

Société Géologique du Nord

Dossier

La ressource en eau : état des connaissances et perspectives



Dossier tiré du Tome XXX des Annales de la Société Géologique du Nord, 2023

SOMMAIRE

Dossier tiré du **Tome XXX (2^e série) 2023**

Francis MEILLIEZ, Pierre-Gil SALVADOR.– L'eau dans les Hauts-de-France, entre la pluie et la mer.....	101
André FLAJOLET.– Introduction au colloque Eau lors des 150 ans de la SGN à DOUAI (27 mars 2022).....	103
Caroline NORRANT.– Variations spatiales et temporelles des précipitations dans les Hauts-de-France	105
Pierre-Gil SALVADOR, Éric MASSON.– Les eaux de surface.....	109
Christophe DELBECQUE.– Évolution des zones humides de la vallée de l'Yser, l'exemple d'Herzeele	117
Adrien MANLAY, Marc PARMENTIER.– Eaux souterraines en Hauts-de-France : Synthèses des principaux aquifères et hydrosystèmes.....	121
Barbara LOUCHE.– La fonction d'hydrogéologue agréé.....	131
Étienne LOUIS.– Les anciens aménagements agraires d'une zone humide : la plaine de la Scarpe, de l'Antiquité à l'Époque moderne	133
Bernard MAITTE.– Eau et activités techniques dans le Nord au XIII ^e siècle.....	143
Olivier PRÉVOST.– Bilan de la ressource en eau du bassin Artois-Picardie	147
Francis MEILLIEZ et Didier TORZ (Interview réalisée par).– L'eau dans les communes des Hauts-de-France	153
Maëlle ANCELLE.– Les eaux pluviales : d'un statut de déchet à celui de ressource et de richesse pour les territoires	155
F. MEILLIEZ, A. BEUCHERIE, L. DESCHODT, C. MARÉCHAL, J. LECOMTE, J.-P. NICOLLIN.– Le pays des waterings, une cohabitation disputée entre l'espèce humaine et la mer.....	161
Emilie PRYGIEL, Justin LECOMTE.– Comment surveiller la qualité des eaux superficielles pour en connaître la qualité ? Exemple du marais d'Isle de Saint-Quentin	177
Thierry VINAY.– Les ressources en eau pour une mise en bouteilles.....	183
Justin LECOMTE, Catherine NEEL, Pascal MAUGIS.– STRATEAU – une approche novatrice et un outil innovant de gestion prospective des tensions sur l'eau	187
Anne LE STRAT.– Des territoires en état d'urgence... d'eau	191
Références bibliographiques du dossier	193
Glossaire et liens numériques	197



© 2023 Société Géologique du Nord éditeur, Villeneuve d'Ascq
Société Géologique du Nord et SGN sont une marque déposée INPI n° 18.4.431.538

Toute reproduction, même partielle, de cet ouvrage est interdite. Une copie ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, photographie, microfilm, bande magnétique, disque, ou autre, constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi du 11 mars 1957 sur la protection des droits d'auteurs.

Société Géologique du Nord

Dossier

La ressource en eau : état des connaissances et perspectives

Ce tome 30 des Annales de la SGN bénéficie d'aides financières de l'Université de Lille, du Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG - UMR 8187 Univ. Lille-CNRS-Univ. Littoral Côte d'Opale), du laboratoire Evo-Eco-Paléo (EEP - UMR 8198 Univ. Lille-CNRS), du Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE - Univ. Lille, IMT-Lille-Douai, Yncrea Hauts de France) et de l'Unité Matériaux et Transformations (UMET - UMR 8207 CNRS-Univ. Lille)

CONSEIL D'ADMINISTRATION
2023 - 2025

Présidente d'honneur	Denise BRICE
Président d'honneur	Francis ROBASZYNSKI
Président et directeur de la publication	Patrick AUGUSTE
Vice-président	Hervé COULON
Secrétaire	Christine MARECHAL
Trésorier	Jean-Pierre NICOLLIN
Bibliothécaire-Archiviste	Jessie CUVELIER
Rédacteur en chef	Didier TORZ
Conseillers	François DUCHAUSSOIS Justin LECOMTE Benoît PONCELET André STYZA Mickaël SWIALKOWSKI

Autres fonctions bénévoles

Directeur	Francis MEILLIEZ
Adjoint au Secrétaire	Fabien GRAVELEAU
Adjointe au rédacteur en chef	Danielle DECROUEZ
Site Web	Benoît CRÉPIN
Réseaux sociaux	Mathieu PONCELET
Coordonnateur des visites de terrain	Arnaud BAK
Coordinatrice du Comité de médiation scientifique	Renée DUCHEMIN

CONSEIL SCIENTIFIQUE ET ÉDITORIAL
2023 - 2025

Tectonique	Olivier AVERBUCH (Université de Lille, Villeneuve d'Ascq)
Magmatisme - Métamorphisme	Pierre BARBEY (CRPG, Nancy)
Paléontologie	
Directrice scientifique	Danielle DECROUEZ (Haute-Savoie)
Géoarchéologie	Laurent DESCHODT (INRAP, Villeneuve d'Ascq)
Géopatrimoine	Patrick DE WEVER (MNHN, Paris)
Stratigraphie (Mésocène-Cénozoïque)	Christian DUPUIS (Université de Mons, Belgique)
Géologie appliquée	Jean-Louis DURVILLE (CFGI)
Géologie sédimentaire	Éric GOEMAERE (IRSN, Bruxelles)
Géophysique	Franck HANOT (CDP-Consulting, Chanzy)
Histoire des Sciences	Philippe LE VIGOUROUX (Paris)
Hydrogéologie	Barbara LOUCHE (Université d'Artois, Lens)
Stratigraphie (Paléozoïque)	Elise NARDIN (CNRS, Toulouse)
Rédacteur en chef	Didier TORZ (SGN, Villeneuve d'Ascq)

LISTE DES RAPPORTEURS DES ARTICLES DU TOME 30

Francis AMÉDRO (SGN, retraité de l'enseignement du second degré, Calais)
Olivier AVERBUCH (Maître de conférences, Université de Lille)
Jean-François DECONINK (Université de Bourgogne-Franche-Comté)
Danielle DECROUEZ (Directrice Honoraire du Muséum d'histoire naturelle et du Musée d'histoire des sciences de Genève)
Fabien GRAVELEAU (Maître de conférences, Université de Lille)
Francis MEILLIEZ (Professeur émérite, Université de Lille)
Francis ROBASZYNSKI (Professeur honoraire, Polytech'Mons, Belgique)

Avertissement : Le Dossier thématique est un concept nouveau dans cette revue. Le premier est consacré à l'eau, enjeu social du XXI^e siècle. Pour matérialiser l'unicité du Dossier, toutes les références bibliographiques, numériques et acronymes sont rassemblées en fin de Dossier. Le lecteur est invité à s'y reporter.

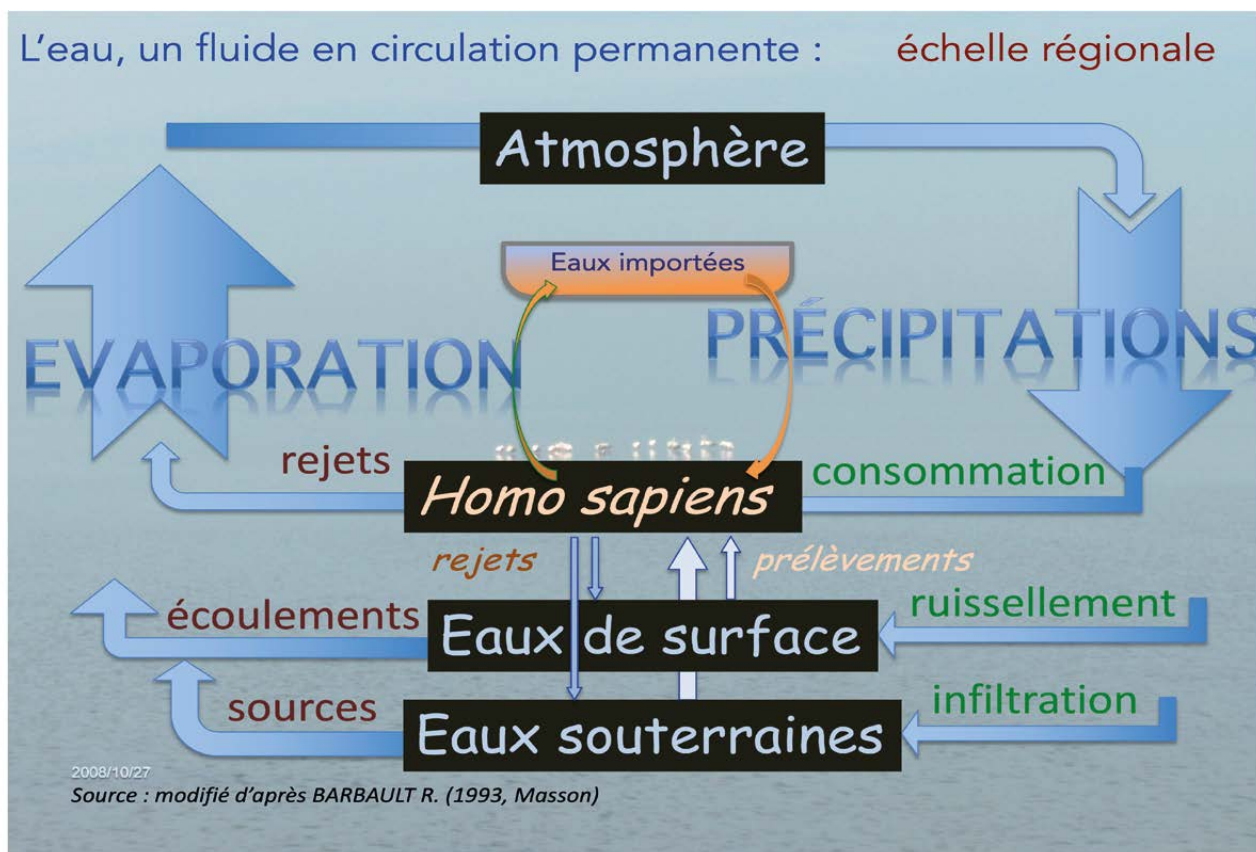
L'EAU DANS LES HAUTS-DE-FRANCE, ENTRE LA PLUIE ET LA MER

Francis Meilliez
Pierre-Gil Salvador

Lors de la campagne présidentielle de 1974, les Français ont découvert un homme au pull-over rouge, déclarant à la télévision que le verre d'eau qu'il tenait à la main serait l'or du XXI^e siècle. Cambrésien de naissance, au gré des migrations professionnelles de ses parents, il aurait eu 120 ans en 2024. La SGN ne peut que rendre hommage à son sens de la vision, car les deux années qui viennent de s'écouler ont enfin ébranlé une large part de population, jusque là retranchée derrière l'affirmation facile : « Dans le Nord il pleut très souvent, il ne peut pas y avoir de problème de ressource en eau ! » Certes, ingénieur agronome, René Dumont a défendu pendant une quinzaine d'années le modèle d'une agriculture productiviste, machiniste et interventionniste sur le milieu naturel. Cependant, il a très tôt aussi développé une vision systémique, enrichie d'expériences africaines et asiatiques et complétée par sa connaissance du

monde agricole métropolitain, qui l'a convaincu de la nécessité de mieux comprendre le milieu sur lequel intervient le paysan pour s'adapter aux spécificités locales de ce milieu.

Les pages qui suivent sont centrées sur l'aspect ressource en eau : une fois les précipitations (eau, neige, glace) au sol, quels sont leurs cheminements ? L'espèce humaine court-circuite de multiples façons les voies naturelles (Fig. 1). Certaines sont heureuses pour sa survie, d'autres le sont beaucoup moins, tant pour elle-même que celle des autres vivants. Examiner la situation dans une perspective temporelle accroît la pression. Jusqu'au XX^e siècle, personne, hors des régions au climat aride, ne mettait en doute que la ressource en eau suffise partout à satisfaire les besoins. Les technologies développées par l'humanité ont pour effet sensible depuis plus d'un siècle, d'augmenter l'espérance de vie, donc d'accroître la pression démographique dans des lieux que ces



mêmes technologies ont rendu agréables à vivre. De très fortes concentrations urbaines dégradent ainsi des territoires dont la vulnérabilité à l'érosion, aux forces telluriques naturelles, aux extrêmes climatiques, est de plus en plus perdue de vue. G. de Marsily (2009) explique que la quantité d'eau qui gravite autour et dans la planète Terre suffit aux besoins de l'ensemble des êtres vivants. Les problèmes d'abondance sont donc régionaux; la plupart résultent de conflits d'usage, de l'échelle des particuliers à celle des États. Des solutions raisonnées sont donc possibles; encore faut-il les vouloir et se donner les moyens de les mettre en pratique à toutes échelles. Les pages qui suivent illustrent quelques aspects de cette question complexe en se limitant au territoire régional, de façon à concrétiser tant la formulation des problèmes que les pistes de recherche de solutions.

Caroline Norrant, géographe (U-Lille), rappelle le régime des précipitations sur le territoire régional. Pierre-Gil Salvador et Eric Masson (U-Lille) prennent le relais en rappelant comment les ruissellements s'organisent en cours d'eau, dont l'exutoire ultime est la mer. La part d'infiltration alimente les aquifères souterrains, ce qui différencie fortement les trajectoires. Les hydrogéologues du BRGM présentent une belle synthèse de l'ensemble du système souterrain. Barbara Louche (U-Artois) explique le rôle méconnu de l'hydrogéologue agréé.

En surface comme en profondeur, les réservoirs et cheminements exposent aussi les eaux à diverses contaminations. La spécificité de l'espèce humaine est d'intensifier, par rapport à une cinétique naturelle, ses interventions contaminantes, tant en volumes, diversité et célérité. En effet, tout être vivant consommant de l'eau et de l'énergie, rejette des déchets que l'eau véhicule. Toutefois, sur un territoire donné, ces rejets ne sont pas également répartis. Par effet de cumul, avec le temps, cela conduit à dégrader de plus en plus les réservoirs souterrains et certains tronçons des conduits, en profondeur comme en surface. Les milieux n'ont pas le temps d'ajuster leur équilibre, par définition constamment précaire. C'est donc un problème qui grossit avec le temps, que seul un public averti peut apercevoir aujourd'hui; il est indispensable de développer la sensibilité des populations sur ce sujet.

Ainsi, diverses contributions témoignent d'usages de l'eau variés, tant dans le passé qu'actuels. De quoi alimenter nos nécessaires réflexions sur l'avenir. Christian Delbecque (écologue) expose les avantages et inconvénients d'une intervention sur un cours d'eau en surface, à l'échelle du territoire communal. Étienne Louis montre comment les archéologues d'aujourd'hui tentent de comprendre l'ingéniosité hydraulique durant la période gallo-romaine, voir plus ancienne. Bernard Maitte (U-Lille) révèle comment un grand bâtisseur médiéval témoigne de l'usage de la puissance hydraulique. Olivier Prévost (DREAL) dresse un bilan de la ressource régionale en eau afin d'en dégager une stratégie de parcimonie

pour le siècle suivant. Deux maires (Watten et Steenwerck) ont accepté de témoigner de leur perception du difficile rôle d'arbitre à l'échelle d'une communauté territoriale. Maëlle Ancelle (ADOPTA) explique comment une réflexion locale menée à partir d'inondations répétées a conduit à élaborer un outil d'aide à la décision pour les collectivités territoriales confrontées aux mêmes récurrences. Un collectif de la SGN rassemble les connaissances universitaires et les observations recueillies à l'occasion d'actions menées en coopération avec l'Université du Temps Libre, pour présenter une synthèse actualisée sur la plaine maritime flamande et son combat pluriséculaire pour valoriser ce territoire de diverses façons. Cet enjeu concerne toute la bordure orientale de la Mer du Nord; sur la partie française, près d'un demi-million d'habitants en dépendent. Émilie Prygiel (CEREMA) expose la grande sensibilité qualitative de plans d'eau péri-urbains, dont les riverains ne sont pas tous conscients. Thierry Vinay (Groupe Roxane) explique les contraintes pesant sur les gisements d'eau en bouteilles. Justin Lecomte (CEREMA) esquisse les contours d'un projet visant à inventorier les « gisements » négligés jusqu'à présent, d'eaux de qualité diverse afin de déployer un outil d'aide à la décision pour mettre ces gisements en regard d'usages adaptés.

INTRODUCTION AU COLLOQUE EAU LORS DES 150 ANS DE LA SGN À DOUAI (27 MARS 2022)

André Flajolet

Président du Comité de Bassin Artois-Picardie, ancien président du Comité National de l'Eau (2008-2012)

Je remercie la Société Géologique du Nord et son président de permettre au président du Comité de Bassin d'ouvrir ce colloque de pleine actualité pour la vie des humains et de la planète dans toutes ses composantes. J'apprécie la présence du CAUE* et de l'Association ADOPTA dans ce colloque.

Notre Agence née en 1964 a déjà un long passé mouvementé par la volonté des politiques souvent plus attentifs à ses moyens qu'à ses missions, par la nature des événements car les désordres climatiques envahissent le monde de la terre et des océans, par l'inflation des normes et des textes tant sur le plan européen que national, par l'urgence climatique enfin où, en 2021 et 2022 sur notre territoire local, ont cohabité des arrêtés de catastrophe naturelle, soit pour la sécheresse soit les inondations, soit les coulées de boue, soit encore les rétractations d'argile.

C'est dire que la prise de conscience en cours pour laquelle vous êtes des acteurs incontournables requiert à la fois votre engagement, vos savoirs et expériences et ce colloque à Douai, ville symbole du mariage de la ville et de la nature, ville siège de l'Agence, ville de l'association Adopta, est à la fois significatif d'une conscience collective qui s'éveille, s'indigne et surtout propose de nouveaux chemins pour permettre à la nature de se régénérer, de nouveaux regards pour une économie écologique frugale et circulaire car notre patrimoine eau ne peut continuer à subir les outrages de l'homme. Notre devise du nouveau SDAGE* qui a été proposé au vote mardi 15 mars jour prend tout son sens : Sobriété, Solidarité et Innovation. Ce SDAGE ambitieux a été validé à 97 %.

Ajouterai-je que les hommes ne peuvent continuer à subir les conséquences des outrages faits à la nature tant la relation homme/nature se dégrade dans ses principes et ses contenus. Ici dans notre bassin, 22 % des masses d'eau sont en bon état et avec des efforts collectifs, nous espérons dans la perspective du SDAGE 2027 atteindre 50 %, ce qui est à la fois énorme et dérisoire.

La loi de 1992 affirme que l'eau est le patrimoine commun de la Nation mais, comme le sait tout propriétaire ou tout bon père de famille, le patrimoine nécessite entretien et réparation voire valorisation au-delà des simples intérêts d'utilisation à court terme.

L'empilement des textes depuis la DCE montre un paradoxe évident : les exigences législatives ayant trait à la quantité et qualité n'ont jamais été aussi nombreux, les moyens financiers accordés ne sont pas à la hauteur et le patrimoine des ouvrages de valorisation et distribution manquent cruellement

de sécurité et de qualité, ceux de réparation « eaux usées » restent insuffisants, ceux de prévention quasi inexistantes.

De plus, malgré la prise de conscience de la fragilité de nos ressources, malgré certains discours, malgré les Assises de l'eau 2019, le sentiment utilitaire reste dominant comme si nos fondamentaux économiques n'avaient aucune capacité à intégrer les urgences environnementales et démocratiques.

La forte artificialisation de nos espaces, les pollutions historiques nombreuses et d'origine diverse, l'agriculture forte consommatrice d'eau et d'intrants ne font qu'ajouter aux difficultés. La guerre en Ukraine voit l'urgence de réponses dans le temps court au détriment du temps long.

Il conviendrait de se réapproprier l'architecture globale de la DCE dans son triptyque.

- ✧ Eau vitale pour les humains
- ✧ Eau vitale pour la croissance économique
- ✧ Eau vitale pour les écosystèmes naturels.

