a sheltered face under the effect of the flow. A return flow, the dimensions of which depend on the geometry of the device and the speed of the fluid, leads to highly localized erosion, which gradually loosens the larger particles and makes them available for transport.

L'effet cumulé de ce type d'action justifie qu'avec le temps, un réseau hydrographique puisse être nettement incisé dans son substratum. L'incision de l'Aa est ici (Fig. 8A) très nette sur le relief déterminé par l'anticlinal du Boulonnais. Par contre elle ne l'est pas dans le marais de St-Omer, ni dans la plaine maritime dont la platitude rend difficile l'évacuation des eaux continentales vers la mer (Fig. 8B).

Un ruissellement descend toujours en suivant la ligne de plus grande pente locale. Le cours d'eau qu'il alimente est rarement rectiligne sur une longue distance. Les coudes observés en plan (Fig. 8B) sont des singularités en relation avec une hétérogénéité locale. Utiles au géomorphologue et au géologue, elles révèlent un changement dans la nature et/ou la structure du sous-sol. Cette question sera discutée dans une prochaine publication.

Le profil en long dispose linéairement - de façon artificielle - les divers tronçons du cours d'eau; ce n'est donc pas une coupe géologique qui illustrerait la structure du sous-sol. Il permet d'apprécier si des variations sont en lien avec un changement de nature du substrat ou avec une hétérogénéité structurale (Fig. 8C). L'écoulement sur un milieu homogène et continu peut être modélisé par une courbe décroissante (Fig. 9), continue, concave, comme une loi de puissance négative dont le paramètre serait à ajuster à chaque tronçon homogène.

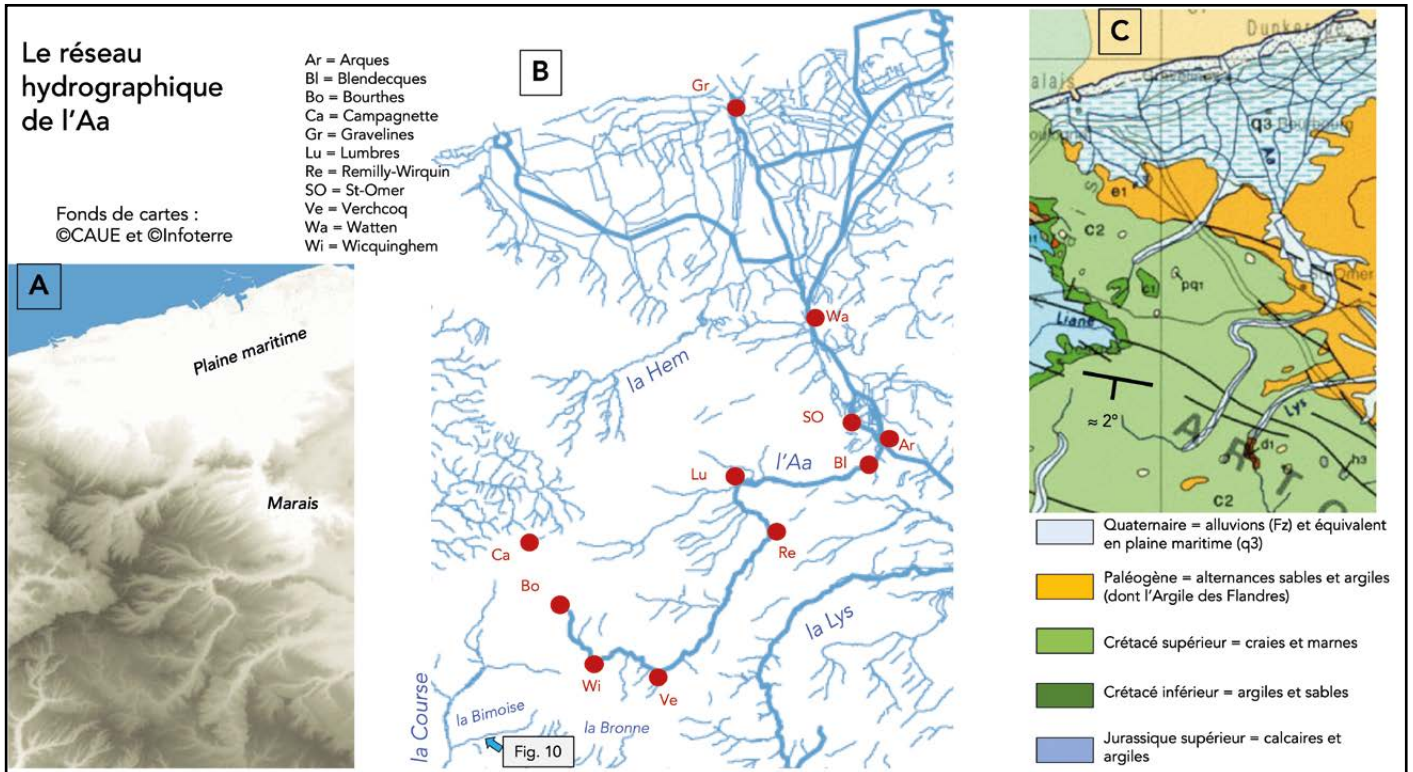


Fig. 8. Montage de cartes topographique (A), hydrographique (B) et géologique (C) du bassin-versant de l'Aa. Les localités sont évoquées dans le texte. La carte géologique au millionième regroupe en un seul ensemble (e1) les dépôts d'âge Paléocène et Éocène. Les dépôts quaternaires délimitent les zones potentiellement inondables, sur lesquelles la densité des cours d'eau est la plus forte par raison de faible perméabilité en surface (B).
 Fig. 8. Montage of topographic (A), hydrographic (B) and geological (C) maps of the Aa watershed. Localities are mentioned in the text. The millionth-scale geological map groups together deposits of Paleocene and Eocene age into a single unit (e1). Quaternary deposits delimit potentially flood-prone areas, where stream density is highest due to low surface permeability (B).