Triptyque à relire à travers les deux objectifs de développement durable (ODD)

- Objectif 6 : accès à l'eau et à l'assainissement à tous
- Objectif 14 : conservation et exploitation des océans, des mers et des ressources marines.

Aussi, au-delà de la gestion petit cycle qui a constitué, après les pollutions industrielles, le cœur des activités des agences, il convient de prendre en compte les nouvelles données environnementales qui portent sur le grand cycle, sur le rapport urbain/rural, sur les agricultures et leurs relations à la terre avec la présence massive des substances cancérigènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction (C.M.R), sur la surface maritime et plus globalement les océans.

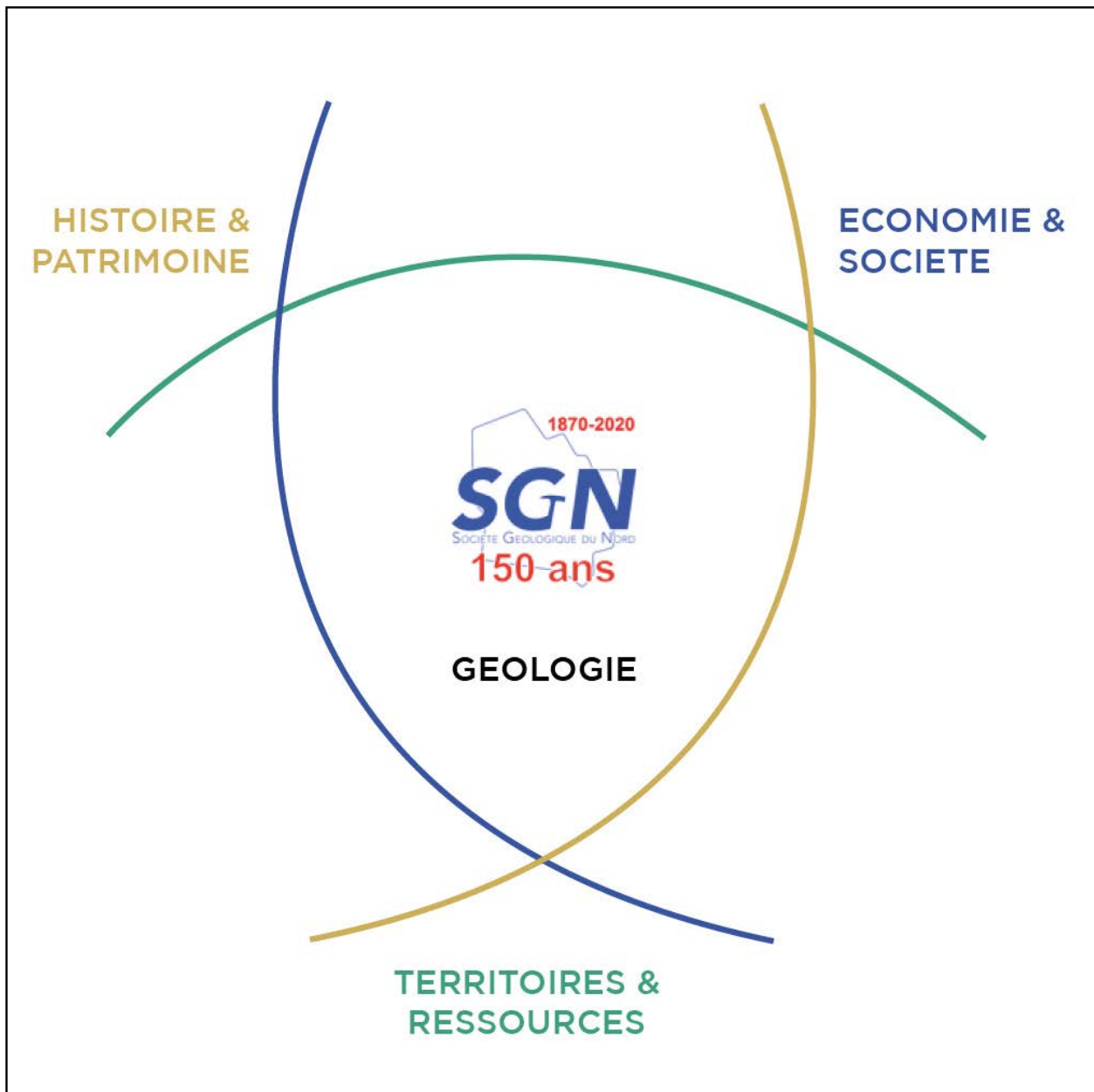
A ces nouvelles données environnementales s'ajoutent les enjeux humains d'accès à l'eau et à l'assainissement pour certaines populations, les enjeux d'habitat avec la désertification de certains espaces ou la submersion continue dans d'autres territoires, les enjeux géopolitiques aussi : ainsi l'un des premiers actes russes face à l'Ukraine fut le rétablissement de la continuité de la rivière pour alimenter la Crimée en eau et les enjeux en France se traduisent par l'accès à l'azote biélorusse, aux produits phytosanitaires et à la nécessité d'intensifier les récoltes de blé pour compenser la perte d'activités agricoles dans l'Ukraine dévastée. Par ailleurs de nombreux pays investissent dans la génétique

des plantes ou des systèmes de précision pour répondre aux nouveaux défis de l'eau.

Il nous appartient donc de refonder nos logiciels de protection et de gestion de l'eau, d'inventer une fiscalité environnementale audacieuse pour que l'eau soit vraiment, comme le dit la loi de 1992, « le bien commun de la Nation » pour qui depuis les comités consultatifs, les communes et intercommunalités, les SDAGE et les SRADDET et, au-delà, les COP et les Forums nous soyons tous au cœur de cet enjeu de vie.

Ce colloque participe, comme le colibri de P. Rabbi le faisait contre les incendies, à la lutte contre l'indifférence ou

la consommation linéaire; il participe à la prise de conscience des urgences climatique, environnementale et humaine; il invite à être attentif à la vie complexe des rivières et des océans, ces communs à tous et à personne; il invite surtout à être des acteurs d'un autre logiciel pour établir les rapports entre l'homme et la nature pour que nous n'ayons jamais à méditer sur l'actualité d'un message que j'emprunte à Sitting Bull : « *Quand ils auront coupé le dernier arbre, pollué le dernier ruisseau, pêché le dernier poisson, alors ils s'apercevront que l'argent ne se mange pas.* »



VARIATIONS SPATIALES ET TEMPORELLES DES PRÉCIPITATIONS DANS LES HAUTS-DE-FRANCE

Spatial and temporal rainfall variations in Hauts-de-France

Caroline Norrant

Univ. Lille, Univ. Littoral Côte d'Opale, ULR 4477 - TVES - Territoires Villes Environnement & Société, 59000 Lille - France
caroline.norrant@univ-lille.fr

S'il est communément admis que dans le Nord de la France la pluie est un élément quasi-quotidien du paysage, la ressource en précipitations est toutefois plus complexe et connaît des variations, tant dans l'espace qu'au cours des différentes saisons de l'année.

Les pluies en région Hauts-de-France proviennent majoritairement de perturbations tempérées d'origine atlantique (Fig. 1), dans un flux d'ouest à sud-ouest. Ces perturbations apportent donc de l'air doux, qui s'est rechargé en humidité sur l'océan Atlantique, avant de donner des précipitations sur la région.

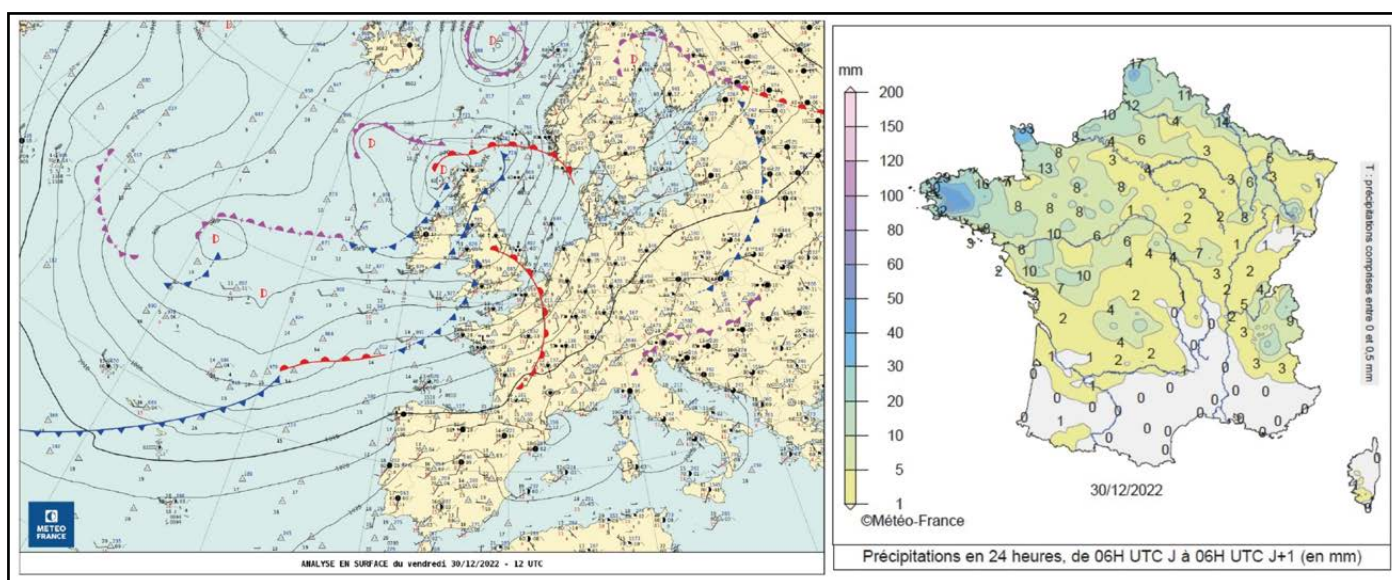
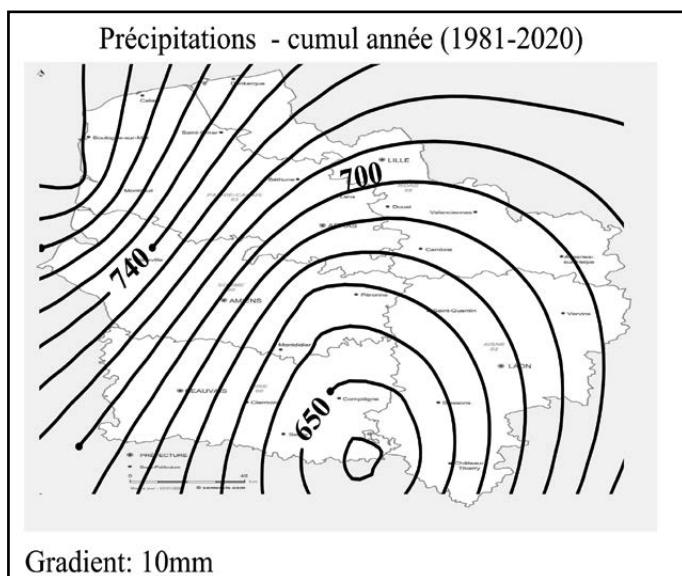


Fig. 1 : Bulletin climatique quotidien du 30 décembre 2022. Source : Météo France.
Daily climate report for December 30, 2022. Source: Météo France.

Fig. 2 : Totaux annuels de précipitations sur la période 1981-2020.
Annual rainfall amounts over the 1981-2020 period.



Sur l'ensemble de la région, les cumuls annuels varient en moyenne de 800 mm par an sur la côte occidentale (Boulogne sur Mer) à 650 mm au sud de la région (vers Senlis) (Fig. 2).

Toutefois, cet état des lieux ne représente qu'une moyenne des totaux annuels, et cette répartition connaît des variations au cours des différentes saisons, tant d'un point de vue spatial que quantitatif.

VARIATIONS SAISONNIÈRES DES PRÉCIPITATIONS

En effet, les quatre saisons montrent des profils différents de celui de la répartition des cumuls annuels. Deux saisons, l'automne et l'hiver, ont des profils comparables (Figure 3) avec le même gradient de précipitations en diminution de l'ouest vers le sud de la région, avec des maxima sur la côte ouest entre Calais et Boulogne (supérieurs à 200 mm en hiver et 240 mm en automne) et inférieurs à 170 mm sur le sud des Hauts-de-France, au sud-est de l'Oise et sud de

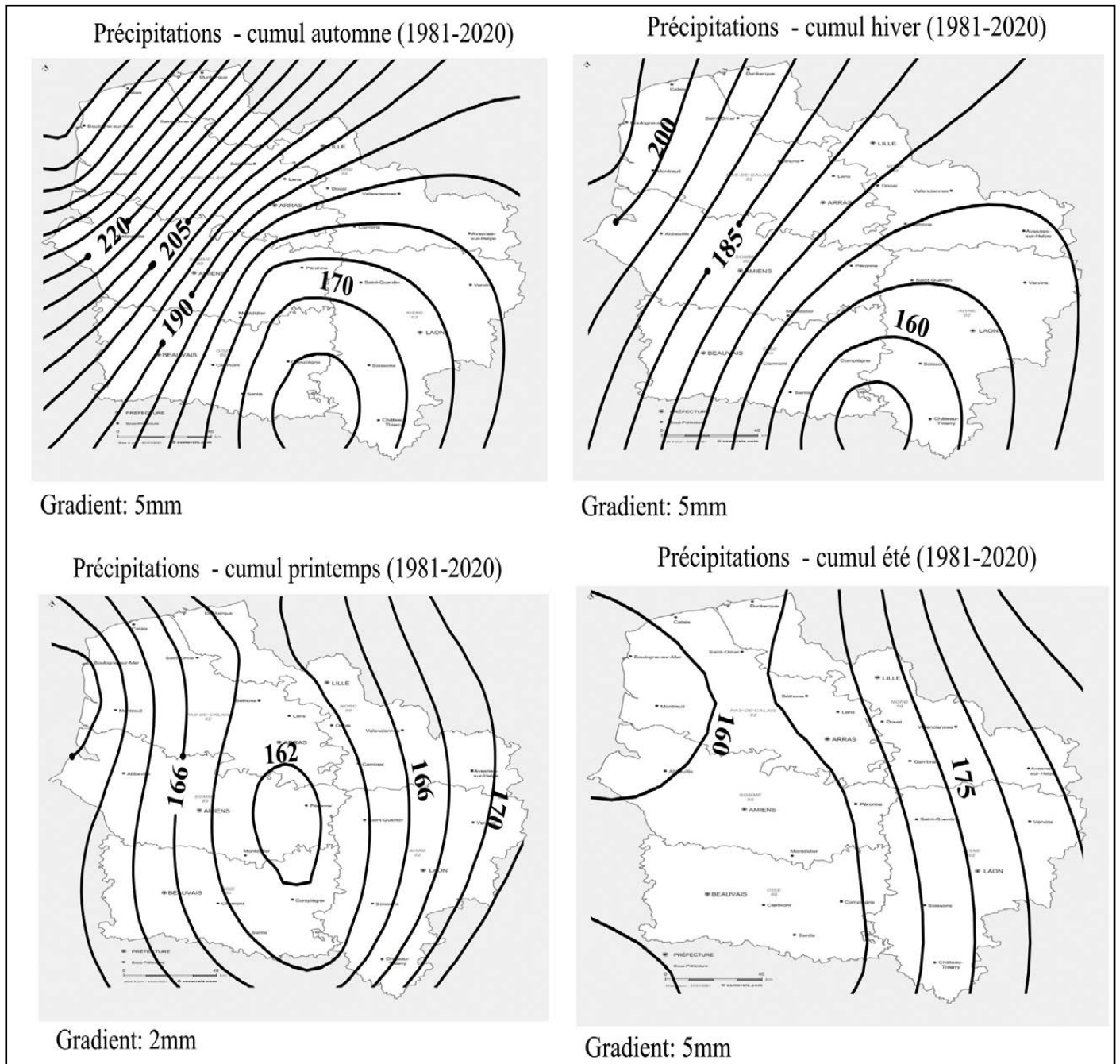


Fig. 3 : Variations saisonnières des précipitations sur la période 1981-2010.
Seasonal rainfall variations over the 1981-2010 period.

l'Aisne. L'automne apparaît comme la saison de maximum pluviométrique sur la région.

Le printemps et l'été montrent des profils différents des précédents, avec des cumuls de précipitations moindres, les maxima ne dépassant que rarement 170 mm sur les trois mois cumulés (les minima quant à eux restent identiques aux saisons d'automne et d'hiver, aux alentours de 160 mm saisonniers). La répartition spatiale est également bien différente de celle des saisons froides. Nous pouvons ainsi remarquer que lors de la saison estivale (Fig. 3), le gradient de précipitations est inversé par rapport aux saisons froides, avec une augmentation des précipitations d'ouest en est.

Ainsi, l'ouest des Hauts-de-France, à proximité de la côte, reçoit une pluviométrie moindre (moins de 160 mm sur le trimestre) que l'Aisne, à l'est, qui comptabilise des cumuls supérieurs à 180 mm, vers Avesnes-sur-Helpe et Vervins.

Le printemps quant à lui montre une assez grande homogénéité des cumuls de précipitations sur l'ensemble de la région, avec un minimum autour de 160 mm sur l'est de la Somme (vers Péronne) et des cumuls de pluies qui augmentent vers les périphéries de la région, pour atteindre environ 170 mm à l'ouest et à l'est des Hauts-de-France.

RÉGIMES DES PRÉCIPITATIONS

Cependant, ces cumuls, tant annuels que saisonniers, masquent un élément important des précipitations qui est leur répartition au cours de l'année : c'est ce que l'on appelle le régime. Bien que la région des Hauts-de-France ne représente pas une grande superficie à l'échelle synoptique, une distinction apparaît dans la répartition annuelle des précipitations entre la côte ouest, par où arrivent les perturbations tempérées apportant les pluies, et le reste de la région, qui se différencie de la bande littorale occidentale par un régime de type un peu plus continental. En effet, la bande littorale occidentale (comme précisé ici pour Boulogne-sur-Mer, Fig. 4), montre un maximum de précipitations de saison froide, centré sur le mois de novembre (maximum dépassant 90 mm sur le mois). Des mois de février à août, les cumuls de pluies varient assez peu, oscillant entre 40 et 50 mm mensuellement.