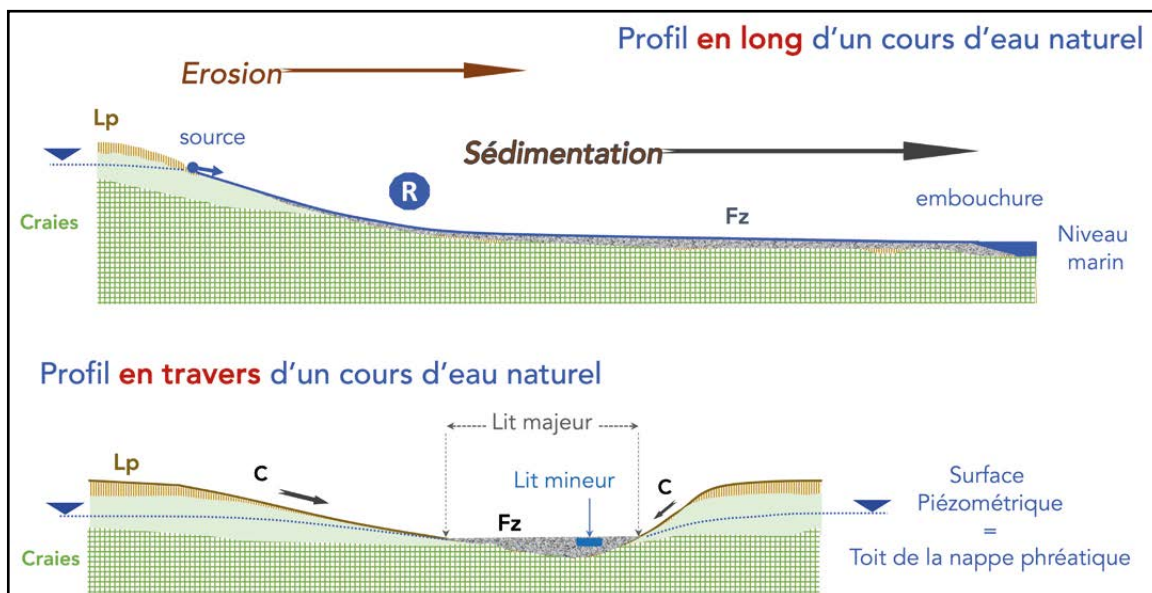


Fig. 9. Profils théoriques en long et en travers d'un cours d'eau coulant sur la craie et sa mince couverture. En long, l'eau s'écoule dans le lit mineur dont un point de courbure accentuée, noté R sur le schéma, sépare le domaine soumis à érosion de celui soumis à sédimentation. La localisation de ce point change constamment (voir texte). En travers, le dépôt des alluvions précédentes matérialise le lit majeur du cours d'eau, c'est-à-dire la surface potentiellement inondable lorsque la quantité d'eau qui descend le permet.

Fig. 9. Theoretical longitudinal and cross-sectional profiles of a river flowing over chalk and its thin cover. Longitudinally, the water flows in the minor bed where a point of accentuated curvature, noted R on the diagram, separates the area subject to erosion from that subject to sedimentation. The location of this point is constantly changing (see text). Across the river, the deposition of the previous alluvial deposits materializes the river's major bed, i.e. the surface area that can potentially be flooded when the quantity of water flowing downstream so permits.

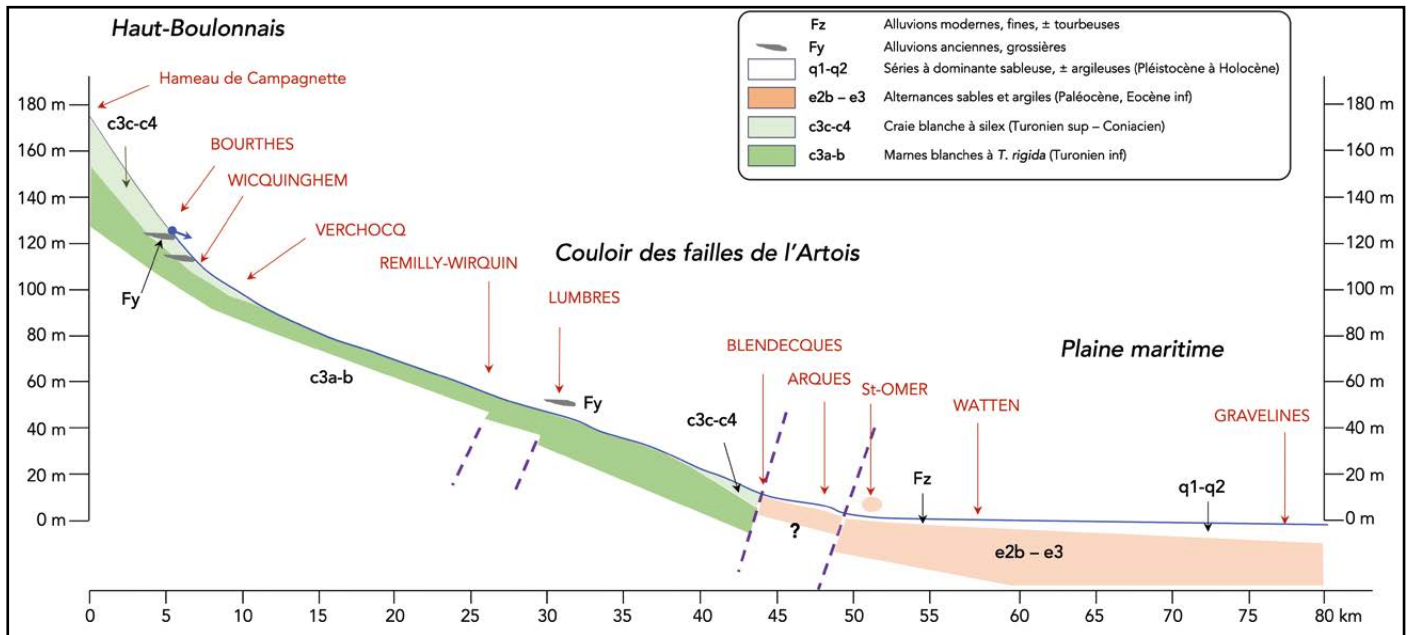


Fig. 10. Profil en long du cours de l'Aa, incluant la vallée sèche la plus longue en tête de bassin. Commentaires dans le texte.
 Fig. 10. Longitudinal profile of the Aa River, including the longest dry valley at the head of the basin. Comments in the text.

Le profil en long de l'Aa peut être divisé en trois parties (Fig. 10) :

- ✧ Amont : depuis la source cryptique (altitude 185 m) sur le revers de cuesta de la craie jusqu'à une rupture de pente bien marquée (107 m sur la commune de Wicquinghem).
- ✧ Centre : de Wicquinghem à la sortie de Blendecques (12 m).
- ✧ Aval : de Blendecques à l'embouchure, à Gravelines. Dans ce dernier tronçon on peut différencier une transition dans la traversée d'Arques qui précède l'entrée dans le marais de St-Omer (de 12 à moins de 5 m).