Au contraire, dès que l'on s'éloigne de cette bande littorale occidentale, vers l'est de la région les précipitations adoptent un autre régime, plus continental, comme montré ici pour Lille et Beauvais (Fig. 5). Les maxima se retrouvent alors sur la saison chaude, et particulièrement ici sur les mois d'été (juin à août pour Lille avec environ 60 mm de pluie par mois, mai à août pour Beauvais avec des totaux mensuels d'environ 55 mm), avec un second maximum (relatif celui-ci) de saison hivernale (de novembre à janvier pour Lille et Beauvais avec 65 mm mensuels environ). Les saisons intermédiaires (printemps et automne) montrent des minima relatifs, avec des cumuls mensuels autour de 40 mm pour les mois de printemps et 50 mm pour les mois d'automne. Remarquons que contrairement au littoral où les contrastes entre les mois de fort cumul de pluie et ceux de moindre cumul sont marqués (40 à 50 mm d'écart entre les mois extrêmes), les contrastes pluvieux dans l'arrière-pays des

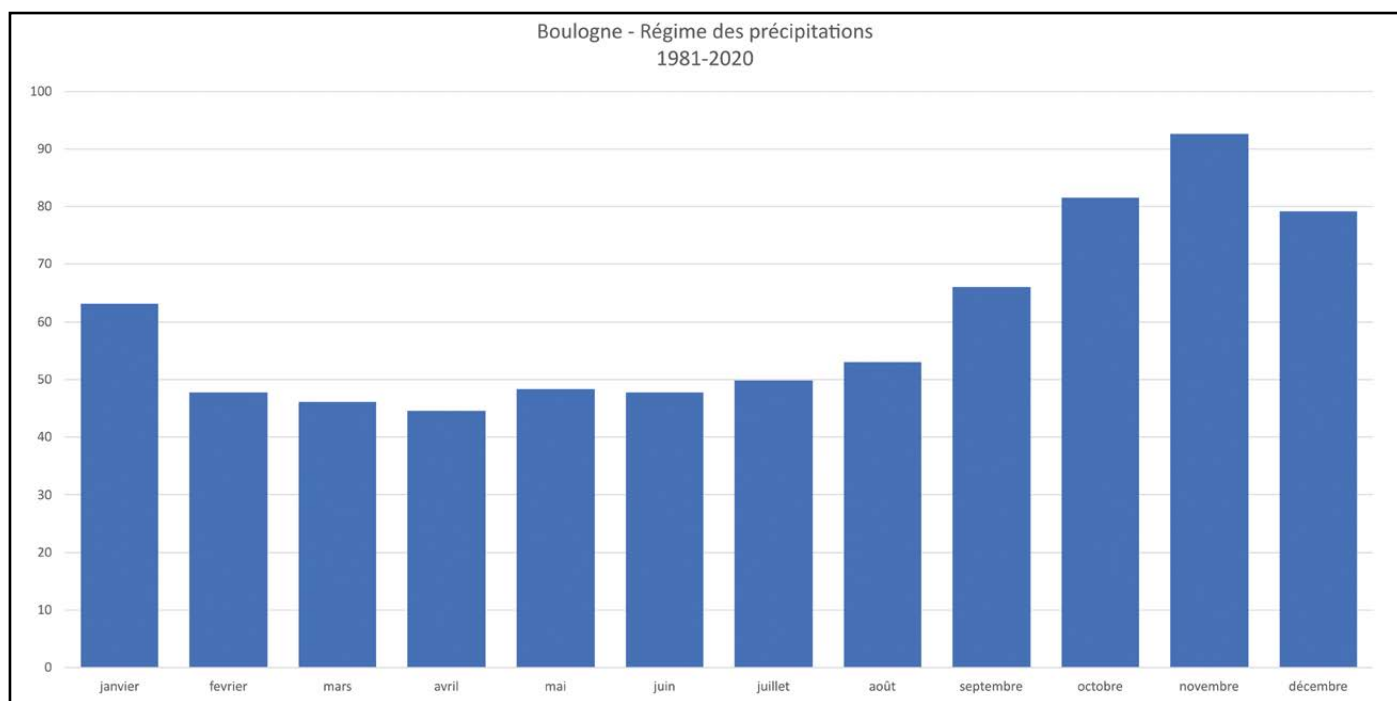


Fig. 4 : Régime des précipitations à Boulogne-sur-Mer, sur la période 1981-2020.
Rainfall regime in Boulogne-sur-Mer, over the 1981-2020 period.

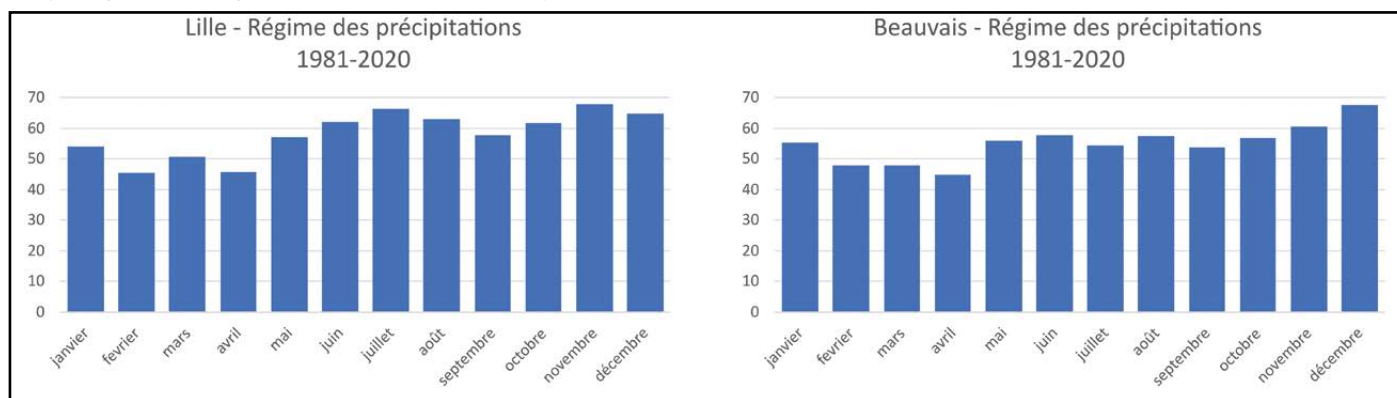


Fig. 5 : Régimes des précipitations à Lille (à gauche) et Beauvais (à droite), sur la période 1981-2020.
Rainfall regime in Lille (left) and Beauvais (right), over the 1981-2020 period.

Hauts-de-France ne sont pas importants entre les différents mois de l'année (moins de 30 mm d'écart).

Il existe donc une différenciation des régimes de pluies entre la bande littorale occidentale, soumise à un régime plutôt de type « atlantique », et le reste de la région Hauts-de-France, qui se trouve sous un régime plutôt de type « continental », bien que ces qualificatifs restent toutefois à nuancer.

EVÉNEMENTS DE FORTES PLUIES

La région connaît assez peu d'événements de précipitations extrêmes, même si elle est fréquemment le siège d'épisodes de fortes pluies (supérieures à 40 mm en 24h).

Un de ces épisodes est celui du 1^{er} au 10 octobre 2020, lors duquel des cumuls supérieurs à 100 mm sur 10 jours ont été enregistrés sur l'ouest de la région, dans la Somme et le Pas-de-Calais (Figure 6). Lorsque ce type d'événement se produit, il est le plus souvent associé à la présence d'une dépression sur la Manche, qui va participer à la création de perturbations tempérées atlantiques, entraînant leurs fronts pluvieux sur la région (Fig. 6).

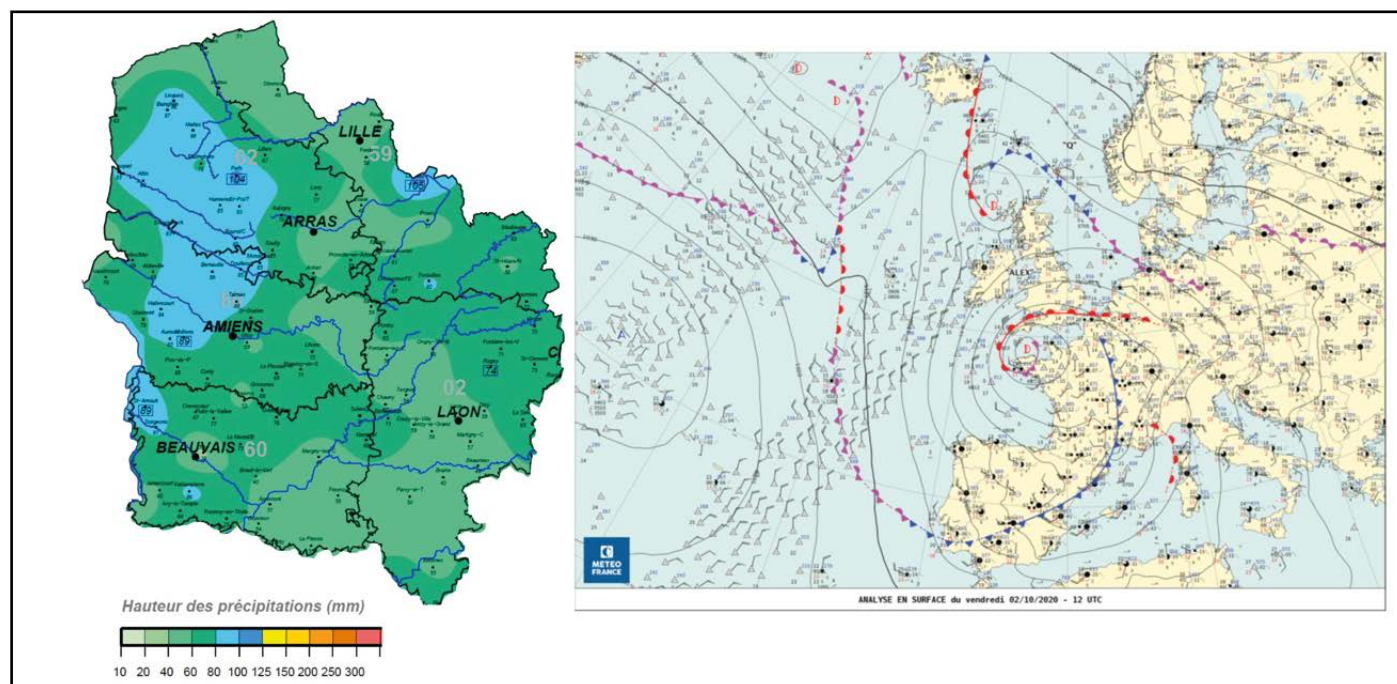


Fig.6 : A gauche : Cumuls pluviométriques (mm) de l'épisode de fortes pluies du 1^{er} au 10 octobre 2020. Source : Météo France, édité le 02.03.2021. A droite : Bulletin climatique quotidien du 2 octobre 2020. Source : Météo France.
 Left: Rainfall amounts (mm) from the heavy rain episode from October 1 to 10, 2020. Source: Météo France, published on 02.03.2021. Right: Daily climate report for October 2, 2020. Source: Météo France.

CONCLUSION

Ainsi, malgré un relief assez peu contrasté, la région Hauts-de-France montre une diversité pluviométrique typée entre une bande littorale très arrosée et un intérieur moins alimenté, même si les précipitations totales annuelles sont en moyenne autour de 700 mm. Cette répartition connaît toutefois des variations au cours des saisons, cette géographie ne se retrouvant que lors des saisons froides. La saison chaude quant à elle montre une répartition différente, avec un gradient opposé en été qui s'accroît d'ouest en est, laissant la bande littorale moins arrosée que l'intérieur. Au printemps c'est le centre de la région qui est le moins arrosé alors que les pluies augmentent vers les périphéries.

La bande littorale occidentale se distingue à nouveau lorsque l'on observe la répartition des pluies au cours de l'année : celle-ci montre un maximum d'hiver, alors qu'un second maximum de saison chaude apparaît sur le reste de la région.

Enfin de fortes précipitations (supérieures à 40 mm en 24h) balayent régulièrement la région. Elles sont dues à la présence d'une dépression généralement centrée sur la Manche, faisant se succéder rapidement les fronts des perturbations tempérées au-dessus des Hauts-de-France.

LES EAUX DE SURFACE

Pierre-Gil Salvador

Univ. Lille, Univ. Littoral Côte d'Opale, ULR 4477 - TVES - Territoires Villes Environnement & Société, F-59000 Lille, France
pierre-gil.salvador@univ-lille.fr

Éric Masson

Univ. Lille, Univ. Littoral Côte d'Opale, ULR 4477 - TVES - Territoires Villes Environnement & Société, F-59000 Lille, France
eric.masson@univ-lille.fr

L'objet de cet article est de présenter de manière très synthétique les principales caractéristiques des écoulements de surface dans la région des Hauts-de-France.

CARACTÉRISATION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

Le territoire

La région des Hauts-de-France (HdF) s'inscrit dans un vaste territoire à la géographie contrastée. Elle occupe un secteur de transition entre les plaines subsidentes du bassin belgo-néerlandais et les plateaux en surrection du Bassin parisien dont l'Artois forme la limite septentrionale. L'axe de l'Artois, à la fois topographique et structural, constitue la limite entre un bas-pays des plaines du Nord se prolongeant

en Belgique, sous 80 m d'altitude, et un haut pays qui forme une écharpe de relief culminant autour de 180-200 m, depuis le Boulonnais jusqu'au Hainaut, avec des altitudes plus faibles dans la partie centrale (seuil du Cambrésis). A l'exception du Boulonnais, dont les paysages vallonnés sont modelés dans les calcaires, les reliefs du haut pays, bas-plateau de l'Artois, vallonnements de l'Avesnois et de la Thiérache, et plus au Sud le plateau picard, sont façonnés dans la craie, parfois recouverte de lambeaux de sables tertiaires. Au nord de l'Artois, les sables et argiles tertiaires dominent, sauf au niveau du bombement crayeux formant le dôme du Mélantois (Sud de Lille). Leur succède au nord les formations quaternaires et holocènes (sable, argile, tourbe) constituant la plaine maritime. Les altitudes s'échelonnent entre -3 m NGF à Ghyvelde dans les Moères (Nord) à près de 295 m NGF à Watigny en Thiérache (Aisne).

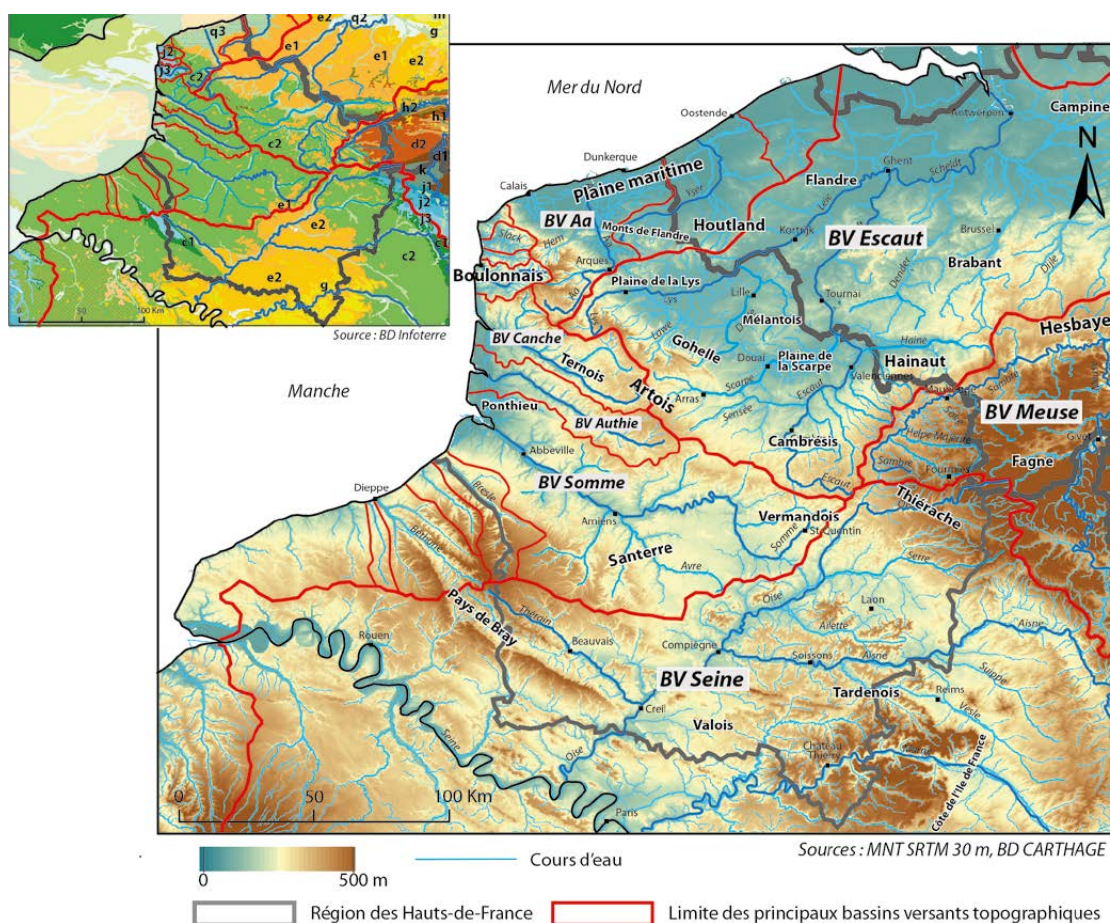


Fig. 1 – Cadre physique des Hauts-de-France
Fig. 1 – Physical setting of the Hauts de France region

Une répartition des écoulements au sein des bassins versants

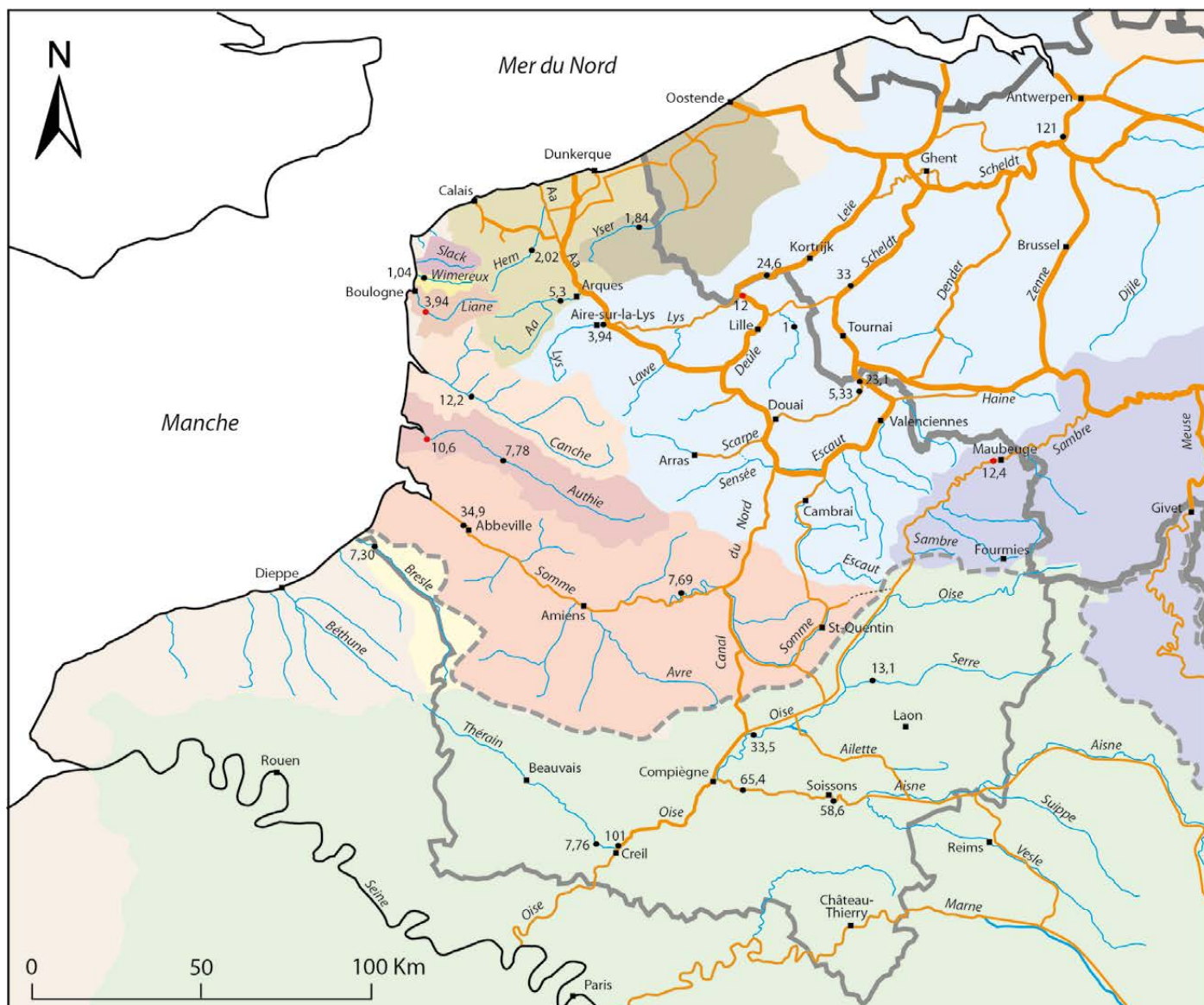
Le bassin versant est avant tout une surface, une cuvette topographique, qui collecte les précipitations, concentre le ruissellement dans le sens des pentes et transfère les écoulements de l'amont vers un exutoire à l'aval. Il est caractérisé par un système de pentes, un relief, dont la puissance et la distribution influencent fortement son fonctionnement hydrologique. Le bassin versant est délimité par une ligne de partage des eaux, limite fictive qui sépare les pentes qui alimentent deux bassins versants adjacents. Sa reconnaissance, aisée en montagne, peut poser problème dans les régions de plaine où la topographie est peu marquée et peut par ailleurs se trouver altérée par les activités humaines. En plus d'avoir une limite topographique à la surface du relief, un bassin versant a aussi une limite hydrogéologique qui correspond à la ligne de partage des eaux souterraines. Il existe en effet une surface hydrogéologique, le toit de la nappe, dont les pentes divergent et partagent l'écoulement souterrain vers des exutoires (sources, zones humides, cours d'eau) qui peuvent être différents de ceux du bassin versant topographique. Ce dernier collecte aussi ces apports hydrogéologiques qui participent aux écoulements de son réseau hydrographique. Enfin, plus localement (Haut Artois, Haut Cambrésis), des écoulements plus complexes sont aussi alimentés pour partie par des apports de type karstique (réseaux d'écoulement souterrain développés dans les calcaires ou la craie).

Le réseau hydrographique qui draine la région n'est pas homogène. Il se distribue entre des bassins versants de taille très variable, dont les principaux sont la partie amont du bassin transfrontalier de l'Escaut ouvert sur la mer du Nord (21 860 km² dont 6 532 km² en France, 20,5 % de la région HdF), le bassin de la Seine, qui draine la partie méridionale du territoire (11 631 km², 36,6 %) et le bassin de la Somme qui débouche sur la Manche (6 570 km², 20,7 %). Une série de petits fleuves côtiers draine les écoulements vers la Mer du Nord et la Manche (5 890 km², 18,5 % ; 77 km² pour le Wimereux par exemple) et en marge orientale, la Sambre appartient au bassin de la Meuse (1 183 km², 3,7 %). Les cours d'eau majeurs sont ceux de la Somme, longue de 262 km et totalement inscrite dans les HdF, l'Oise (341 km dont 15 km en Belgique), l'Aisne (350 km). La Scarpe se déroule sur 102 km, 95 km pour l'Authie, 88 km pour la Canche. Dans le même ordre de grandeur, on trouve la section française de l'Escaut (98 km pour un cours de 350 km), de la Sambre (128 km pour 208 km) et de la Lys (85 km pour un total de 195 km). Parmi les petits fleuves côtiers, le Wimereux s'écoule sur 21,6 km, la Liane sur 36 km. On voit que les limites administratives recoupent pour partie les unités de bassins versants (Fig. 2). Les Agences de l'Eau s'appuient sur ce découpage en bassins versants pour la gestion de l'eau. Les Hauts-de-France s'étendent sur le territoire de l'agence Artois-Picardie mais

aussi Seine-Normandie depuis le redécoupage administratif des régions. Leurs limites reprennent peu ou prou celles des bassins versants topographiques, sans exclusive. Ces territoires administratifs et opérationnels sont eux-mêmes subdivisés en 448 zones hydrographiques élémentaires.

L'organisation du réseau hydrographique

Si les écoulements sont tributaires des reliefs, depuis les hauteurs de l'Artois par exemple, le réseau hydrographique se distribue d'évidence selon des directions préférentielles (e.g. le parallélisme des cours de la Somme, l'Authie, et la Canche). C'est que l'apparente simplicité des reliefs masque une grande complexité de détail, due au rôle déterminant joué par la tectonique qui découpe la région en une mosaïque de blocs et commande la trame générale du relief ainsi que la disposition d'ensemble du réseau hydrographique, selon une double orientation préférentielle NO-SE et SO-NE (Sommé, 1977; Colbeaux *et al.* 1981). Les effets de cette tectonique sur la morphologie sont d'autant plus opérants que la couverture sédimentaire recouvrant le socle paléozoïque est peu épaisse et, par ailleurs, il est démontré que l'activité tectonique s'est poursuivie tardivement (néotectonique), entre la fin du Pléistocène moyen et le Pléistocène récent (site de Biache-Saint-Vaast, Colbeaux *et al.*, 1981). De ce fait, le réseau hydrographique dans sa configuration actuelle, est l'expression d'un drainage primitif qui a largement évolué jusqu'aux périodes récentes du Quaternaire (Weichsélien). Cet héritage tectonique se manifeste à travers les brusques bifurcations du tracé des cours d'eau du Boulonnais, de l'Aa, de la Deûle, de l'Escaut ou encore à travers l'inadaptation des cours d'eau au calibre de certaines vallées (plaine de la Lys et de la Scarpe par exemple; Pinchemel, 1954; Sommé, 1977). Larue (2000) montre également les effets de la néotectonique sur le cours de l'Oise lors de sa traversée de l'anticlinal du Bray, à laquelle il impute la très inégale épaisseur des remblaiements de fond de vallée et les déformations des profils longitudinaux des lits fluviaux (mouvements verticaux différentiels). Mais on doit également envisager le rôle majeur sur l'hydrographie des apports éoliens massifs des deux derniers cycles, notamment au Weichsélien, remblayant et reconfigurant la topographie des fonds de vallée (Sommé, 1977; Deschodt, 2014). Ainsi, dans le bas pays, les tracés fossiles liés à la phase du creusement maximum des cours d'eau durant le Saalien peuvent être plus ou moins distincts du tracé des vallées actuelles. Enfin, à l'échelle régionale, la tectonique détermine des dynamiques alluvionnaires différentes. La subsidence du bassin belgo-néerlandais favorise une dynamique de colmatage sédimentaire, pouvant atteindre un maximum de 25-30 m dans les vallées du bas pays français (plaine de la Lys, Deûle-Marque, Escaut; Sommé, 1977). Deschodt (2014) y distingue l'accumulation de deux cycles glaciaires (Saalien, Weichsélien) caractérisés par un emboîtement de nappes alluviales interstratifiées avec des dépôts éoliens. La surrection du Bassin parisien favorise



Sources : Agences de l'eau , HydroPortail-EauFrance, VNF

- Cours d'eau
- 1 — 2 — 3 Cours d'eau canalisé et canal (1: 250-400t = réseau Freycinet ; 2: 400-650t ; 3: 1000-1500t et plus)
- 7,76 Débit moyen interannuel en m³/s (point rouge : débit estimé)
- Limite de bassin versant topographique : ■ Escaut ■ Seine ■ Meuse ■ Divers bassins
- Région des Hauts-de-France
- Limite des territoires d'action des agences de l'eau Artois-Picardie, Seine-Normandie et Rhin-Meuse

Fig. 2 – Le réseau hydrographique
Fig. 2 – Drainage pattern

au contraire le développement de formes subaériennes, les terrasses fluviales. Ces terrasses sont le résultat d'une évolution morpho-sédimentaire cyclique à commande climatique, déterminée par l'alternance de cycles glaciaire-interglaciaires d'environ 100 000 ans, qui se conjugue avec le soulèvement lent du Bassin parisien (Artois et plateau picard pour notre région)

amorcé au Crétacé supérieur. La surrection est le moteur de l'enfoncement des lits fluviaux, qui travaillent à maintenir leur niveau de base. Contraints par ce moteur tectonique, les cours d'eau incisent et dégagent les nappes alluviales accumulées lors des phases froides et humides pléni-glaciaires, les lambeaux résiduels d'alluvions conservés sur les marges des



Fig. 3 – Géologie et densité de drainage. k. Cambrien (wackes, quartzites, schistes); d2. Dévonien moy. et sup. (calcaires, grès, schistes); j1. Jurassique inf. (calcaires, marnes, grès); j2. Jurassique moy. (calcaires, marnes); j3. Jurassique sup. (marnes, calcaires); c1. Crétacé inf. (marnes, argiles); c2. Crétacé sup. (craie, calcaires); e1. Eocène inf., Paléocène (sables, argiles); e2. Eocène moy. et sup. (argiles); q3. Holocène (dépôts fluvio-marins : sables, limons, tourbe).

Fig. 3 – Geology and drainage density. k. Cambrian (wacke, quartzite, schist); d2. Middle and Upper Devonian (limestone, sandstone, schist); j1. Middle Jurassic (limestone, marl, sandstone); j2. Upper Jurassic (marl, limestone); c1. Lower Cretaceous (marl, clay); c2. Upper Cretaceous (chalk, limestone); e1. Eocene-Ypresian (sand, clay); e2. Eocene-Lutetian to Priabonian (clay); Holocene sand, silt, peat).

vallées formant les terrasses étagées. Au nord, de petits systèmes de terrasses mis en place essentiellement durant le Pléistocène moyen sont localisés principalement sur la bordure crayeuse de l'Artois (Aa, Lys, Lawe, Clarence), d'autres plus anciens sont observés sur les interfluvies du bas pays, sans relation directe avec les écoulements actuels (Sommé, 1977). Au sud de l'Artois, la Somme offre l'exemple majeur d'un système de dix nappes alluviales étagées entre 5-6 m et 55 m d'altitude, dont la mise en place a débuté il y a environ un million d'années (e.g. Antoine, 2019).

Une autre caractéristique notable du réseau hydrographique réside dans l'existence de contrastes de densité des drains, le réseau apparaissant plus développé dans certaines parties du territoire que d'autres. C'est le degré de perméabilité du sous-sol qui va conditionner en surface la densité du réseau hydrographique. Le substrat crayeux, constitutif de l'Artois et du plateau picard, est filtrant et limite le ruissellement, justifiant d'une faible densité de drainage superficiel (Somme, Canche, Authie...)(Fig. 3). Les secteurs où affleurent des formations argilo-sableuse relativement imperméables, comme la plaine maritime, les Bas-Champs picards, la plaine de la Lys aval, la Scarpe, le cours moyen de l'Oise, le cours aval de l'Aisne, favorisent un chevelu hydrographique bien plus dense. Cette densité est par ailleurs fortement augmentée si on prend également en compte le réseau artificiel des canaux (plaine maritime, Lys, Scarpe). Un autre secteur de forte densité de drainage se retrouve dans l'Avesnois et la Thiérache, au contact des formations imperméables de l'Ardenne. Pour exemple, le cours de la Sambre marque le contact entre à l'est le socle ardennais favorable au ruissellement (schistes) et à l'ouest des formations sableuses et crayeuses plus perméables. La presque totalité des affluents de la Sambre (Rivière, Helpe Majeure et Mineure, Tarsies, Solre) proviennent ainsi de la rive droite ardennaise.

L'écoulement est tributaire des pentes et le cours d'eau ajuste une pente, un profil en long, qui reflète un équilibre entre sa capacité de transport au regard du volume et du calibre de la charge sédimentaire qu'il déplace (Bravard et Petit, 1997). Ce profil est concave sur les rivières pérennes, les pentes étant plus fortes près des sources, alors que l'augmentation du débit vers l'aval permet un transfert de la charge sur des pentes plus faibles. Le profil en long, mesuré sur le fond du lit du cours d'eau, est dans la pratique influencé par les obstacles lithologiques (seuils) et anthropiques (radiers de moulins, barrages, etc) qui forment autant de niveaux de base locaux qui peuvent segmenter la pente de la rivière. Les apports solides d'affluents peuvent également amener à des réajustements intermédiaires pour permettre d'évacuer une charge sédimentaire entrant dans le système fluvial. Eu égard à la faible amplitude des reliefs, les cours d'eau de la région s'écoulent sur de faibles pentes, avec pour le Nord de la France, une rupture assez systématique des profils pour les cours d'eau nés sur les contreforts de l'Artois,

accusant de plus fortes pentes à l'amont et sans transition de très faibles pentes à l'entrée dans les plaines du bas pays. La pente moyenne de l'Aa est de 2,3 ‰ de sa source (122 m d'altitude) à Arques où l'altitude n'est plus que de 5 m pour rejoindre la mer à 30 km de distance (pente de 0,0016 ‰). La haute vallée de la Lys a une pente de l'ordre de 4 ‰, elle n'est déjà plus que de 1 ‰ dans le secteur d'Aire (AZI, 2001). Les affluents, au tracé plus court ou pouvant drainer des secteurs plus accidentés présentent régulièrement des pentes plus élevées. La pente moyenne de la Sambre n'est ainsi que de 0,2 ‰ alors qu'elle est de 2,15 ‰ pour l'Helpe Mineure et de 4,5 ‰ pour la Solre. Les faibles pentes peuvent se traduire en plan par le développement d'un cours sinueux à méandres comme c'est le cas pour la Sambre et la Canche par exemple. Pour comparaison avec le Rhône, dans un contexte plus montagnard, la pente moyenne du Rhône alpestre est de 9 ‰ et elle est de l'ordre de 1 ‰ sur le Haut-Rhône à l'amont de Lyon (bassin versant de 20 300 km²).

UNE ANTHROPISATION FORTE ET PRÉCOCE

La forte artificialisation du réseau hydrographique est un trait marquant du Nord de la France. Dans le bas pays, en grande partie le bassin de l'Escaut, Sommé (1977) constate qu'en raison de l'indigence des écoulements, le réseau hydrographique holocène s'est difficilement individualisé. Il en conclut que les rivières n'apparaissent véritablement dans l'histoire qu'avec les interventions humaines et que le réseau hydrographique du bas pays est essentiellement artificiel. Il apparaît aujourd'hui que nombre de cours d'eau sont canalisés, ou doublés par des canaux (canal latéral), avec des interconnexions entre bassins, engendrant une hydrologie influencée par l'homme. Derville (1990) explique que l'indigence des routes médiévales a contribué à l'aménagement des rivières du Nord dès le XII^e siècle, Lys, Scarpe, Escaut et leurs affluents, afin d'exporter massivement les productions du haut pays vers le bas pays et l'Europe du Nord (essentiellement le blé). Plus tard, la reconfiguration de la frontière lors du traité d'Utrecht en 1713 entraîna la création d'une série de canaux parallèles à cette nouvelle frontière afin de détourner vers Dunkerque le commerce des Pays-Bas français. La royauté conçut ainsi un projet de jonction, en partie réalisé, entre Condé et Dunkerque, recoupant à angle droit les voies d'eau conduisant traditionnellement à Bruges et Anvers (Derville, 1990). On peut également évoquer l'exemple de la capture anthropique de la Scarpe, ayant eu une incidence majeure sur l'hydrographie de ce bassin versant. Son tracé actuel est le résultat du creusement, autour du millénaire, d'un petit canal à travers le seuil de Vitry-en-Artois qui dévia les eaux du cours amont de la Sensée vers la ville de Douai et le cours supérieur de la Scarpe (Louis, 2009). Le bassin versant de la Scarpe actuelle est ainsi passé de 770 km² à plus de 1 320 km² (+ 71 %) (Deschodt, 2014). Dans la plaine maritime, le delta de l'Aa, c'est la poldérisation du

littoral à partir du XI^e siècle qui amena le développement d'un maillage complexe et dense de digues, écluses, watergangs, becques et canaux, contribuant au drainage des terres et à leur assèchement. L'Aa est canalisé dès 1114 en reliant Saint-Omer à Gravelines (IIW, 2023). Les plaines humides comme celle de la Scarpe ont également fait l'objet d'opérations de drainage dès les XII-XIII^e siècle. (Deudon, 2018). D'importants réseaux de canaux ont été creusés de part et d'autre de la rivière jusqu'au XIX^e siècle. (courant de la Traitore, le Décours). A partir du XVIII^e siècle se sont multipliées les campagnes d'assèchement des zones humides (les grands dessèchements) également propices aux aménagements hydrauliques (canaux de drainage, aqueducs-siphon, ponts, vannages...). Des réaménagements importants ont lieu au XIX^e siècle pour calibrer les voies navigables au gabarit Freycinet (l'Oise à partir de 1835, la Sambre française entre 1832 et 1836 par exemple). L'activité minière a également contribué à augmenter le maillage des canaux pour le transport du charbon (SRAVE, 2012). C'est d'ailleurs pour relier le Nord, ses ressources houillères et agricoles, avec le bassin de la Seine que la liaison entre l'Oise et l'Escaut a été inaugurée en 1810 par Napoléon, suite à la construction du tunnel de Riqueval, dernier ouvrage stratégique permettant le franchissement du seuil du Cambrésis par voie navigable. À l'échelle locale du bassin minier du Nord, l'extraction des eaux d'exhaure induites par l'exploitation du charbon a contraint les Houillères à réorganiser le réseau de surface (nouveaux fossés, reprofilages, endiguements) et à installer de nombreuses stations de relevage des eaux. Aujourd'hui, VNF gère dans le Nord-Pas de Calais un réseau hydraulique de 681 km de voies d'eau dont 236 km de voies à grand gabarit (SRAVE, 2012).

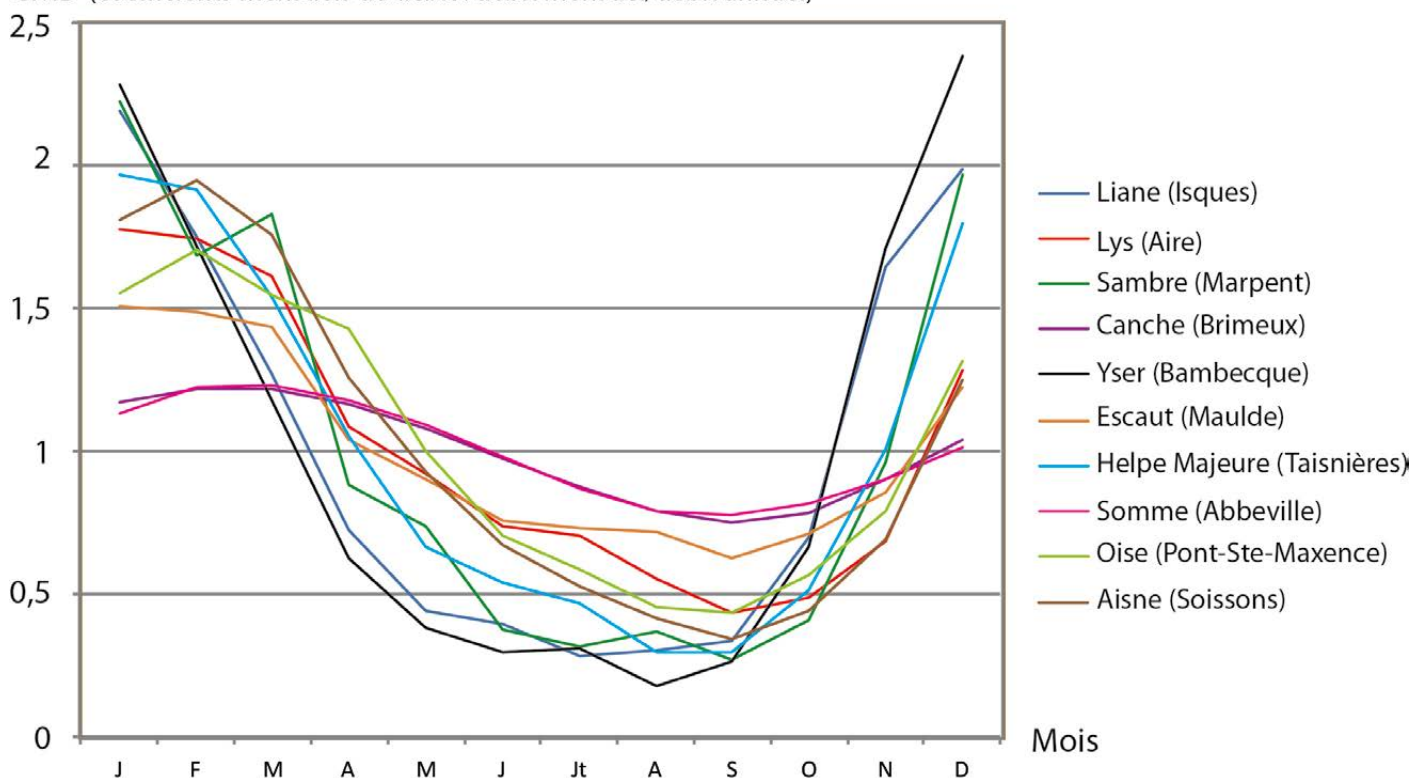
L'ABONDANCE ET LE RÉGIME DES COURS D'EAU