Le segment amont

Les localités de Desvres, St-Martin-Choquel et Lottinghen sont situées au pied de la cuesta de craie (Fig. 11) qui ceinture le Boulonnais jusqu'au Blanc Nez. Le hameau de Campagnette est situé sur le revers de la cuesta, en tête d'un vallon sec, sous le plateau qui porte le hameau de La Calique. Entre ces deux hameaux et les trois localités précédentes, le crêt est tronqué par un étroit plateau limoneux doté de placages résiduels de *formations argileuses à silex (LPs)*. Celles-ci masquent le contact entre les *marnes crayeuses (c3a-b = Turonien inférieur à moyen)* et la *craie blanche à silex (c3c-4 = Turonien supérieur à Coniacien)* (Leplat *et al.*, 1982). Les auteurs mentionnent que l'ancienne carrière de Lottinghen témoigne du développement de poches de dissolution ayant corrodé la craie ; y a été identifié « un épais complexe lité, irrégulier, d'argiles, d'argiles sableuses, de limons argileux, brunâtres à rougeâtres, avec silex altérés ou non et galets tertiaires, au milieu duquel s'intercalent des sables provenant du remaniement de l'Eocène marin. Elles contiennent

en outre les restes silicifiés de microfaune provenant de divers niveaux crayeux supérieurs. » Cette observation s'accorde avec le scénario évolutif évoqué ici (Encadré) : un premier épisode de soulèvement de l'anticlinal, après dépôt et érosion partielle de la craie ; un temps de quiescence pendant lequel se façonne une surface d'érosion qui porte aussi des cailloutis ; une reprise de soulèvement (ou plusieurs ?) portant à 200 m d'altitude (aujourd'hui) le plateau résiduel tandis que le réseau hydrographique continuait d'évoluer. En prenant comme repère le plancher de la couche **c3c-4**, qu'incisent plusieurs vallons voisins, le pendage moyen sur ce secteur est de l'ordre de 2° vers le sud-sud-ouest (Fig. 8C et 11).

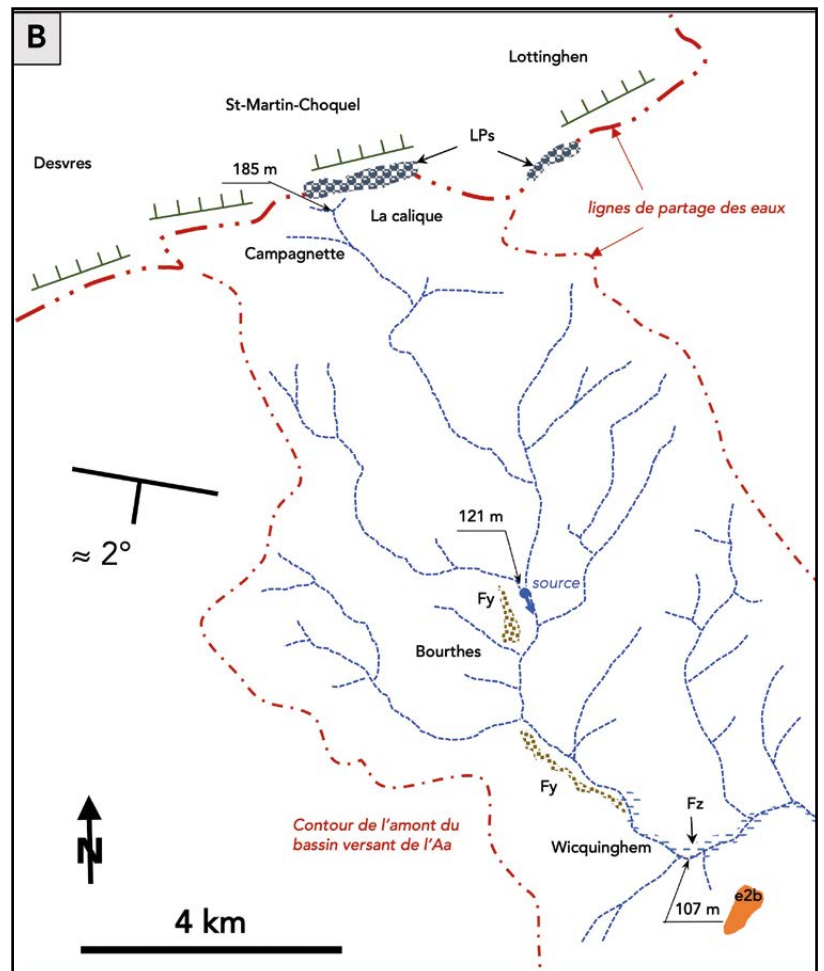
La craie blanche à silex stocke les eaux d'infiltration. Une source est possible dès lors que le plancher de l'aquifère est incliné dans le même sens que la pente topographique, mais moins fort. L'eau souterraine se déverse alors sur celle-ci. Son activité érosive dépend du débit de l'eau, de la nature et de la structure de la roche (Fig. 5). L'eau progresse dans la craie naturellement très fissurée, en dissolvant les carbonates et laissant sur place les insolubles (argiles, silex, oxydes divers). Avec la durée, le ruissellement élargit les fissures et les connecte entre elles. En surface, c'est l'amorce d'une rigole engravée sur les sols carbonatés (une voyette, en picard).

En tête de bassin-versant (Fig. 11B), plusieurs rigoles initiales jalonnent les affleurements du plancher de l'aquifère que constitue la craie argileuse du Turonien inférieur à moyen (**c3b-a**) qui affleure dans les vallons voisins à l'ouest (bassin-versant de la Course et de ses affluents : Fig. 6B). Les premiers ruissellements paraissent partir dans toutes les directions mais, au-delà de quelques dizaines de mètres, une orientation préférentielle se dégage. Pour ce bassin-versant (Fig. 11) le sens



Fig. 11. Extrait de la carte géologique (A) de Desvres (Leplat *et al.*, 1982) avec tracé du chevelu de vallons secs en amont de la source formelle de l'Aa à Bourthes. Partie amont du bassin-versant de l'Aa (B) montrant les principaux faits morphologiques. Le pendage des couches a été estimé par triangulation entre vallées voisines sur la surface de contact entre marnes crayeuses et craie blanche à silex.

Fig. 11. Extract from the Desvres geological map (A) (Leplat *et al.*, 1982) showing the dry valley network upstream of the formal source of the Aa River at Bourthes. Upstream part of the Aa watershed (B) showing the main morphological features. The dip of the layers was estimated by triangulation between neighbouring valleys on the contact surface between chalk marl and white flint chalk.



d'écoulement qui prévaut jusqu'à Wicquinghem est orienté au sud-est ($\approx N_{135}$), ce qui peut paraître étonnant puisque la stratification d'ensemble descend vers le sud-sud-ouest. En fait, le dispositif observé met en évidence que l'écoulement de l'eau est contrôlé par la direction de fracturation plutôt que par le pendage de la stratification (Fig. 6C). Résultat important à prendre en compte dans toutes les décisions d'aménagement.