Des précipitations moyennes (650-800 mm, Norrant, 2023), dont les 2/3 sont prélevées par les sols et la végétation, et un sous-sol souvent crayeux favorisant l'infiltration, font que les écoulements de surface sont faibles, souvent qualifiés d'indigents (Fig. 2). Dacharry (1995) constatait à l'époque une certaine méconnaissance de l'hydrologie régionale, inféodée à ces faibles débits impropres aux aménagements hydro-électriques, à laquelle s'ajoutait la difficulté de la mesure, les cours d'eau étant souvent interconnectés avec les canaux qui en influencent les débits. Pour prendre l'exemple de la Lys à l'aval d'Aire-sur-la-Lys, les débits peuvent être amplifiés par des excédents issus du canal à grand gabarit, des rejets d'eaux (station d'épuration d'Estaires), des réalimentations artificielles par des eaux souterraines (Verchin) lors des étiages (SOGREAH, 1998). A l'inverse, des prélèvements pour les besoins de l'industrie et l'alimentation en eau potable, pour l'approvisionnement du canal à grand gabarit, les pompes agricoles, vont réduire les écoulements. Autre exemple, le territoire des wateringues, entre Calais et Dunkerque, rejette en moyenne à la mer 14 m³/s

d'eaux gravitaires ou pompées, alors que le débit de l'Aa à Arques (amont du delta) n'est que de 4,9 m³/s (IIW, 2023). Le "rendement" des bassins versants peut se mesurer par le débit spécifique (débit brut/surface du bassin versant en l/s/km²) qui permet la comparaison en faisant abstraction de la taille des organismes fluviaux. Les données suivantes sont extraites des fiches des stations hydrométriques mises à disposition du public sur le site de l'HydroPortail (<https://hydro.eaufrance.fr/>). La Somme est le fleuve qui écoule le plus d'eau en région, environ 35 m³/s pour un bassin versant de 5 640 km² à la station d'Abbeville, ce qui équivaut à un débit spécifique de 6,2 l/s/km². Ce sont des valeurs comparables que l'on va retrouver pour la majorité des cours d'eau, 5,6 l/s/km² pour l'Escaut et 6,7 l/s/km² pour la Lys à la frontière, 7 l/s/km² pour l'Oise à Creil, 7,9 l/s/km² pour l'Aisne à Soissons. Le bassin versant qui offre le meilleur rendement est celui de la Liane avec 18,4 l/s/km² : elle draine une partie de la boutonnière du Boulonnais, dans des formations relativement imperméables hors du domaine de la craie, et par ailleurs son haut bassin reçoit des précipitations abondantes (plus de 1 000 mm). La Sambre (12,2 l/s/km²) et ses affluents (13,5 l/s/km² pour l'Helpe Mineure) présentent également des débits plus élevés car s'écoulant sur des terrains favorables au ruissellement. Pour comparaison, le débit spécifique du Rhône à Lyon, qui caractérise son bassin versant montagnard, est de 28,5 l/s/km² (580 m³.s⁻¹/20 300 km²) et celui de l'Arve à Bonneville, un affluent du Rhône en rive gauche, atteint 44,6 l/s/km².

Le régime d'un cours d'eau décrit la variation des écoulements tout au long de l'année, on le représente généralement sur la base de l'année calendaire. Il reflète les conditions du climat, auxquels s'ajoutent les paramètres locaux du bassin versant (géologie, relief, végétation, aménagements...). Il s'inscrit dans la durée et voit fluctuer annuellement à peu près dans les mêmes temporalités des périodes de hautes et de basses eaux. Les cours d'eau régionaux relèvent d'un régime sous influence océanique avec une alimentation par les pluies et un contrôle thermique saisonnier. Ce type de régime dit « pluvio-thermal » est caractérisé par des hautes eaux d'hiver et des basses eaux d'été (Fig. 4). Cette structure d'ensemble masque une diversité de détail que l'on peut schématiquement réduire à deux types de dynamique. Les cours d'eau régulés par les échanges avec la nappe de la craie montrent une bonne stabilité des débits. Les écarts saisonniers sont faibles, le rapport du débit mensuel le plus élevé au débit le moins élevé est de l'ordre de 1,3 pour la Somme et la Canche, 1,5 pour l'Authie, entre 2 et 2,5 pour la Lys amont, l'Escaut et l'Oise moins exclusivement inféodés au domaine de la craie. Les cours d'eau drainant des substrats moins perméables réagissent plus directement aux précipitations et au ruissellement. L'irrégularité des écoulements caractérise ce type de régime, le rapport entre les mois extrêmes étant de 4,2 pour l'Helpe Majeure, de 7 à 7,67 pour la Sambre, l'Yser et la Liane. Cette irrégularité s'observe également pour les périodes et les hauteurs des hautes et basses eaux (Dacharry, 1995).

CMD (coefficients mensuels de débit : débit mensuel/débit annuel)



Source : HydroPortail (Eaufrance). Les débits moyens mensuels sont calculés à partir des débits les plus valides sur une période de 10 à 41 ans selon les stations.

Fig. 4 – Régime de quelques cours d'eau représentatifs
Fig. 4 – River flow of a few representative rivers in the region

La faiblesse des écoulements n'écarte pas pour autant l'occurrence des phénomènes extrêmes que sont les crues et les étiages. Les eaux s'épandent dans le lit majeur des hydrologues, ou lit d'inondation que Derruau (1974) définit comme "la zone que le fleuve inonde et qu'il peut recouvrir des alluvions modernes des cartes géologiques". Les crues lentes de plaine dominent sur le territoire, avec une montée progressive des eaux, sans exclusive d'autres dynamiques, eu égard à la diversité des contextes, des petits bassins versants homogènes à la complexité des grands bassins versants. Dans les pays de la craie, des précipitations importantes en volume peuvent engendrer des inondations par remontée de nappe dans les parties basses du lit majeur (Somme, Canche, Authie). Ces inondations peuvent s'étendre sur des surfaces considérables, plusieurs milliers d'hectares, divers éléments aggravants comme la présence de réseaux de drainage, l'obstacle des moulins ou encore l'urbanisation facilitent l'envahissement par les eaux. Le sous-calibrage des cours d'eau holocènes, incapables d'évacuer les volumes en jeu, est aussi un facteur aggravant évoqué par exemple sur la Canche et la Sambre (AZI, 1997, 2001). Les durées de submersion peuvent être importantes, plus de 3 mois sur la Canche en 1995, elles dépassent 15 jours pour la crue centennale de l'Authie (AZI, 2006). A l'opposé, la Liane connaît des crues brèves et brutales, en raison de

l'occurrence de fortes précipitations sur des terrains faiblement perméables et aux pentes plus fortes qui favorisent la concentration du ruissellement des eaux. Les crues ne dépassent que rarement 24 h et peuvent se multiplier sur la saison (AZI, 1996). On retrouve cette combinaison de phénomènes sur la Lys, associant fortes précipitations et ruissellement qui engendrent des crues d'une durée de 2 à 4 jours. Sur la Sambre, c'est la crue des affluents de rive gauche (les deux Helves) qui engorgent son fond de vallée. Les inondations sont plus longues, entre 10 et 15 jours (AZI, 2001). L'Oise est dominée par des inondations lentes par débordement provoquées par les précipitations hivernales s'abattant sur un sol souvent saturé en eau (Hydratec, 2013). Pour les étiages estivaux, Dacharry (1995) évoque des débits très faibles, moins de 1 l/s/km², sur les petits cours d'eau sans recharge souterraine de l'Avesnois, du Boulonnais et les plaines du bas pays, qui plus est sollicités par les activités humaines. Le calcul du Débit Caractéristique d'Etiage (DCE), correspondant au débit égalé ou non dépassé 10 jours par an, donne des valeurs de 0,1 l/s/km² sur l'Yser à Bambecque, 0,63 l/s/km² sur la Sambre à Marpent et 1,99 l/s/km² sur la Lys à Aire-sur-la-Lys. A l'opposé les cours d'eau qui restent soutenus l'été par la nappe de la craie, maintiennent des débits plus importants : 4,9 l/s/km² sur l'Authie à Dompierre et 7,3 l/s/km² sur la Canche à Brimeux.

LE CADRE DE VIE EST UN BIEN COMMUN

Avec le CAUE du Nord, participez ensemble
à construire vos lieux de vie.

Je suis
membre d'une
association,
je développe des initiatives
grâce aux ressources
locales.

Je suis
technicienne,
je découvre des
expériences ancrées
dans leur contexte.

Je suis
enseignante,
je développe une
pédagogie active en
relation avec le
territoire.

Je suis
habitant,
je conçois un projet
d'habitat qui s'intègre
dans mon cadre de
vie.

Je suis
élu,
je réussis un projet
adapté à mon
territoire.

Je suis
enfant,
je comprends
l'évolution de mon
environnement.

Je suis
professionnel,
j'exerce mon activité en
connaissance des
enjeux locaux.



ACCOMPAGNER LES PROJETS
CONTRIBUER AU DÉBAT PUBLIC
DIFFUSER LES EXPÉRIENCES
FACILITER LES COOPÉRATIONS

POUR UNE ÉCOLE PERMANENTE DU CADRE DE VIE

ÉVOLUTION DES ZONES HUMIDES DE LA VALLÉE DE L'YSER, L'EXEMPLE D'HERZEELE

Christophe Delbecque

Président de l'association Yser Houck
jonde.tanis@gmail.com

Le bassin versant de l'Yser est, cette année encore, classé en alerte renforcée sécheresse¹ tant le débit de ce petit fleuve côtier est faible. En juillet 2023, des situations de rupture d'écoulement sont constatées sur la station hydrométrique de Bambecque, juste en aval de la commune d'Herzelee. Les faibles précipitations de ces derniers mois peuvent éclairer, en partie, cette situation mais vouloir expliquer ce phénomène par le simple fait du changement climatique est trop restrictif, fataliste. La nappe superficielle, qui soutenait auparavant les étiages, n'est aujourd'hui plus capable d'alimenter ce petit cours d'eau. Comment en sommes-nous, en Flandre, territoire où l'eau a façonné nos paysages, arrivés à une situation aussi critique ?

Herzelee est une commune de l'Houtland² de 1 717 ha située au cœur de la vallée de l'Yser. En analysant la carte IGN, nous pouvons y lire que l'altitude y est comprise entre 24 m au sud et 3 m au nord. La commune est délimitée par différents cours d'eau : au nord l'Yser, à l'ouest la Sale Becque et à l'est le ruisseau d'Houtkerque, tous deux affluents de rive droite de l'Yser. La commune est également drainée par la becque de Braems, la Petite becque et le ruisseau d'Herzelee³.

1. Arrêté préfectoral réglementant les usages de l'eau en vue de la préservation de la ressource en eau dans le département du Nord du 28 juillet 2023.

2. L'Houtland littéralement le Pays du bois correspond en France à la Flandre Intérieure comprise entre la Colme et la Lys.

3. Christophe Delbecque, 2023 ; Richesses et fragilités des surfaces herbagères d'Herzelee, bulletin du comité Flamand de France n° 129.

La carte géologique, quant à elle, nous montre 3 affleurements différents à Herzelee. Au sud dans le secteur du Hameau du Briel, sur les points les plus hauts compris entre 17 et 24 m, nous retrouvons l'argile Yprésienne, lourde, compacte et imperméable. Sur la majeure partie de la commune, nous retrouvons ensuite les limons, recouvrant l'argile Yprésienne, terres riches et fertiles, facilement valorisables par l'agriculture. Enfin dans les lits majeurs des différentes rivières, nous trouvons des dépôts d'alluvions récents. En comparant la carte géologique avec les cartes anciennes présentant l'occupation du sol de la commune, nous pouvons voir une assez bonne corrélation, témoignant que nos ancêtres se sont adaptés à leur environnement. En effet, la carte d'état-major du XIX^e siècle nous montre la présence de bois au sud de la commune. Ces bois se trouvaient là où les argiles sont affleurantes et là où la mise en culture est la plus difficile. Ailleurs dans la commune, l'occupation du sol est composée d'une mosaïque comprenant des surfaces labourables et des surfaces en herbe. Nous pouvons estimer que la surface en herbe, à cette époque, est comprise entre 25 et 30 %, ce qui était typique du paysage semi-bocager de l'Houtland.

Le cadastre de 1806 de la commune nous offre des précisions supplémentaires. Tout d'abord, nous pouvons remarquer que l'habitat y est très dispersé car l'accès à l'eau est très aisé sur ce territoire. Les puits ne sont traditionnellement pas nombreux en Flandre où l'on a longtemps utilisé l'eau de



Fig. 1. - Cadastre de 1806 où il est possible de distinguer les champs en orange, les pâtures en vert hachuré et les prairies de fauche en vert clair.
Fig. 1. - 1806 land register showing fields in orange, pastures in hatched green and hay meadows in light green.

surface avant de voir se développer l'usage des pompes à bras puisant l'eau dans une citerne sous la maison. A Herzele on compte encore un puit ayant servi à une ancienne brasserie et aujourd'hui restauré. Nous pouvons également observer que le géomètre en chef Robin et l'arpenteur Delettré ont pris la peine de distinguer les pâtures en vert hachuré où vont paître les animaux et les prés où l'on fait le foin. Nous constatons que les prés de fauche se trouvent quasi exclusivement sur les alluvions modernes des lits majeurs des becques. Ces terrains étaient trop humides une bonne partie de l'année pour que les animaux puissent y valoriser l'herbe directement en la mangeant sur place.

Cette surface en prairie est restée relativement stable jusqu'au milieu du XX^e siècle. Puis comme partout ailleurs en Flandre, le déclin de l'élevage bovin s'est fait ressentir. A Herzele, en 2013, la commune ne comptait plus que 205 hectares de surface en herbe (12 % de la surface communale). La moitié des prairies avait donc été retournée en un demi-siècle. C'est sur ces prés de fauche humide que l'on rencontre aujourd'hui les paysages de la commune les mieux préservés. Cette richesse paysagère fait que la vallée de l'Yser et ses affluents de Wylder à la frontière belge ont été classés en ZNIEFF de type 2. Deux sites sont gérés par le Conservatoire des sites naturels des Hauts-de-France⁴, dont le site du Vallon de la petite becque classé Réserve Naturelle Régionale depuis 2010. Ces prairies humides ont la particularité de se développer sur des sol paratourbeux⁵. L'humidité quasi constante de ce terrain fait que la décomposition de la matière organique se fait très difficilement engendrant l'apparition de tourbe. Cette prairie abrite une flore toute particulière que l'on ne retrouve que sur de très rares endroits en Flandre.

Diviser par deux la surface en herbe en l'espace d'un demi-siècle n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement hydrographique local. Le bassin versant de l'Yser est désormais spécialisé dans la culture de légumes et de pommes de terre qui favorisent le ruissellement et l'érosion des sols.

En effet, lors des précipitations les prairies facilitent l'infiltration des pluies dans la couche limoneuse et limitent ainsi le ruissellement superficiel. Elles jouent un rôle d'éponge. Lorsque nous parlons de prairie, il faut également ajouter les éléments associés à cette culture que sont les haies et les mares qui ont également un effet bénéfique sur le tamponnement et la recharge de la nappe d'eau superficielle. A Herzele, nous avons 44,2 km de haies bocagères comptabilisées, soit 25,7 m/hectare, ce qui la classe parmi les communes où la haie est encore relativement bien présente par rapport aux autres

4. Le Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France est une association à but non lucratif, reconnue d'intérêt général. Ses objectifs sont la protection et la valorisation du patrimoine naturel. Il intervient sur près de 500 sites naturels. Le Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France y préserve la faune, la flore, les habitats naturels, les objets géologiques et les paysages.

5. Pour être une tourbe, le dépôt doit renfermer au minimum 20 % de matière organique s'il est dépourvu d'argile, 30 % s'il est fortement argileux (M. Jamagne, 1967), proportions souvent dépassées; des teneurs inférieures entre 12,5 et 20 % caractérisent des sols paratourbeux.

communes de Flandre mais c'est également deux fois moins qu'il y a un siècle. Si l'on voulait retrouver la densité de haie qu'Herzele connaissait il y a un siècle il faudrait concentrer les plantations de l'ensemble de l'opération régionale *Plantons le décor*[®] durant une année sur le territoire d'Herzele (soit la plantation de 100 000 à 120 000 arbustes). C'est pourtant une solution très efficace de lutte contre le ruissellement mais trop peu mise en œuvre.

En ce qui concerne les mares, la majorité d'entre elles servait autrefois à l'abreuvement du bétail. Aujourd'hui beaucoup ont perdu cet usage mais elles jouent toujours le rôle de petites zones de stockage d'eau et participent activement à la lutte contre le ruissellement et les inondations. A Herzele, lors du dernier recensement des mares en 2006-2007, elles étaient encore 78 et sont aujourd'hui référencées dans le PLUI. Cela représente une capacité de stockage approximative de 40 000 m³.

A Herzele, le ruissellement semble être la cause d'une érosion quasi nulle car la faiblesse des pentes n'a pas favorisé la formation de ravines profondes. Cependant on observe que l'érosion est suivie d'un transport par saut de puce (saltation) qui déplace les sédiments sur de faibles distances. Le bassin versant de l'Yser est, à ce titre, classé parmi les territoires où l'intensité de l'aléa d'érosion des sols annuel moyen est fort. A titre d'exemple, les fossés communaux, gérés par la Communauté de Communes des Hauts de Flandre, doivent de ce fait être curés, selon les secteurs, tous les 3 à 7 ans en moyenne tant l'érosion diffuse y est importante. Des pratiques culturales sont inappropriées, telles que le labour ou les buttes de pomme de terre dans le sens de la pente, ce qui accentue l'érosion, et facilite notamment le départ de la terre arable, surtout par temps d'orage. Par ailleurs, le lit des rivières dans le secteur est aujourd'hui totalement colmaté par des sédiments, si bien que la vie aquatique y est rendue difficile. L'alternance de zones de dépôts et d'érosion n'existe plus sur le linéaire du lit mineur, au profit d'un nappage généralisé asphyxiant la vie aquatique. Récemment une opération de recharge granulométrique a été réalisée sur la Sale becque afin de diversifier les écoulements et avoir une meilleure oxygénation de l'eau. Ces opérations bénéfiques, à court terme pour la biodiversité, ne sont cependant pas durables car elles ne s'attachent pas à résoudre le problème à la source qui est de limiter l'érosion des sols.

Enfin, le niveau d'humidité de nombreuses prairies de la vallée de l'Yser a fortement diminué suite à l'assèchement progressif des zones humides sur le secteur. Cet assèchement a commencé lors de la mise en place quasi généralisée du drainage à partir du milieu du XIX^e siècle. Ce phénomène s'est renforcé sur le secteur dans les années 1960 suite au redressement de l'Yser. Afin de limiter les inondations, la doctrine de l'époque était d'évacuer le plus rapidement les

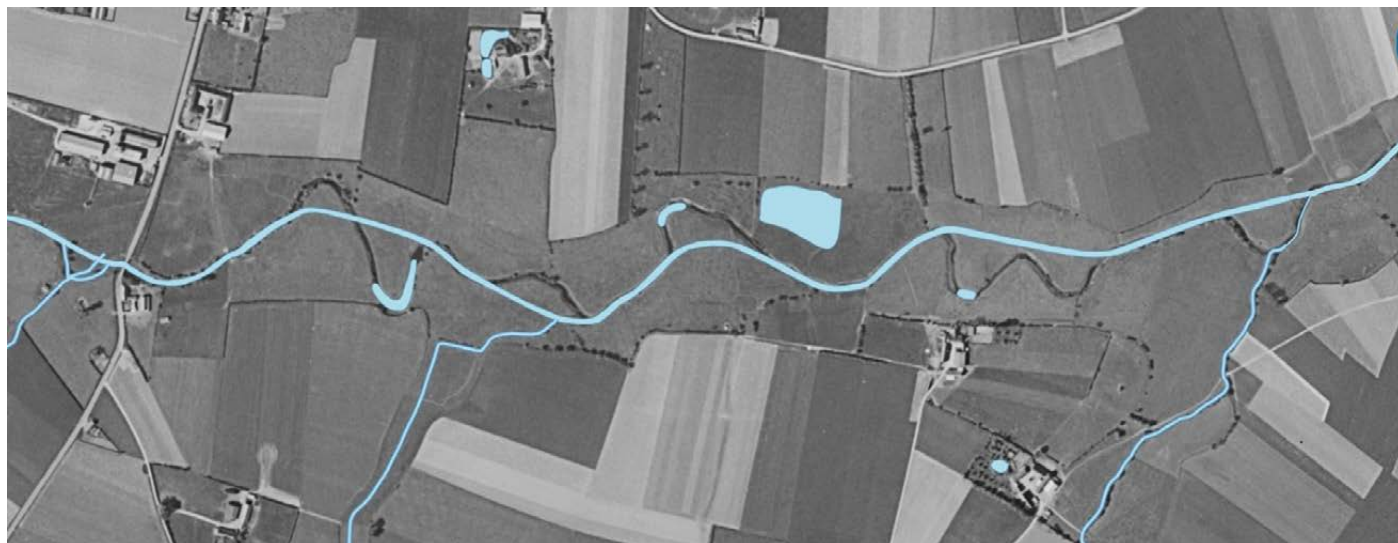


Fig. 2. - Photographie aérienne de 1956 (Nord d'Herzelee) où l'on voit les méandres de l'Yser – En bleu le tracé actuel du fleuve.
 Fig. 2. – Aerial photograph taken in 1956 (north of Herzelee) showing the meandering Yser - the river's current course is shown in blue.

eaux à la mer⁶. Pour cela, les ingénieurs de l'époque ont réalisé un plan de rectification du cours aval de l'Yser entre la confluence avec la Peene Becque et la frontière belge. Cette opération a consisté à réaliser un nouveau chenal pour l'Yser en ayant un tracé beaucoup plus rectiligne. Sur Herzelee, 24 méandres ont donc été supprimés ou déconnectés de l'Yser afin que l'eau aille le plus vite possible à l'aval. Lors de cette opération, l'Yser a perdu un linéaire de 1 270 m entre Herzelee et Bambecque⁷. Cette rectification s'est accompagnée d'un

approfondissement du lit du cours d'eau, permettant, entre autres, d'avoir les drains agricoles plus vite au-dessus de la ligne d'eau en cas de forte crue et donc d'assécher plus vite les terrains. Cette opération, réalisée entre 1959 et 1965, a donc eu pour conséquence de rabattre la nappe affleurante et d'avoir des prairies moins humides que par le passé. Des études ont été réalisées pour reconnecter certains méandres à l'Yser mais ce type d'aménagement est long et très coûteux à mettre en œuvre.

6. Aujourd'hui cette manière de penser est totalement dépassée et au contraire les aménageurs cherchent à retenir l'eau en amont afin d'éviter l'engorgement des réseaux et étaler la crue dans le temps tout en ayant un pic de crue moins haut.

7. L'ancien lit de l'Yser servait de limite entre les communes d'Herzelee et Bambecque. En rectifiant l'Yser, les limites communales n'ont pas évolué si bien que sur le cadastre on retrouve des incongruités telles que des portions de quelques centaines de mètres carrés d'Herzelee au Nord de l'Yser et vice versa pour Bambecque.

Nous avons donc pu voir tout au long de cet article que l'aménagement du territoire réalisé au cours du XX^e siècle a fortement perturbé le fonctionnement des zones humides. Ces aménagements ont tendance systématiquement à réduire les capacités locales de rétention de l'eau au profit d'une évacuation rapide de l'excédent (ruissellement). De ce fait, par défaut d'infiltration suffisante, la nappe superficielle du



Fig. 3. - L'Yser est un ancien méandre sur la gauche de la photo (printemps 2023)
 Fig. 3. - The Yser is an old meander on the left of the photo (spring 2023).



Fig. 4. - Surenretien d'une becque à l'aval de l'agglomération d'Herzelee, favorisant l'écoulement et la concentration du pic de crue (été 2023).
 Fig. 4. – Over-maintenance of a creek downstream of the Herzelee agglomeration, encouraging runoff and concentration of peak flooding (summer 2023).

bassin versant de l'Yser n'est plus en mesure de soutenir les étiages qui sont de plus en plus sévères. Cela pose un problème pour la biodiversité mais également pour le monde agricole dont le besoin d'eau pour irriguer les cultures est de plus en plus pregnant. Des réflexions de la part du monde agricole sont en cours pour stocker le « surplus » de l'eau hivernale. Ayons une réflexion globale sur le système. Les solutions existent pour redonner vie à nos zones humides, fondées sur l'observation et l'étude de l'évolution de nos territoires. Cherchons à les mettre en œuvre tout en les adaptant à notre contexte actuel.

EAUX SOUTERRAINES EN HAUTS-DE-FRANCE : SYNTHÈSES DES PRINCIPAUX AQUIFÈRES ET HYDROSYSTÈMES

Groundwater through Hauts-de-France: hydrogeological synthesis

Adrien Manlay

Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 2A, Allée des Peupliers - Lesquin
a.manlay@brgm.fr

Marc Parmentier

Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 2A, Allée des Peupliers - Lesquin
m.parmentier@brgm.fr

INTRODUCTION

Dans le nord de la France, les eaux souterraines sont la principale ressource en eau exploitée pour l'eau potable, industrielle ou agricole et constituent 75 % des prélèvements en eau en région Hauts-de-France (hors canaux et énergie, données BNPE* 2020¹).

Le sous-sol de la région des Hauts-de-France est implanté dans les parties nord du Bassin de Paris et sud du Bassin de Bruxelles, séparées par les collines de l'Artois, permettant d'observer une importante diversité géologique, avec des dépôts datant du Paléozoïque au Quaternaire. C'est dans les formations poreuses (ou fissurées) et perméables, dites aquifères, que se constituent les nappes d'eau souterraines. De par leurs caractéristiques physiques (type de porosité, perméabilité, emmagasinement) et structurales (affleurement, sous couverture, failles, plis, etc.), les aquifères présentent des fonctionnements hétérogènes, et parfois complexes, qu'il faut comprendre pour assurer une bonne gestion de ces ressources.

En fonction de ces caractéristiques, on distingue plusieurs typologies d'aquifères :

- ✧ libre (surface de l'eau dans l'aquifère pouvant fluctuer librement) ou captif (aquifère sous couverture d'une formation très peu perméable, "piégeant" l'eau sous pression, la surface de l'eau - fictive - se situe alors au-dessus de la limite supérieure de l'aquifère, voire de la cote du sol [on parle alors de nappe artésienne²]),
- ✧ monocouche (constitué d'une seule formation géologique) ou multicouche (constitué par une succession de formations géologiques de natures et perméabilités pouvant être différentes, mais en communication hydraulique).

L'aquifère est à la fois un réservoir, qui va stocker (ou emmagasiner) l'eau, et un conducteur d'eau, c'est-à-dire qu'il s'écoule continuellement, par gravité, vers un exutoire (source, rivière, océan). La vitesse d'écoulement se traduit par la perméabilité de l'aquifère (ou conductivité hydraulique, exprimée en m/s). Dans la pratique, on utilise également la

transmissivité, produit de la perméabilité par l'épaisseur saturée en eau (exprimée en m^2/s). De manière générale, les écoulements des eaux souterraines sont régis par le cycle hydrologique, ou cycle de l'eau, représentant les mouvements et échanges d'eau continus sur Terre sous ses trois formes (liquide, solide et gazeuse), à travers les différents réservoirs que sont l'atmosphère, les océans, les glaciers, les surfaces continentales et les aquifères (Fig. 1).

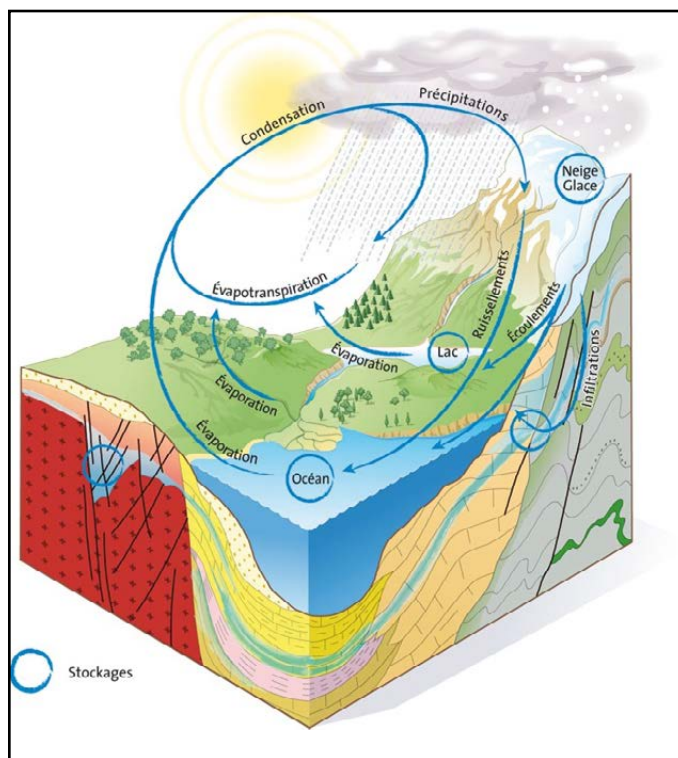


Fig. 1 – Cycle de l'eau et eaux souterraines (Illustration ©BRGM)
Fig. 1 – Water cycle and groundwater (Photo ©BRGM)

Sur les surfaces continentales, les précipitations contribuent à l'alimentation en eau des sols et de la végétation. Une partie de l'eau retourne directement à l'atmosphère par évapotranspiration. La fraction d'eau restante, dite pluie efficace, se répartit ensuite entre un flux de ruissellement et un flux d'infiltration. Le premier va rejoindre rapidement le réseau hydrographique, tandis que le second, par percolation à

1. Banque Nationale des Prélèvements d'Eau : <https://bnpe.eaufrance.fr>*

2. Le mot artésien provient par ailleurs de l'Artois où ont été découverts les premiers puits jaillissants

travers le sol et le sous-sol, va permettre la recharge des nappes libres. Lors de l'infiltration, l'eau traverse une première zone où la porosité contient un mélange d'air et d'eau (Zone Non Saturée, ZNS) avant d'atteindre la zone où la porosité est saturée en eau : la nappe d'eau souterraine. La surface de l'eau dans l'aquifère correspond à la cote piézométrique. Le temps d'infiltration (délai entre les précipitations et la recharge de l'aquifère) est fonction de la porosité, de la perméabilité du sol et de l'épaisseur de la zone non saturée. Cette alimentation des eaux souterraines se fait préférentiellement lorsque les précipitations sont plus importantes, que les sols sont humidifiés et que les besoins en eau de la végétation sont plus faibles (limitant l'évapotranspiration). En France, la période propice à la recharge correspond aux mois d'automne et d'hiver. A l'inverse, lorsque l'évapotranspiration dépasse les précipitations (période estivale), les apports d'eau ne compensent pas l'écoulement continu vers l'exutoire : une vidange naturelle des nappes est observée. Dans le cas des nappes captives, une recharge peut s'effectuer par des flux très lents à travers les formations peu perméables qui les séparent de la surface, on parle alors de drainance. Si les phénomènes de drainance sont importants, la nappe est parfois qualifiée de semi-captive.

Afin de donner au lecteur une description générale des eaux souterraines et de leur fonctionnement dans la région des Hauts-de-France, dans un premier temps les aquifères principaux sont présentés, au regard de leur lithologie, structure et mode d'alimentation ; puis, on s'intéresse ensuite aux modalités d'écoulement et à leur analyse spatiale et temporelle.

DESCRIPTION DES PRINCIPAUX AQUIFÈRES À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

Les principaux aquifères retrouvés dans la région Hauts-de-France correspondent à la succession lithostratigraphique suivante (du plus ancien au plus récent) :

✧ Paléozoïque : Formations calcaires du Dévonien et du Carbonifère ;

Mésozoïque :

- Formations du Jurassique ;
- Formations du Crétacé supérieur ;

Cénozoïque :

- Aquifères du Paléocène et de l'Eocène des bassins sédimentaires de Paris et des Flandres,
- Aquifères quaternaires du littoral.

La répartition spatiale de ces formations à l'affleurement est donnée à partir des cartes géologiques (Fig. 2). La dernière version du calendrier chronostratigraphique de référence peut être obtenue sur le lien : <https://stratigraphy.org/news/150> (consulté le 24/08/2023).

Les formations du Paléozoïque

Les formations du Calcaire Carbonifère dans la région de Lille-Tournai

L'aquifère transfrontalier dit des calcaires carbonifères s'étend du Hainaut belge à l'Eurométropole de Lille-Kortrijk-Tournai, sur une bande de 70 km de long et 25 km de large (Crampon *et al.*, 2006).

L'aquifère est constitué de calcaires dolomitiques de couleur sombre, attribués au Viséen (Carbonifère). L'aquifère est limité en profondeur par les formations schisteuses plus anciennes. L'épaisseur des calcaires carbonifères est très variable (50 m au cœur du pli anticlinal du Mélandois, plus de 400 m dans le pli synclinal de Roubaix). Fortement plissé et affecté par de nombreuses failles et chevauchements, la tectonique a donné au réservoir une géométrie complexe. Dans la région de Lille, les calcaires sont surmontés par les formations crayeuses et marneuses du Crétacé supérieur puis par les formations sableuses et argileuses du Cénozoïque.

Situés à faible à moyenne profondeur dans la région de Lille (50 à 150 m), les calcaires n'affleurent qu'en Belgique où la nappe est libre. La recharge est alors assurée par l'infiltration des pluies efficaces. Sous couverture sur le reste de son extension, l'aquifère est captif ou semi-captif. Hormis son alimentation par les précipitations sur les affleurements, la nappe connaît des recharges par pertes de cours d'eau (Escaut principalement), ou par drainance de la Craie sus-jacente.

La productivité de l'aquifère provient de la fissuration importante qui affecte les formations carbonifères. Cependant, il faut noter que la partie supérieure de l'aquifère est localement affectée par une karstification (vide créé par dissolution des carbonates de calcium ou magnésium composant la roche, occasionnant des écoulements très rapides si le vide n'est pas rempli par une sédimentation postérieure) (Pinson & Seguin, 2007). Ces karstifications ayant entraîné des effondrements de taille importante en surface (diamètre jusqu'à 15-20 m) par le passé. L'ensemble de la formation n'est toutefois pas affecté par le même degré de fissuration/karstification.

Il est à noter que cet aquifère a été fortement sollicité par le passé, depuis le XIX^e siècle, et a vu son niveau chuter fortement au cours du XX^e siècle (voir infra). Une gestion quantitative transfrontalière a été mise en place et s'est accompagnée de travaux de modélisation mathématique (Picot-Colbeaux *et al.*, 2020).

Les formations calcaires de l'Avesnois

Situé au Nord-Est de la région Hauts-de-France, l'Avesnois est un contrefort des Ardennes au relief marqué, laissant affleurer les formations paléozoïques. Les principales formations aquifères sont constituées des schistes calcareux, calcshistes et calcaires du Dévonien, ainsi que des formations majoritairement calcaires du Carbonifère.

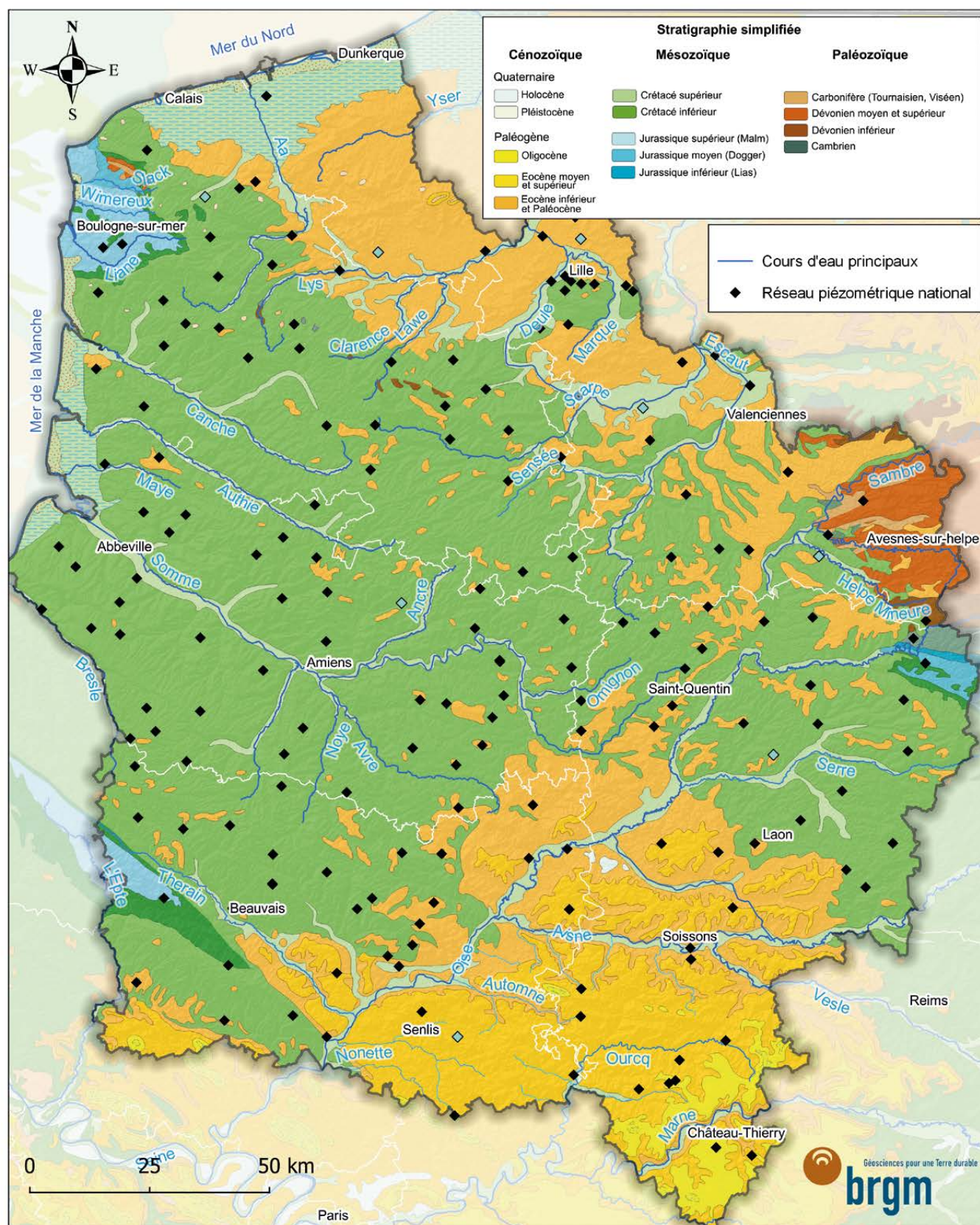


Fig. 2 – Extrait de la carte géologique au 1/1 000 000 (BRGM) sur la région des Hauts-de-France. Les losanges bleu clair montrent les stations sélectionnées pour l'analyse piézométrique.

Fig. 2 – Extract from the 1/1,000,000 geological map (BRGM) of the Hauts-de-France region. The light blue diamonds show the stations selected for piezometric analysis.

Les aquifères de l'Avesnois sont limités à la base par l'alternance de formations schisteuses dans la succession lithostratigraphique du Dévonien et du Carbonifère. Ces ensembles participent à des structures tectoniques plissées (Meilliez & Mansy, 1990). Les aquifères de l'Avesnois apparaissent ainsi compartimentés, sans continuité hydraulique régionale. Chaque structure constitue donc un système indépendant, avec sa propre dynamique hydrogéologique (Crampon *et al.*, 2006).