Le village de Bourthes est implanté autour du point où l'écoulement était permanent, au moins depuis que des humains se sont installés ici. C'est le site considéré comme source officielle de l'Aa sur la carte géologique (Fig. 11). Pourtant la rivière n'y est représentée que par un trait discontinu, exprimant que l'écoulement l'est aussi. Il faut descendre environ 2 km vers l'aval pour voir une représentation continue de l'écoulement, coïncidant avec la présence d'alluvions modernes (Fz) dans le lit majeur de la rivière. Cette observation est compatible avec deux types d'explication, non exclusifs et convergents : une diminution du stock souterrain soit par raréfaction des pluies et/ou excès de prélèvements, soit par le basculement continu, très lent, des couches géologiques. Une observation analogue est connue sur l'Escaut dont la source a migré de 4 km environ depuis la fin du XVIIe siècle (Meilliez, 2016). Pour approfondir cette question il faudrait pouvoir dater avec précision les divers dépôts que les auteurs de la carte géologique qualifient d'alluvions anciennes (Fy), attribuées au Pléistocène inférieur par défaut. Trois éléments de terrasses alluviales anciennes sont préservés (Fig. 10) ; au cœur de Bourthes, en amont de Wicquinghem et à Lumbres. Les techniques d'aujourd'hui devraient permettre de dater ces jalons temporels et donc de réduire l'incertitude due à une longue lacune dans l'évolution géologique (Fig. 3).

Le segment central

À Wicquinghem, la vallée fait un coude de 90° . Elle descend en ligne droite selon l'azimut N_{40} (nord-est) jusqu'à Blendecques, en faisant toutefois un crochet surprenant, par Lumbres (Fig. 8B). Là, elle rejoint une rivière descendant également le revers de cuesta, mais en s'écoulant vers le nord-est. Le profil en long de ce tronçon central est étonnamment rectiligne, non concave (Fig. 10). En effet, la surface du sol est une *surface structurale*, parallèle à la stratification des marnes crayeuses (c3a-b), résistantes à l'érosion.

À 4 km de là, vers le sud-est, le cours supérieur de la Lys est parallèle à celui de l'Aa. Les deux vallées sont orthogonales à un faisceau faillé, détaillé sur la carte à 1/50 000, symbolisé par un trait unique et continu sur la carte au millionième (Fig. 8C). Ce *couloir de failles de l'Artois* (Fig. 10) n'est pas discuté ici (voir : Graveleau *et al.*, 2023). Les plateaux, replats et têtes de versants sont tapissés de limons pléistocènes qui masquent tout.

Le profil en travers (Fig. 9) montre comment la sédimentation se répartit. En fait, le mécanisme est celui qu'un carreleur mobilise pour effectuer un ragréage : la coulée de sédiments perd son énergie en s'étalant sous l'action de

l'attraction gravitaire terrestre. C'est pourquoi l'extension des alluvions matérialise celle des zones potentiellement inondables, une donnée très importante en matière d'aménagement du territoire. Le marais de St-Omer, comme les hortillonnages d'Amiens sur la Somme, témoignent de la meilleure valorisation qui soit d'un tel espace : le maraîchage.

Une observation réelle illustre le processus (Fig. 12). D'octobre à décembre 2012, il est tombé sur la vallée de la Course (Fig. 8B) environ 700 mm d'eau, enregistrés à la station Météo-France d'Attin, près de Montreuil-sur-mer. Me rendant à Stella-Plage le lendemain d'une forte pluie, je suis passé sur le CD126 pour descendre vers Montreuil. La photo commentée ici a été prise en regardant vers l'ouest (Fig. 8B : coin sud-ouest), en tête d'un vallon très évasé qui descend du lieu-dit Mont Fayel (125 m), entre la Bimoise et la Bronne. Le vallon descend vers la Bimoise et marque la limite administrative entre les communes d'Alette et de Moncavrel. Un champ correctement labouré (perpendiculairement à la pente), ensemençé, est raviné par un cours d'eau temporaire bien marqué. La route traverse la tête de vallon en remblai. L'existence d'une buse sous le remblai laisse à penser qu'un tel ravinement n'est pas rare, et la buse évite que le remblai ne fasse barrage à l'amont. L'agriculteur doit être habitué car il a ménagé une petite mare qui retient l'eau à la sortie de la buse pour lui laisser le temps de s'infiltrer avant de raviner les cultures. Mais cette fois, le flux de précipitation a été le plus fort. Des gravillons ont même été libérés et déplacés ; l'*effet splash* (Fig. 4) était encore visible sur les côtés. La réserve d'eau infiltrée se trouve dans une mince pellicule de craie blanche à silex (c3c-4), masquée par les limons pléistocènes, et dont le plancher est formé par les marnes crayeuses (c3a-b), bien exposées dans la vallée de la Bronne. Cet exemple permet de comprendre comment ce type d'érosion, répété durant quelques milliers d'années, peut prendre de l'ampleur et former un vallon largement évasé.



Fig. 12. Ravinement dans un champ labouré entre la Bimoise et la Bronne (Fig. 4B), suite à une journée très pluvieuse sur le bassin-versant de la Course. Les statistiques de Météo-France à Attin indiquent respectivement 260 mm, 169 mm et 265 mm en octobre, novembre et décembre 2012. Commentaires dans le texte. Photo F. Meilliez, 12/12/2012, sur le CD126. Fig. 12. Gully in a ploughed field between the Bimoise and Bronne rivers (Fig. 4B), following a very rainy day in the Course watershed. Météo-France statistics for Attin show 260 mm, 169 mm and 265 mm respectively in October, November and December 2012. Comments in the text. Photo F. Meilliez, 12/12/2012, on CD126.

Le segment aval

Les failles de l'Artois marquent la rupture de pente sur le profil en long (Fig. 10). Le lit mineur est contraint entre des berges artificiellement renforcées; le lit majeur est bien marqué par la répartition des alluvions Fz (Fig. 8). L'agglomération de Blendecques est partagée entre rives et lit majeur, à la base du segment central (Fig. 13). Il y a environ un millénaire, des moulins à eau ont été implantés sur cet emplacement favorable car le débit de la rivière y est en théorie maximal en bas de pente. La disponibilité d'une ressource énergétique renouvelable a justifié le développement économique, sans que personne ne tire enseignement des inondations épisodiques qui n'ont pas dû manquer. La sortie de Blendecques est à 12 m d'altitude, et environ 10 m à l'entrée d'Arques (Fig. 13). Là débouche le canal de Neuffossé, avec le célèbre ascenseur des Fontinettes (voir webographie). Le remplacement de l'écluse multiple (fin XIX^e siècle) par une seule grande écluse, n'a pas modifié l'altitude de l'entrée de l'Aa dans le marais de Saint-Omer (≈ 5 m).

L'exemple de la fertilité du Nil dans l'Égypte antique est connu de tous : l'inondation annuelle apportait les alluvions nécessaires aux productions agricoles du delta. Le marais de St-Omer est l'effet de l'élargissement du lit majeur (Fig. 8); il joue sur l'Aa exactement le même rôle que le delta du Nil. Il en est de même pour les débouchés de la Somme, l'Authie et la Canche sur la plaine du Marquenterre. C'est le même mécanisme qui a construit la Plaine maritime (Fig. 8B) à partir des estuaires de l'Aa et de la Hem (Meilliez *et al.*, 2023). La

récurrence des inondations n'est donc pas une surprise. Les alluvions qui le comblent ne sont que les particules arrachées à l'amont et transportées selon les mécanismes évoqués ci-dessus (Fig. 4, 5, 6, 7 et 12).

Par construction, ce sont des surfaces très planes, donc attractives pour tout aménageur et promoteur. C'est donc un territoire bien plat, saturé en eau et inondable. Cette connaissance-là n'est donc pas une surprise non plus, et doit être prise en compte dans tout projet, public comme privé.

DE L'INONDATION À LA COULÉE DE BOUE

Le 22 juin 2024, une crue dévastatrice a, entre autres, balayé le hameau de La Bérarde (Isère), localisé à l'intersection de trois torrents qui dévalent les pentes de la Barre des Écrins et de l'Oisans. La coulée de débris qu'a charriée le Vénéon, affluent de la Romanche, est tout à fait comparable aux langues conglomératiques qui constituent la Formation de Fépin, en périphérie du massif cambro-ordovicien de Rocroi (Meilliez, 1983, 1984) (Fig. 14). Même si un phénomène aussi extrême ne s'est pas produit récemment dans le bassin-versant de l'Aa, le mécanisme est fondamentalement le même : un événement météorologique soudain et violent libère brutalement une masse d'eau qui dévale des pentes dépourvues de végétation; par inertie, l'eau embarque des particules de toutes tailles (Fig. 6) disponibles jusqu'à ce que l'énergie cinétique se dissipe sur un obstacle : coude de la vallée, diminution soudaine de la pente, possibilité d'étalement sur le lit majeur.

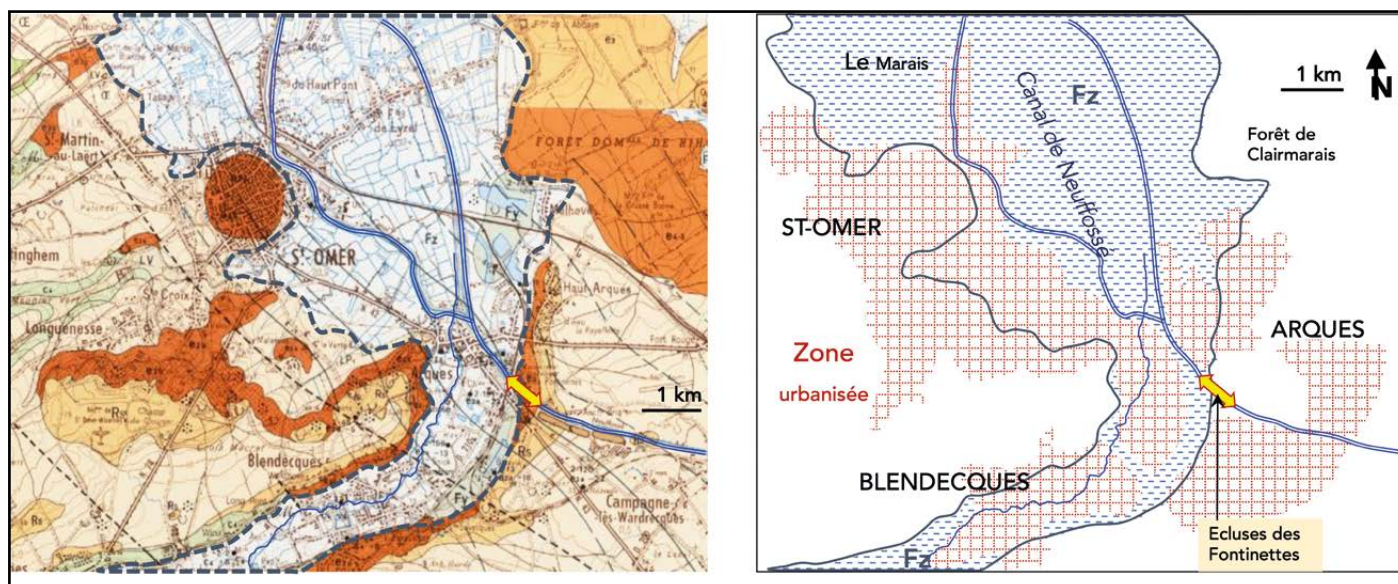


Fig. 13. Carte simplifiée entre Blendecques et St-Omer : le lit mineur de l'Aa se perd à son entrée dans le marais; le canal de Neuffossé est la voie navigable dotée de dérivations dont une seule est représentée. Le lit majeur de l'Aa s'élargit entre l'amont de Blendecques et Arques, à l'entrée dans le marais. L'essentiel de l'urbanisation a été développé au cours des derniers 60 ans, sur ce lit majeur de l'Aa.

Fig. 13. Simplified map between Blendecques and St-Omer: the Aa's minor bed disappears as it enters the marsh; the Neuffossé canal is the waterway with diversions, of which only one is shown. The Aa's major bed widens between Blendecques and Arques, as it enters the marsh. Most urban development over the past 60 years has taken place on this major bed of the Aa River.

La force inertielle de l'eau est donc le paramètre clé. Elle dépend :

- ✧ de la pente et de sa rectilinéarité;
- ✧ du volume d'eau libéré (précipitations, fonte glaciaire, cumul d'affluents);
- ✧ de la densité de la masse d'eau : l'incorporation de particules dans le flux diminue la viscosité de l'écoulement mais augmente sa portance (poussée d'Archimède) et donc la possibilité d'embarquer de gros blocs.

Tous ces facteurs, et leurs effets ont été discutés dans l'analyse des dépôts conglomératiques à matériel siliceux de la Formation de Fépin (Fig. 14). La différence majeure entre La Bérarde, la Roche à Corpias (Monthermé) et l'anticlinal du Boulonnais est que ce dernier est constitué de craies diverses, plus ou moins argileuses; le matériau est partiellement soluble et résiste peu aux chocs qu'implique le transport. La fréquence d'un tel événement sur un même site est très rare, peut-être de l'ordre du millénaire. On ne peut pas prétendre qu'il ne s'en soit pas produit sur le Boulonnais. Mais si c'est le cas quelque part, les effets ont été moins dévastateurs car la craie est un matériau fragile. C'est aussi un matériau soluble. Quant aux particules argileuses elles ont pu être transportées très loin. Mais il n'est pas impossible de trouver dans la craie des corps bréchiques, plus ou moins roulés, dont la mise en place

serait analogue à ce qui s'est passé à La Bérarde en juin 2024, ou à la Roche à Corpias, il y a environ 400 millions d'années. C'est notamment le cas au pied de la paléo-falaise de Sangatte (Sommé, 1977; Sommé *et al.*, 1999).

RÉSUMÉ ET QUELQUES INCITATIONS EN GUISE DE CONCLUSION

De façon un peu raccourcie, on peut écrire que la géomorphologie est à la géologie ce que la photographie est au cinéma. Le paysage actuel résulte d'une longue évolution dont l'eau est le sculpteur et le réseau hydrographique est une forme d'enregistrement. La versatilité du climat n'est pas en accord avec celle des populations humaines (Le Roy-Ladurie, 2020).