Les calcaires de l'Avesnois ont une porosité de fissures, de fractures, et sont localement karstifiés. Leur épaisseur totale peut être très importante (les calcaires du Dévonien peuvent atteindre 400 m d'épaisseur dans le Nord et 200 m dans le Sud de l'Avesnois, quand la série est complète) mais l'épaisseur productive se limite généralement à 50-60 m. Au sein de chaque système aquifère, les discontinuités sont également fréquentes (différence de perméabilité entre formations calcaires et dolomitiques, différences de fissuration, etc.).

L'alimentation de ces aquifères, libres, est majoritairement assurée par les précipitations efficaces. Localement, les cours d'eau alimentent également les eaux souterraines par pertes lorsque le réseau hydrographique recoupe les affleurements de calcaires (Crampon *et al.*, 2003).

Les formations paléozoïques sont également présentes au nord de la boutonnière du Boulonnais (massif de Ferques), dans une zone assez restreinte, les formations du Viséen peuvent présenter un intérêt hydrogéologique local. Ces formations ne sont toutefois pas détaillées ici.

Les formations du Mésozoïque

Les aquifères jurassiques

Les formations du Jurassique sont principalement retrouvées dans la Boutonnière du Boulonnais, dans le pays de Bray et au nord du Département de l'Aisne. Dans ces deux dernières zones, les nappes sont peu exploitées et étudiées. Dans le Boulonnais, les formations jurassiques sont composées d'alternances de marnes, d'argiles, de sables, de grès et de calcaires. Les formations argileuses et marneuses constituent la plus grande partie de la série jurassique du Boulonnais. Les formations aquifères sont plus limitées (5 à 35 m d'épaisseur) et se décomposent en trois sous-ensembles principaux (Crampon *et al.*, 2006) :

- ✧ les sables et grès du Tithonien (appellation locale des Grès de Châtillon et Grès de la Crèche) ;
- ✧ les calcaires fissurés de l'Oxfordo-Kimmeridgien, qui constituent la ressource majeure du Jurassique ;
- ✧ les calcaires oolithiques du Bathonien.

Les nappes qui renferment ces formations sont discontinues, de faibles extension et épaisseur, et sont affectées par différentes discontinuités (failles, vallées, etc.). L'ensemble pourrait être considéré comme un aquifère multicouche

soumis à des phénomènes de drainance (essentiellement descendante), libre aux affleurements et en bordure et semi-captif, voire captif dans les couches inférieures.

La recharge est majoritairement assurée par l'infiltration des eaux de pluie et drainance à travers les formations semi-perméables. De nombreuses sources drainent cet ensemble d'aquifères, tout comme le réseau hydrographique (El-Ouafi, 1993). La vidange des nappes contribue alors au soutien d'étiage des cours d'eau. La capacité d'emmagasinement des aquifères est faible et leur vidange rapide.

De par l'absence de continuité hydraulique à l'échelle du Boulonnais, ces nappes sont d'intérêt local. De bonne productivité, elles sont toutefois identifiées dans les vallées là où les aquifères sont recouverts par les alluvions, elles-mêmes saturées en eau (Mania & Ricour, 1974). La proximité du littoral rend également ces aquifères vulnérables au risque d'arrivées d'eau saumâtre.

Les aquifères crayeux du Crétacé supérieur

Les formations du Crétacé supérieur sont les plus présentes sur l'ensemble de la région des Hauts-de-France (environ 90 % de la région), affleurantes dans 52 % du territoire. Le Crétacé supérieur se divise en plusieurs étages. On retrouve dans la région (du plus âgé au plus récent) (Caudron & Roux, 2006 ; Crampon *et al.*, 2006) :

les formations du Cénomaniens, constituées d'alternances de craie marneuses et de marnes, voire de calcaire grossier et de conglomérat ("tourtia" des mineurs) à la base ; Ces formations ne sont considérées aquifères qu'au nord-ouest de la région et dans l'Artois où le faciès est plus crayeux ;

- ✧ les formations du Turonien moyen et inférieur, constituées principalement de marnes argileuses ("dièves" des mineurs) ainsi que d'alternance de marnes et de bancs plus crayeux. Dans le pourtour du Boulonnais et dans le Haut Artois, des bancs de faciès plus crayeux sont également rencontrés ;
- ✧ l'ensemble de formations du Turonien supérieur, du Coniacien et du Santonien, composé de craies (dites grises à la base puis blanches) avec des lits de silex.

D'un point de vue structural, ces formations sont principalement affectées par le bombement anticlinal de l'Artois d'axe NO-SE, marquant la séparation entre les bassins sédimentaires des Flandres et de Paris (Beckelynck, 1981). Cette structure plissée et faillée est dissymétrique avec un pendage plus important au nord, où les couches du Crétacé plongent sous la couverture du Cénozoïque, alors qu'au sud, les formations deviennent rapidement tabulaires dans la Somme. Les failles associées à cette structure présentent des rejets importants, pouvant constituer des limites aux aquifères crayeux (Caulier, 1974). D'autres éléments structu-

raux viennent toutefois modifier la géométrie des aquifères crayeux dans la région ; notamment aux abords de la cuesta du Boulonnais, au niveau de l'anticlinal du pays de Bray ou encore au niveau du Mélandois, vers la région de Lille où l'épaisseur de craie est fortement diminuée.

Les formations crayeuses sont initialement poreuses mais peu perméables (porosité d'interstice - matricielle - élevée mais perméabilité faible : écoulement lent à travers les pores). La productivité de ces aquifères provient essentiellement de la fissuration (Downing *et al.*, 1993 ; West *et al.*, 2023). Celle-ci est plus importantes aux abords des vallées (réseau hydrographique) et vallons secs, puis diminue avec l'éloignement des axes de drainage. La productivité est essentiellement assurée par les premiers mètres (20-30 m), plus fissurés. L'épaisseur de zone non saturée (ZNS) évolue inversement et est maximale dans les plateaux. Cette épaisseur est très variable, de quelques mètres à plus de 70 m dans certains plateaux de l'amont de la Somme. Des écoulements de type karstique sont également suspectés localement (cran d'Escalles (Bracq & Brunin, 1999), source de la Lys à Lisbourg (Maqsoud, 1996).

Majoritairement libres lorsqu'ils affleurent, les aquifères crayeux sont captifs dans les bassins sédimentaires des Flandres, d'Orchies et de Paris, voire artésiens (début du bassin des Flandres, au Nord de l'Artois, ou sous les alluvions argileuses de certaines vallées du Pas-de-Calais et de l'Oise). Au cœur de ces bassins, sous épais recouvrement, la productivité de la craie diminue fortement. À l'inverse, dans l'Artois, sous l'effet des variations de faciès, deux nappes s'individualisent entre les formations du Turonien et du Cénomaniens (secteur de Fruges, Pas-de-Calais).

L'alimentation de ces aquifères se fait préférentiellement par les pluies efficaces dans les zones libres. En complément, les nappes crayeuses peuvent être alimentées par drainance à travers leur couverture, qu'elle soit du Paléogène ou du Quaternaire (alluvions, formations du littoral). Des échanges existent également avec les aquifères sous-jacents, notamment la craie alimente par drainance les calcaires carbonifères dans la région de Lille.

Si la "nappe de la craie" est souvent considérée comme homogène et libre à l'échelle régionale, il en demeure que cette homogénéité n'est qu'apparente. À l'échelle locale, les aquifères crayeux peuvent être multiples (voire multicouche, ensemble de couches crayeuses séparées par des intercalations marneuses) et présenter différents facteurs d'hétérogénéité (Bracq, 1992 ; Bakalowicz, 2018).

Les formations du Cénozoïque

Les aquifères multicouches du Paléocène et de l'Éocène dans le Bassin parisien

Dans le Bassin parisien, les terrains sédimentaires de l'ère Cénozoïque, et plus précisément du Paléogène, sont constitués d'une succession de formations géologiques de lithologie

très variée : sables, calcaires, argiles et marnes datant du Paléocène, de l'Éocène et de l'Oligocène. L'Yprésien et le Lutétien sont des étages géologiques occupant respectivement la base et le milieu de l'Éocène. L'Yprésien comprend deux sous-étages : le Sparnacien à la base, composé essentiellement d'argiles entrecoupées de niveaux sableux, et le Cuisien au sommet, représenté par des sables. Le Lutétien supérieur est formé de marnes et caillasses tandis que le Lutétien moyen et inférieur est caractérisé par des calcaires grossiers, devenant sableux et glauconieux à la base.

Les nappes des formations du Paléogène se retrouvent au sein des formations perméables calcaires ou sableuses (voire gréseuses). Des formations semi-perméables à imperméables séparent les aquifères, mais permettent toutefois des transferts d'eau par drainance. L'ensemble compose un système multicouche.

Les terrains de l'Éocène regroupent deux grands ensembles aquifères pouvant être individualisés en fonction des étages géologiques (Mégny, 1979 ; Caudron, 2006) :

- ✧ l'aquifère multicouche du calcaire de Champigny pour l'Éocène supérieur (Bartonien et Priabonien/Ludien), reconnu dans la Brie (Sud de l'Aisne),

- ✧ l'aquifère multicouche du calcaire grossier pour l'Éocène moyen (Lutétien) et des sables du Cuisien ou du Soissonnais (Sparnacien) pour l'Éocène inférieur (Yprésien), exploité principalement dans le Vexin, le Valois et le Soissonnais (Oise et Aisne).

Dans les départements de l'Oise et de l'Aisne, les aquifères du Lutétien et de l'Yprésien sont principalement exploités.

Les formations perméables du **Lutétien** moyen et inférieur forment un aquifère épais de 20 à 30 m dans les Hauts-de-France. La nappe des calcaires du Lutétien est majoritairement libre et le réservoir du Lutétien n'est alors pas entièrement saturé. Sur les parties amont des bassins versant de la Nonette, de Launette et de la Thève, la nappe devient captive, sous les formations du Bartonien. L'alimentation de la nappe se fait par infiltration des eaux de pluie à partir des affleurements et par drainance des nappes sus-jacentes (percolation lente à travers les marnes et caillasses). Bien que la perméabilité d'interstices prédomine à la base plus sableuse du réservoir, la perméabilité de fissures régit les écoulements souterrains à travers le calcaire, qui peut même localement présenter une certaine karstification (Valois et région de Senlis).

L'aquifère de l'**Yprésien** supérieur est formé par les sables du Cuisien, dont l'épaisseur peut atteindre 50 à 70 m. Le régime de la nappe de l'Yprésien est généralement libre sur les bordures, mais devient captif en présence de formations imperméables sus-jacentes, notamment des "argiles de Laon" de l'Yprésien supérieur. Cette argile apparaît de façon discontinue au toit des sables cuisien. En l'absence des argiles de Laon, continues et épaisses, les calcaires du Lutétien sont

en communication hydraulique directe avec les sables de l'Yprésien supérieur. En zone libre l'alimentation de l'aquifère se fait par infiltration des eaux de pluie ; en régime captif/semi-captif, par drainance à travers les argiles de Laon. La perméabilité d'interstices des sables yprésiens varie en fonction de la granulométrie du sable et de l'abondance d'argile. Il s'agit d'un aquifère moyennement productif. La productivité est meilleure lorsque les sables sont en communication hydraulique avec les calcaires du Lutétien. A l'inverse, leur profondeur augmente sous les plateaux et vers le centre du Bassin parisien, ce qui accentue la captivité du réservoir qui devient moins productif.

Les aquifères multicouches du Paléocène et de l'Eocène dans le Bassin des Flandres

Les formations sédimentaires du Cénozoïque sont également présentes dans la partie Nord de la région, dans les bassins des Flandres, entre Lille et Dunkerque, et d'Orchies, au sud-est de Lille.

Les formations aquifères sont celles du Thanétien (supérieur, sables et grès d'Ostricourt), composé de sables glauconieux marins, de tuffeaux ou de sables blancs continentaux, qui reposent sur des formations argileuses (Thanétien inférieur, argiles de Louvil). Libre au niveau des affleurements en limite des bassins sédimentaires des Flandres et d'Orchies, cette nappe devient captive sous les argiles yprésiennes (Argiles de Flandres) au cœur de ces zones. L'épaisseur moyenne de l'aquifère est évaluée entre 15 et 20 m dans les Flandres (Mania, 1972).

La recharge de la nappe des sables se fait soit dans la zone libre de l'aquifère, soit par drainance à travers l'argile yprésienne sus-jacente (Caous & Gabens, 1993).

Les aquifères littoraux du Quaternaire

Les dépôts littoraux du Quaternaire sont également susceptibles d'abriter des nappes. Leur extension et productivité restent modestes en comparaison des aquifères précédents.

A l'ouest de la région, la plaine maritime est constituée de dépôts littoraux récents qui reposent sur une plateforme continentale crayeuse (Crétacé supérieur) (Czernichowski-Lauriol, 1996). Dans cette plaine d'altitude très basse (4-5 m, "Bas Champs"), la couverture quaternaire est composée de sédiments sablo-argileux, plus ou moins fins, où s'intercalent des niveaux tourbeux. Localement, des secteurs d'altitude un peu plus élevée (10 m) sont constitués de graviers et galets, matériaux grossiers déposés par les courants marins.

Les formations du littoral renferment une nappe libre de faible profondeur (1 à 2 m par rapport au sol naturel). Son alimentation est essentiellement assurée par précipitations. Le long du littoral de la Manche (hors Boulonnais), ces formations reposent sur la craie dont la nappe devient captive ou semi-captive là où le Quaternaire est argileux. Les contacts entre la craie et les formations du littoral sont

à l'origine de zones marécageuses. Les formations des Bas Champs n'étant pas toujours suffisamment imperméables, des interactions entre ces zones marécageuses, le réseau hydrographique et les aquifères sous-jacents (Quaternaire et craie) ont été mises en évidence à l'échelle locale (Bault *et al.*, 2018 ; Bault *et al.*, 2023).

Les sables qui composent les dunes contiennent également une nappe libre perchée, de faible importance, au-dessus des formations quaternaires des Bas Champs, de perméabilité plus faible. Au nord de la région, sur le littoral de la mer du Nord, ces formations sableuses sont également présentes et renferment des nappes peu productives ("sables pissarts").

ANALYSES DE LA CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES : LA PIÉZOMÉTRIE

Analyse spatiale : carte piézométrique et écoulement régional

Les cartes piézométriques sont une représentation cartographique, à un instant donné, de la surface des nappes libres ou de la pression hydrostatique des nappes captives. Il s'agit d'un des outils de base du travail de l'hydrogéologue.

Elles peuvent être lues comme des cartes topographiques, les isopièzes sont des équipotentielles (la charge hydraulique - ou piézométrie - est constante le long d'une isopièze), à l'instar des courbes de niveaux. Ces courbes correspondent aux altitudes de la nappe au moment de la mesure piézométrique, donnent des indications sur l'état hydraulique de la nappe, le sens des écoulements et leur vitesse. L'altitude de chaque courbe de niveau (ou isopièze) est indiquée en mètres et partage le même plan de référence avec le réseau de nivellement général de la France (NGF). Les lignes de courant, qui définissent la direction et le sens des écoulements de la nappe, sont perpendiculaires aux isopièzes et vont dans le sens des potentiels décroissants (de la charge hydraulique la plus élevée vers la plus faible). Les limites des bassins versants hydrogéologiques se définissent le long des crêtes piézométriques tandis que les points les plus bas correspondent aux axes de drainage.

Les aquifères des Hauts-de-France ont fait l'objet de nombreux travaux de cartographie piézométrique par le passé. A titre d'exemple, deux cartes sont proposées (Fig. 3) : les isopièzes des aquifères crayeux du Crétacé supérieur sur les 2/3 de la région (1) et celles des aquifères du Lutétien et de l'Yprésien au sud de la région (2).

Les données présentées dans ce paragraphe sont disponibles sur les Systèmes d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines (SIGES) : Nord-Pas-de-Calais³ et Seine-Normandie⁴.

3. <https://sigesnpc.brgm.fr/?page=carto>

4. <https://sigesn.brgm.fr/?page=carto>

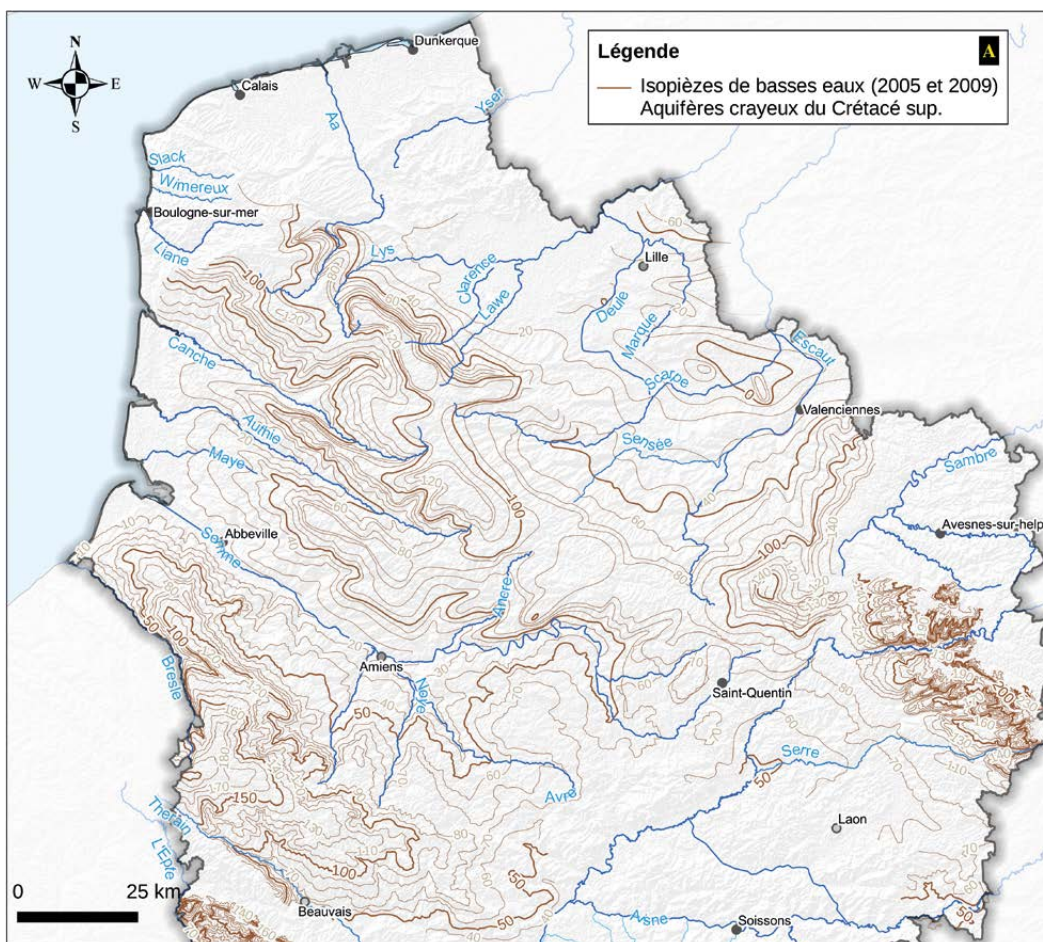
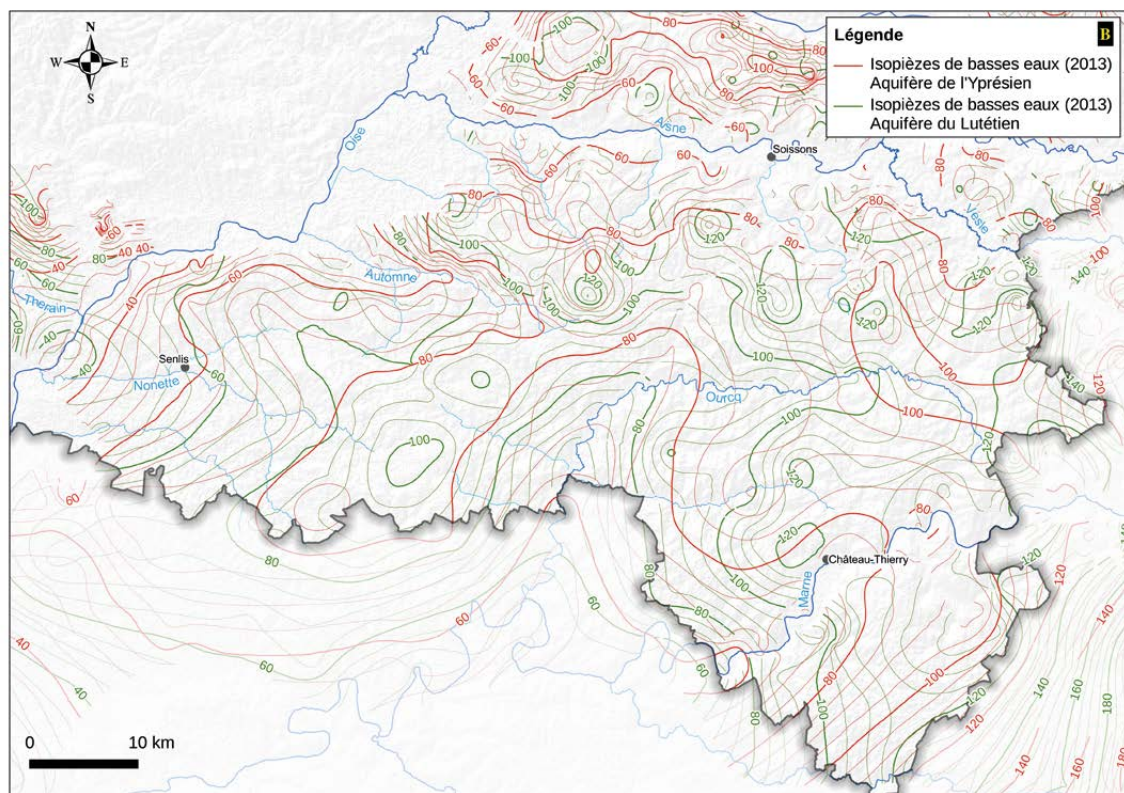


Fig. 3 – Cartes piézométriques (a) des aquifères crayeux en basses eaux (Chrétien *et al.*, 2006 ; Cardin & Dufrenoy, 2009), (b) des aquifères multicouches du Lutétien et de l'Yprésien en basses eaux (Bault *et al.*, 2015).