L'analyse conduite ci-dessus n'a fait qu'examiner les conditions naturelles de fonctionnement du réseau hydrographique qui occupe le bassin-versant de l'Aa, en insistant sur les circonstances qui favorisent l'érosion et la sédimentation. L'actualité récente rappelle l'importance de quelques considérations nécessaires :

- ✧ une inondation n'est pas fortuite : il y a nécessairement un événement météorologique intense qui apporte un excès d'eau par rapport à un sol soit desséché, soit déjà saturé;

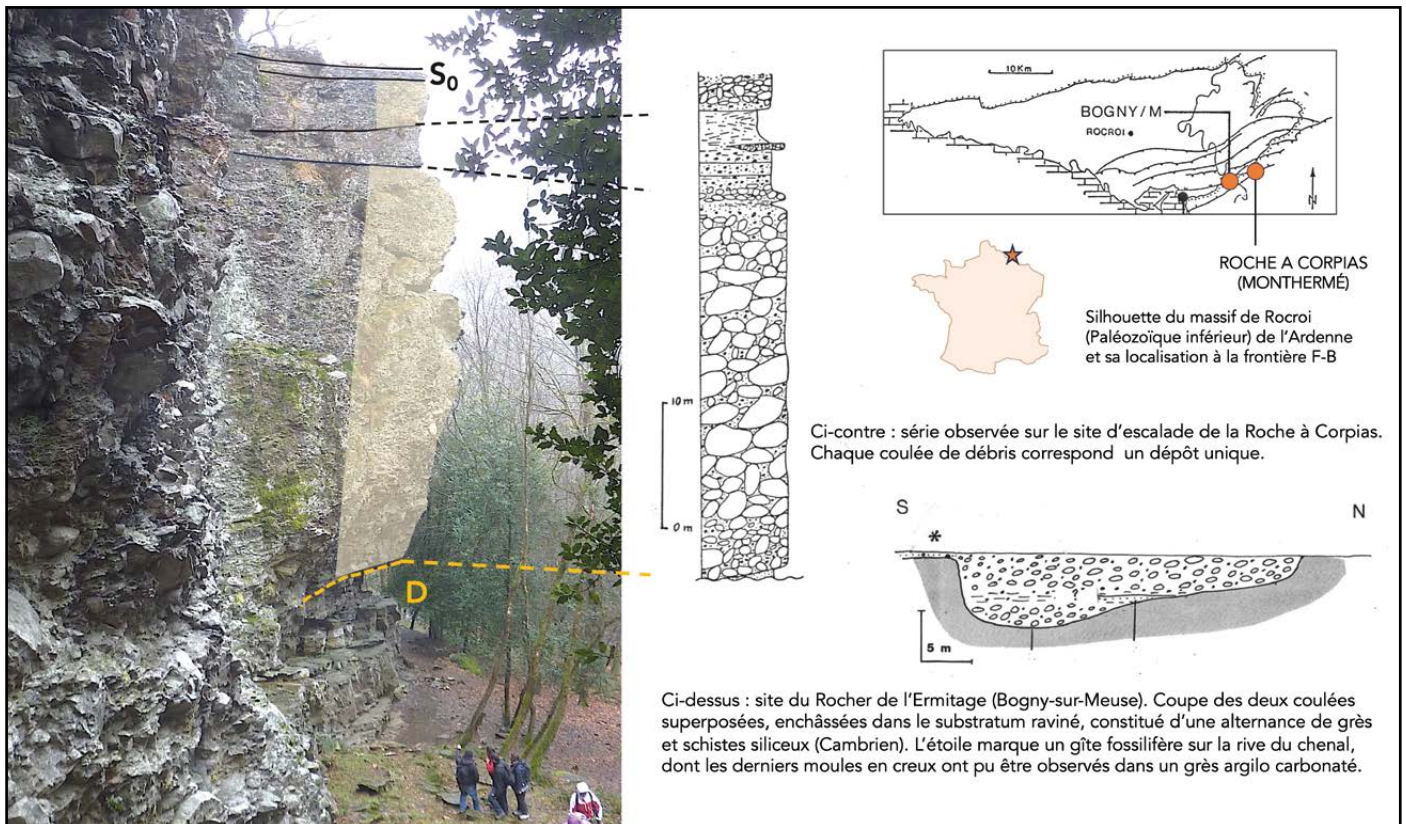


Fig. 14. La Formation de Fépin (massif Ardennais) résulte de crues torrentielles comparables à celle qui a balayé La Bérarde (Isère) le 22 juin dernier. Voir texte.

Fig. 14. The Fépin Formation (Ardennes massif) is the result of torrential flooding comparable to that which swept through La Bérarde (Isère) on June 22. See text.

- ✧ les mécanismes par lesquels l'eau se répartit entre ruissellement et infiltration sont simples a priori tant que des initiatives humaines ne viennent pas s'y opposer ;
- ✧ une source naturelle peut jaillir de façon irrégulière et intempestive ; il est préférable de lui en laisser la liberté ;
- ✧ les mécanismes de l'érosion et de la sédimentation sont bien connus ; les humains peuvent tenter de canaliser, mais l'eau finira toujours par passer par la voie qui lui demande le moins d'énergie.

À l'évidence, au cours du temps, un cours d'eau n'est pas stable ; son cours peut migrer pour diverses raisons naturelles, non abordées ici. Quelques dépôts résiduels (alluvions dites anciennes) en témoignent ; leur analyse sert à reconstituer le déroulement des événements.

Maintenant, il est clair que l'espèce humaine interagit largement, parfois en utilisant les mécanismes naturels (la force du courant d'eau pour utiliser l'énergie hydraulique), parfois en les contrariant (protections de berges). Dans ce cas il est indispensable de réfléchir aux conséquences et tenter de les circonvenir avant que le système ne s'emballe et se bloque.

Le bêchage et le labour ameublissent le sol ; sa mise à nu, l'absence de systèmes racinaires facilitent la mise en disponibilité des particules pour l'érosion, et amplifient donc le volume de sédiments délivré à l'aval. L'enracinement permanent (cultures, prairies, haies) contribue à ralentir le ruissellement, à favoriser l'infiltration, à retenir les particules de sol en déplacement. C'est pourquoi il faut favoriser tout système qui contribue à maintenir l'eau au plus près de son point de chute, soit en ralentissant le ruissellement, soit en favorisant l'infiltration. Dès lors qu'une source apparaît en un point, même si elle n'est pas permanente, il faut considérer qu'elle sera la cause épisodique de désordres locaux par ruissellement et érosion. Nier cette réalité en labourant quand même les zones concernées revient à fournir davantage de matériau au prochain épisode érosif, et par conséquent contribuer à combler rapidement les fossés et canaux creusés pour contrôler les écoulements. Ces conduits, élaborés par les humains, doivent être entretenus, curés pour assurer leur fonction. Mais il faut surtout ne pas considérer qu'il en est de même pour un cours d'eau naturel, au risque de stimuler une reprise d'érosion. Profil en long et profil en travers sont des surfaces d'équilibre, issues des interactions entre climat et constitution géologique des lieux. Leur instabilité ne se manifeste pas nécessairement à l'échelle humaine ; lorsqu'elle le fait brutalement nous parlons de catastrophe, quelle que soit la vitesse de son déplacement. La colline de Watten a glissé pendant quelques années, et n'a été stabilisée qu'en forant des drains inclinés vers la vallée pour faciliter l'évacuation de l'eau piégée dans quelques lits perméables et sous pression dans l'Argile des Flandres.

Ces quelques simples rappels doivent être connus de tous, car tous peuvent en être victimes. Sans le savoir les enfants

aiment beaucoup expérimenter l'érosion et la sédimentation, et pas seulement à la plage. Ce doit être l'occasion de les faire réfléchir sur les mécanismes enclenchés, en faisant le lien avec des événements qui ont pu se produire localement. Pour les adultes, une vraie information ne consiste pas à se limiter à décrire les dégâts après un épisode d'inondation, et à comptabiliser les coûts. Il faut encourager le partage de réflexion pour comprendre les conditions locales qui contribuent à cette inondation, ou l'aggravent, et réfléchir aussi aux solutions alternatives. Il est possible de vivre sur l'eau, ou sur des sols saturés en eau. Les exemples sont nombreux sous des latitudes diverses. Il faut juste se donner les moyens d'anticiper les dégâts qui pourraient être causés par l'inondation. Aujourd'hui, beaucoup de territoires en subissent encore l'expérience et peuvent donc, en connaissance de cause, engager la réflexion ad hoc.

Remerciements : Cette publication remet en perspective géologique divers articles suscités par la presse à la suite des inondations de l'hiver autour du Boulonnais. Merci à Bruno Jacquemin et Dominique Poissonnier (Météo-France) pour de stimulantes discussions et mise à disposition de documents. Merci à Pierre-Gil Salvador et Marie Genges pour m'avoir poussé à rendre accessible à tout public les phénomènes élémentaires auxquels nous ne prêtons plus suffisamment attention. Sarah Sermondadaz, Grégoire Pagnier et Didier Torz ont apporté des suggestions bénéfiques. Les traductions ont été faites avec DeepL.

RÉFÉRENCES CITÉES

- AMEDRO F., GRAVELEAU F., HOFFMANN A., TRENTESAUX A. & TRIBOVILLARD N. (2023). – La craie glauconieuse de Lezennes et ses « Tuns » dans le forage de la Cité Scientifique de Villeneuve d'Ascq (Nord) : interprétation d'une succession ultra condensée à la limite Turonien-Coniacien. *Ann. Soc. Géol. Nord*, T30 (2^e série) : 49-78.
- AMEDRO F. & ROBASZYNSKI F. (2014). – Le Crétacé du Bassin parisien. In Gély J.P. & Hanot F. (dir), *Le Bassin parisien, un nouveau regard sur la géologie. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris. Mémoire hors-série n° 9* : 75-84
- ANTOINE P. (2019). – Le quaternaire de la vallée de la Somme (terrasses fluviales, loess et paléosols) : une contribution à l'inventaire national du patrimoine géologique, *Quaternaire*, vol. 30/3 : 257-270.
- ANTOINE P., ROUSSEAU D-D., DEGEAIA J-P., MOINEA O., LAGROIX F., KREUTZERE S., FUCHSE M., HATTÉF C., GAUTHIERF C., SVOBODAG J. & LISÁH L. (2013). – High-resolution record of the environmental response to climatic variations during the Last Interglacial-Glacial cycle in Central Europe: the loess-palaeosol sequence of Dolní Vestonice (Czech Republic); *Quaternary Science Reviews*, 67 : 17-38.

- BONTE A. (1971). – Poches de dissolution et argile résiduelle. *Ann. Soc. Géol. Nord*, XCI : 39-46., 2 pl.
- BONTE A. & DEBRABANT P. (1973). – Étude géochimique de l'argile résiduelle de la craie. *Ann. Soc. Géol. Nord*, XCIII : 95-115.
- BRAVARD J-P. & PETIT F. (2000). – Les cours d'eau; dynamique d'un système fluvial. *Armand Colin éd.*, 222 p.
- CHAMPION M. (1863). – Les inondations en France du VI^e siècle à nos jours. T.5, 460 p. Edition Cemagref (2000). Source : gallica.bnf.fr/BnF.
- DE WEVER P., DAVID B. & NÉRAUDEAU D. (2010). – Paléobiosphère : regards croisés des sciences de la vie et de la Terre. MNHN, SGF, Vuibert éditeurs, Paris, 796 p.
- DECONINCK J-F., AMEDRO F., BAUDIN F., GODET A., PELLENARD P., ROBASZYNSKI F. & ZIMMERLIN I. (2005). – Late Cretaceous palaeoenvironments expressed by the clay mineralogy of Cenomanian-Campanian chalks from the east of the Paris Basin. *Cretaceous Research*, 26 : 171-179.
- DEMANGEON A. (1973). – La Picardie et les régions voisines : Artois, Cambrésis, Beauvaisis. *Libr. Guénégaud*, Paris, 496 p., 3 pl. h-t.
- DERU X. (dir). (2022). – L'atelier de potiers de la période romaine des « Quatre Bornes » aux Rues-des-Vignes (Nord). *Revue du Nord*, hors série, collection Art et Archéologie. N° 31, 400 p.
- DESOIGNIES J. & THIBAUT P.M., (1968). – Carte géologique détaillée de la France, Saint-Omer, BRGM.
- DEWOLF Y., (2008). – Les formations à silex. *In Dewolf & Bourrié : Les formations superficielles. Ellipses éd.* : 136-140.
- DEWOLF Y. & BOURRIÉ G. (coord.) (2008). – Les formations superficielles. *Ellipses éd.*, 831 p. [IL DOIT Y AVOIR UNE ERREUR, UN NB DE PAGES EST TOUJOURS PAIR]
- DUCHAUFOUR P. (1991). – Pédologie : sol, végétation, environnement. Coll. Abrégés, Masson éd. 289 p. [IL DOIT Y AVOIR UNE ERREUR, UN NB DE PAGES EST TOUJOURS PAIR]
- DUPUIS C. (2021). – Une sablière dans la grande guerre à Blairville (Sparnacien, Paléocène-Éocène) sur le sud du saillant d'Arras. *Ann. Soc. Géol. Nord*, T28 (2^e série) : 99-110.
- DURAND S. (2021). – 20 000 ans. *Actes Sud*, 300 p.
- GOSSELET J. (1898). – Cours de Géographie physique du Nord de la France et de la Belgique – VIII – Cambrésis – Vermandois. *Ann. Soc. Géol. Nord*, XXVII : 197-212
- GRAVELEAU F., CHANIER F., MEILLIEZ F., REYNAUD J-Y., & MUSIAL G. (2021). – Observation de la surface de transgression du tuffeau thanétien sur la craie coniacienne au niveau du flanc nord de l'anticlinal du Mélandois (Nord). *Ann. Soc. Géol. Nord*, T28 (2^e série) : 99-110.
- GRAVELEAU F., CHANIER F., DESCHODT L., AVERBUCH O. & LECOCQ T. (2023). – Compte rendu de l'excursion sur les failles potentiellement actives dans le Nord de la France des 20 et 21 octobre 2022. *Ann. Soc. Géol. Nord*, T30 (2^e série) : 41-48.
- GUPTA S., COLLIER J.S., GARCIA-MORENO D., OGGIONI F., TRENTESAUX A., VANNESTE K., DE BATIST M., CAMELBECK T., POTTER G., VAN VLIET-LANOE B. & ARTHUR J.C.R. (2007). – Two-stage opening of the Dover Strait and the origin of island Britain. *Nature Communications* | 8 : 15101 | DOI : 10.1038/ncomms15101 |
- HOUTHUYS R. (2014). – A reinterpretation of the Neogene emersion of central Belgium based on the sedimentary environment of the Diest Formation and the origin of the drainage pattern. *Geologica Belgica*, 17 : 211-235.
- HUJLSTRÖM F. (1939). – Transportation of detritus by moving water in: Trask D.D. (ed), Recent Marine Sediments, A Symposium. *Soc. Econ. Paleont. Mineral Spec.* 4, p. 5-31.
- KREITZ M. & SOREL M. (2024). – Un automne 2023 très perturbé. *La Météorologie*, n° 124 : 49-56.
- LAGA F., LOUWYE S. & GEETS S. (2002). – Palaeogene and Neogene lithostratigraphic units (Belgium). *Geologica Belgica*, 4 : 135-152.
- LEPLAT J., SOMMÉ J. & BONTE A. (1982). – Carte géologique détaillée de la France, Desvres, BRGM.
- LE ROY LADURIE, E. (2020). – Histoire du climat depuis l'an mil. *Flammarion, coll. Champs*, 3^e édition, 680 p.
- LERICHE M. (1932). – Révision de la feuille de Cambrai au 80.0000 : observations hydrologiques dans la haute vallée de l'Escaut. *Bull. Serv. Carte géol. Fr.*, n° 179, XXXIV : 271-272.
- MANIA, J. (1972). – Hydrogéologie des sables landéniens en Flandres franco-belges. *Ann. Soc. Géol. Nord*, 92 : 55-66.
- MANLAY A. & PARMENTIER M. (2024). – Eaux souterraines en Hauts-de-France : synthèses des principaux aquifères et hydro-systèmes. *Ann. Soc. Géol. Nord*, T30 (2^e série) : 121-130.
- MEILLIEZ F. (1983). – Analyse de la déformation et évaluation des textures sédimentaire et tectonique dans le poudingue dévonien de Montcornet-en-Ardenne (France). *Ann. Soc. Géol. Nord*, CII : 153-163.
- MEILLIEZ F. (1984). – La Formation de Fépin (Gédinnien de l'Ardenne) : un marqueur régional lithostratigraphique et structural. *Ann. Soc. Géol. Nord*, CIII : 37-53.
- MEILLIEZ F. (2016). – Le Cambrésis masque-t-il un lien ou une discontinuité structurale entre l'Artois et l'Ardenne? *Ann. Soc. Géol. Nord*, T24 (2^e série) : 17-29.
- MEILLIEZ F. & BELIN J-J., (2022). – Territoire et matériaux, géologie et histoire : visite en pays de Pévèle. *Ann. Soc. Géol. Nord*, T29 (2^e série) : 121-132.
- MEILLIEZ F., BEUCHERIE A., DESCHODT L., MARÉCHAL C., LECOMTE J. & NICOLLIN J-P. (2023). – Le pays des wateringues, une cohabitation disputée entre l'espèce humaine et la mer. *Ann. Soc. Géol. Nord*, T30 (2^e série) : 161-176.
- PINCHEMEL A. (1954). – Les plaines de craie du nord-ouest du Bassin parisien et du sud-est du Bassin de Londres et leurs bordures. *Lib. Armand Colin*, Paris, 502 p.

- POMEROL C. ET COLL., (1984). – Carte géologique détaillée de la France, Soissons, BRGM.
- RAMSTEIN G. (2015). – Voyage à travers les climats de la Terre. *Odile Jacob* éd. 352 p.
- SOMMÉ J. (1977). – Les Plaines du Nord de la France et leur bordure – étude géomorphologique. *Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, Université de Lille 3*, 2 tomes : 810 p.
- SOMMÉ J., ANTOINE P., CUNAT-BOGE N., LEFÈVRE D. & MUNAUT A.-V – (1999), Le Pléistocène moyen marin de la mer du Nord en France : falaise de Sangatte et formation d'Herzeele ; Quaternaire, v. 10, n° 2-3, p. 151-160. <https://doi.org/10.3406/quate.1999.1638>
- VRIELYNCK B. (2014). – Géodynamique du Bassin parisien dans le contexte de la plaque eurasiennne. In Gély J.P. & Hanot F. (dir), *Le Bassin parisien, un nouveau regard sur la géologie. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris. Mémoire hors-série n° 9.* : 44-47.
- WYNS R. (2014). – Le Bassin parisien du Tertiaire à l'Actuel. In Gély J.P. & Hanot F. (dir), *Le Bassin parisien, un nouveau regard sur la géologie. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris. Mémoire hors-série n° 9.* : 85-93.

Webographie

- BRIQUETERIES : <http://www.briques-nord.org/le-syndicat/>
- CANAL DE NEUFFOSSÉ ET ASCENSEUR DES FONTINETTES : http://projetbabel.org/fluvial/rica_neufosse-canal.htm
- CAUE (Conseil, Architecture, Urbanisme, Environnement) : <https://www.caue-nord.com>
- COPERNICUS : <https://www.copernicus.eu/fr>
- DIAGRAMME de Hjulst https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Hjulstr%C3%B6m
- IGN/PROFILS DE RIVIÈRES : https://geodesie.ign.fr/fiches/src/images/profils/profil_riviere.jpg
- INFOTERRE : <http://infoterre.brgm.fr/>
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE : <https://agriculture.gouv.fr/prevenir-lerosion-des-sols-pour-protger-leurs-ressources-et-leur-biodiversite>
- S-PASS TERRITOIRES : <https://www.s-pass.org/fr/>
- TUILERIES : <https://www.tuilesgerard.fr> ou <https://edilians.com/> à Phalempin, entre autres.