Fig. 3 – Piezometric maps of (a) low-water chalk aquifers (Chrétien *et al.*, 2006; Cardin & Dufrenoy, 2009), (b) low-water Lutetian and Ypresian multi-layer aquifers (Bault *et al.*, 2015).



Les aquifères crayeux du Crétacé supérieur

La carte proposée est basée sur les travaux de Cardin et Dufresnoy (2009) pour la partie Nord-Pas-de-Calais et de Chrétien *et al.* (2006) pour la partie picarde.

De manière générale, les isopièzes des aquifères crayeux suivent la morphologie de la topographie naturelle des terrains traversés. La nappe apparaît comme drainée par vallons et vallées sèches (les lignes de courant convergent vers les vallées), sous l'effet d'une meilleure perméabilité du réservoir généralement liée à la fissuration. Les relations nappe-rivière apparaissent donc importantes dans le cas des aquifères crayeux, avec un soutien de débit des eaux de surface par les eaux souterraines. Ce constat général peut toutefois être nuancé par l'étude plus détaillée de ces relations (Brugeron *et al.*, 2020). Dans certains secteurs, on remarque une modification des écoulements à l'approche de champs captant (exemple au sud de Lille). Les collines de l'Artois constituent une ligne de partage des eaux, avec au nord de celles-ci des écoulements dirigés vers le nord-est, et au sud des écoulements dirigés vers le sud-ouest. Dans le Département de la Somme, les écoulements sont dirigés vers le cours d'eau puis vers la mer de la Manche.

Dans les zones où le relief est plus marqué (Artois et à proximité de l'Avesnois par exemple), les gradients sont également plus importants (courbes resserrées). On constate une diminution de ces gradients dans certaines zones (plaine de la Lys et vallée de la Scarpe par exemple), où les écoulements apparaissent moins tributaires du relief et du réseau hydrographique.

Les aquifères du Lutétien et de l'Yprésien dans le Bassin de Paris

Leurs cartographies piézométriques ont été réalisées en hautes eaux et basses eaux en 2013-2014 (Bault *et al.*, 2015).

Les sens d'écoulement s'effectuent globalement vers l'ouest, vers la vallée de l'Oise. Le drainage s'effectue par les vallées affluentes (Automne, Nonette, Ourcq, Marne) qui recoupent l'aquifère et le long desquelles apparaissent des sources. Les crêtes piézométriques, bien marquées, se superposent grossièrement aux crêtes topographiques. Les gradients hydrauliques sont relativement faibles et homogènes sur l'ensemble du Valois, traduisant une perméabilité probablement homogène de l'aquifère. Ils sont inférieurs à 2‰ sur les crêtes piézométriques et compris entre 2 et 4‰ en plateaux calcaires et vallées.

En dehors des zones situées près des affleurements de la vallée de l'Automne et de l'Oise, l'aquifère des sables de l'Yprésien supérieur est toujours entièrement saturé. Les niveaux s'établissent alors au droit des calcaires du Lutétien voire même des formations du Bartonien sur l'amont des bassins de la Launette et de la Thève. Cet état peut être la preuve de la mise en captivité de la nappe ou de la conti-

nuité des nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur. Les gradients hydrauliques de la nappe de l'Yprésien supérieur s'échelonnent de 2 à 3‰ sur les plateaux mais peuvent atteindre des valeurs assez élevées à l'approche des vallées de l'Oise et de l'Automne (6 à 10‰).

Plus au nord, vers Soisson, deux nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur se distinguent. Les épaisseurs des argiles de Laon sont importantes et les affleurements nombreux. De nombreuses sources sourdent au contact des calcaires du Lutétien avec les argiles sous-jacentes. Les niveaux d'eau mesurés dans les sables se trouvent généralement 30 m sous ceux des calcaires.

Analyse temporelle : la surveillance des niveaux piézométriques

La piézométrie peut être le résultat de plusieurs phénomènes, tels que par exemple l'infiltration des eaux de pluie, les échanges nappe-rivière, ou les pompages à proximité. L'analyse de son évolution renseigne sur les modalités de fonctionnement, d'alimentation et d'écoulement des aquifères.

Le réseau piézométrique national, géré par le BRGM et financé par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES), permet le suivi d'environ 1 700 ouvrages (puits, forages) en France. Pour la région Hauts-de-France, ce sont 190 stations piézométriques qui sont suivies en continu (Fig. 2). De cette carte sont tirées ici huit chroniques piézométriques observées de 1970 à 2023, issues de mesures dans des contextes hydrogéologiques différents (Fig. 4).

On note une forte saisonnalité, et une cyclicité de recharge/vidange rapides dans le réservoir cénomanien (figure 4a). Le battement (amplitude entre le niveau maximal et le niveau minimal) annuel moyen est de 3,5 m. Le stockage apparaît donc limité, avec des vitesses d'écoulement assez fortes : on parle de diffusivité élevée de l'aquifère.

Pour l'aquifère du Turonien supérieur au Santonien, la saisonnalité est également assez marquée dans les fluctuations piézométriques. En revanche une cyclicité pluriannuelle apparaît, avec des cycles de 6-7 ans sur superposant à la cyclicité annuelle. Selon les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, l'importance du cycle pluriannuel varie. On observe ainsi une double cyclicité à dominante annuelle au nord-ouest de la région ainsi qu'à l'est (figure 4b), et une double cyclicité à dominante pluriannuelle au centre de la région (figure 4c). De manière générale, les battements annuels sont plus importants lorsque la cyclicité annuelle prédomine (en moyenne, 9,5 m contre 4,5 m pour le signal pluriannuel dans l'exemple proposé). Cette inertie de fonctionnement (cyclicité pluriannuelle) est liée pour partie aux oscillations climatiques de l'Atlantique Nord et pour partie aux caractéristiques de l'aquifère (perméabilité, emmagasinement - diminution de la diffusivité - distance à l'exutoire et épaisseur de ZNS). Cet aspect inertiel peut être à l'origine de différentes problématiques de gestion (inondations de la Somme en 2001 suite à

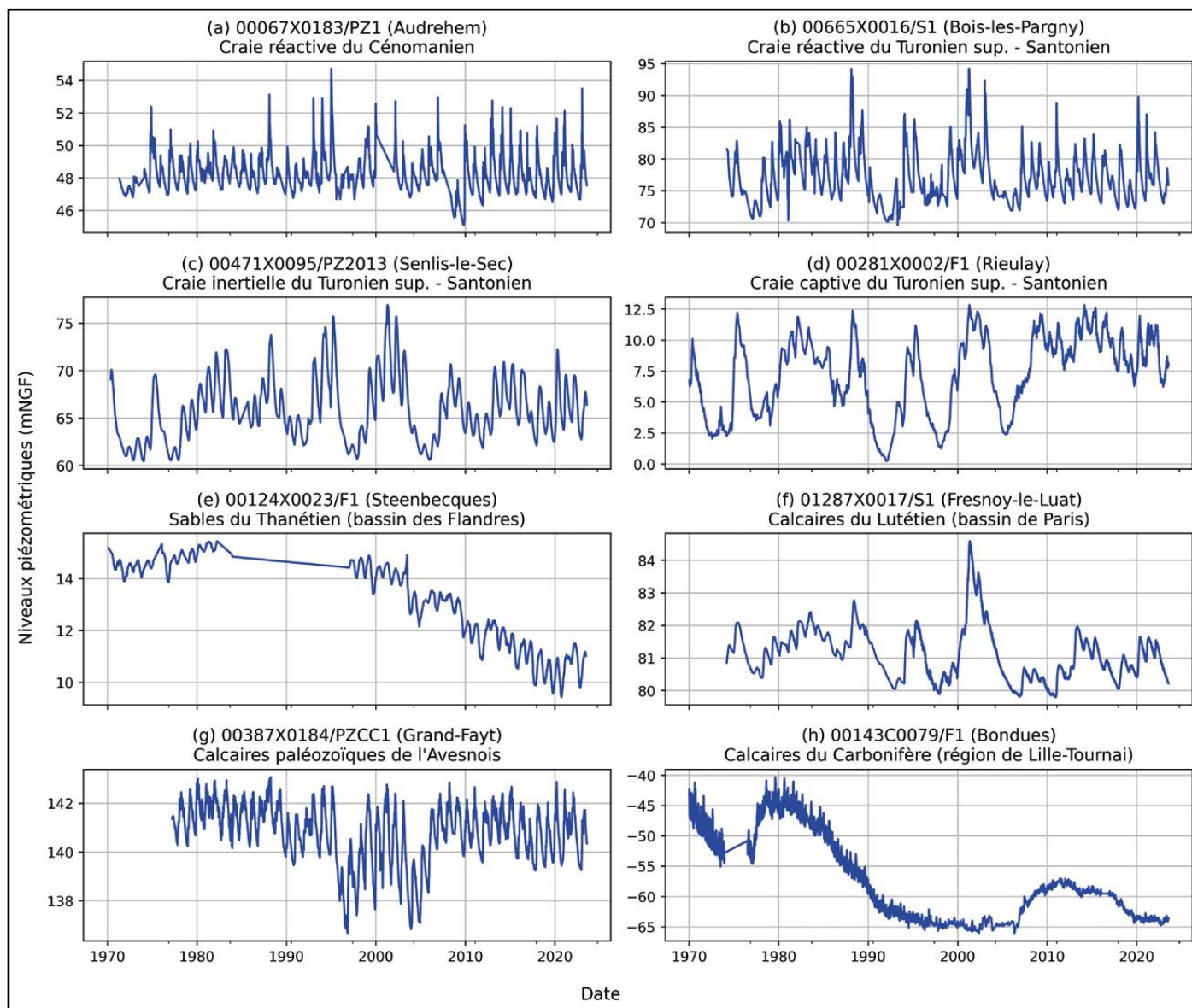


Fig. 4 – Exemple de variations piézométriques dans différents contextes hydrogéologiques des Hauts-de-France (Données BRGM). Données disponibles sur le portail ADES.

Fig. 4 – Example of piezometric variations in different hydrogeological contexts in Hauts-de-France (BRGM data). Data available on the ADES portal.

l'effet cumulatif des hautes eaux au sein du cycle pluriannuel, sécheresses répétées). Que ce soit dans la Somme (Amraoui *et al.*, 2002; Thiéry *et al.*, 2018; Arnaud & Rousseau, 2019) ou dans le Nord et le Pas-de-Calais (Buscarlet *et al.*, 2011; Bessière *et al.*, 2015), ces aquifères ont également fait l'objet de modélisations mathématiques pour améliorer la compréhension de ces processus et la gestion des ressources.

La piézométrie de la craie captive sous les formations du Thanétien et du Quaternaire est particulière dans le bassin sédimentaire d'Orchies (Fig. 4d). Le suivi du piézomètre 00281X0002, situé à Rieulay, a démarré au début du XXe siècle et montre un changement de comportement dans les années 1950 (non montré ici). Les variations saisonnières sont ici très peu marquées (0,8 à 2 m). A l'origine présentant des très faibles variations piézométriques (typique des nappes

captives), de fortes amplitudes pluriannuelles sont apparues sous l'effet de l'augmentation généralisée des pompages dans l'aquifère (Crampon *et al.*, 2006).

Pour les aquifères tertiaires des bassins sédimentaires, les comportements piézométriques varient d'un secteur à l'autre. Dans les Flandres (figure 4e), l'aquifère du Thanétien présente des cycles saisonniers auxquels se superpose une tendance pluriannuelle à la baisse (en moyenne 0,25 m/an à Steenbecque; jusqu'à 0,8 m/an à l'échelle de l'aquifère). Cette tendance, observée depuis les années 70 à l'échelle de l'aquifère semble liée à une augmentation des prélèvements de part et d'autre de la frontière du bassin des Flandres (Caous *et al.*, 1997). Dans le bassin de Paris, le suivi des calcaires du Lutétien montre une forte prédominance d'un cycle pluriannuel sur la piézométrie (figure 4f), traduisant une inertie

très importante de l'aquifère. Les battements annuels sont de l'ordre du mètre. Des comparaisons avec la pluviométrie ont montré des décalages de 3 à 4 mois entre l'impulsion pluviométrique et la réaction piézométrique.

La figure 4g montre l'évolution du niveau piézométrique dans les calcaires paléozoïques de l'Avesnois (à Grand-Fayt). Les fluctuations saisonnières varient entre 1 et 5 m, tandis que le battement général est de 6,5 m. L'aquifère apparaît ici assez réactif (sensible aux pluies efficaces et vidange rapide).

Enfin, la figure 4h montre l'évolution piézométrique des calcaires carbonifères de la région de Lille. On observe une importante tendance à la baisse des niveaux dans cet aquifère captif, jusqu'au début des années 2000. Les études de cet aquifère rappellent que le niveau piézométrique du Carbonifère a chuté d'environ 90 m entre 1850 et 2000, à un rythme supérieur à 1 m par an entre 1945 et 2000, à la suite de l'exploitation industrielle de l'aquifère (Picot-Colbeaux *et al.*, 2020). En 1977, une remontée des niveaux est observée suite à un effondrement karstique dans le lit de l'Escaut (à Kain, près de Tournai; voir par exemple Pinson et Seguin, 2007). La tendance à la baisse se poursuit ensuite. De 2006 à 2011, une remontée du niveau est observée. Celle-ci s'est toutefois rapidement stoppée et a été suivie d'une nouvelle baisse (2012-2019). Les niveaux piézométriques semblent plus stables sur la période récente (2020 à 2023).

L'analyse de ces chroniques piézométriques permet donc de comprendre le fonctionnement hydraulique d'un aquifère (inertiel/réactif, en lien avec les cours d'eau, réponse à la pluviométrie, etc.). Des analyses plus poussées peuvent être mises en place afin de ré-analyser des événements passés (sécheresse ou crue par exemple) et de les caractériser (période de retour, intensité, etc.). La compréhension de

ces différents phénomènes permet *in fine* une meilleure anticipation et une meilleure gestion de la ressource. Enfin, il est à noter que ces suivis permettent également la réalisation de bulletins de situation hydrologique mensuels. Un bulletin national est édité ainsi que des bulletins de bassin⁵.

CONCLUSION

La diversité géologique de la région Hauts-de-France abrite de nombreuses nappes d'eau souterraines, ressources principales pour l'eau potable, l'industrie et l'agriculture. Cette diversité induit des structures et fonctionnements différents à l'échelle régionale (géométrie, modes d'alimentation et d'écoulement, comportements piézométriques). Les aquifères principaux correspondent à ceux des formations crayeuses du Crétacé supérieur sur la quasi-totalité de la région, des calcaires carbonifères dans la région de Lille et des aquifères du Lutétien et de l'Yprésien au sud de la région (bassin de Paris). Lorsqu'ils sont libres les aquifères se rechargent par infiltration des précipitations. En zones captives, la recharge s'effectue très lentement par percolation à travers les formations peu perméables superposées aux aquifères. L'analyse des cartes piézométriques montre, par exemple, pour les formations crayeuses que les écoulements souterrains en zone libre sont tributaires du relief et en lien avec les cours d'eau. Les chroniques piézométriques montrent des comportements différents d'un aquifères à l'autre et au sein d'un même aquifère régional. Ces constats permettent d'apprécier l'importance de la compréhension des processus régissant les écoulements souterrains pour la gestion de la ressource.

5. Disponible sur le site de la DREAL pour le bassin Artois-Picardie : <https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/?Bulletins-de-situation-hydrologique-du-Bassin-Artois-Picardie-2023>; et sur le SIGES Seine-Normandie pour le bassin idoine : <https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article527>

LA FONCTION D'HYDROGÉOLOGUE AGRÉÉ

Barbara Louche

barbara.Louche@univ-artois.fr

Les hydrogéologues agréés en matière d'hygiène publique sont chargés d'émettre des avis dans le cadre des procédures administratives définies par les réglementations en vigueur, concernant essentiellement la protection de la ressource et des points de prélèvements d'eaux destinées à la consommation humaine y compris des eaux minérales naturelles. Pour les points de prélèvements d'eau qui ne bénéficient pas d'une procédure de déclaration d'utilité publique (cas des forages privés alimentant une usine de conditionnement d'eau, une entreprise agroalimentaire, etc.), l'avis de l'hydrogéologue agréé portera sur les mesures de protection qu'il convient de mettre en place. La consultation d'un hydrogéologue agréé revêt également un caractère obligatoire dans les cas suivants : le rejet dans le sol d'effluents d'assainissement, les inhumations en terrain privé et l'enfouissement de cadavres d'animaux. Les hydrogéologues agréés peuvent aussi être consultés sur des dossiers d'installations classées pour la protection de l'environnement, d'infrastructures routières, de cimetières.

Les hydrogéologues sont agréés à l'issue d'une procédure menée par le Directeur Général de l'Agence Régionale de Santé (DGARS). Une liste des hydrogéologues agréés en matière d'hygiène publique est arrêtée pour chaque département pour une durée de cinq ans.

La demande d'intervention d'un hydrogéologue agréé est effectuée par le pétitionnaire auprès de l'Agence Régionale de Santé. C'est le DGARS qui désigne l'hydrogéologue agréé sur un dossier. Il s'appuie sur la proposition d'un hydrogéologue coordonnateur départemental, proposition établie selon les compétences des hydrogéologues et la spécificité du dossier.

Au vu des informations contenues dans le dossier et des observations recueillies sur le terrain, l'hydrogéologue agréé formule un avis fondé sur des considérations d'ordre hydrogéologique et géologique, par un rapport écrit qui n'est que consultatif.

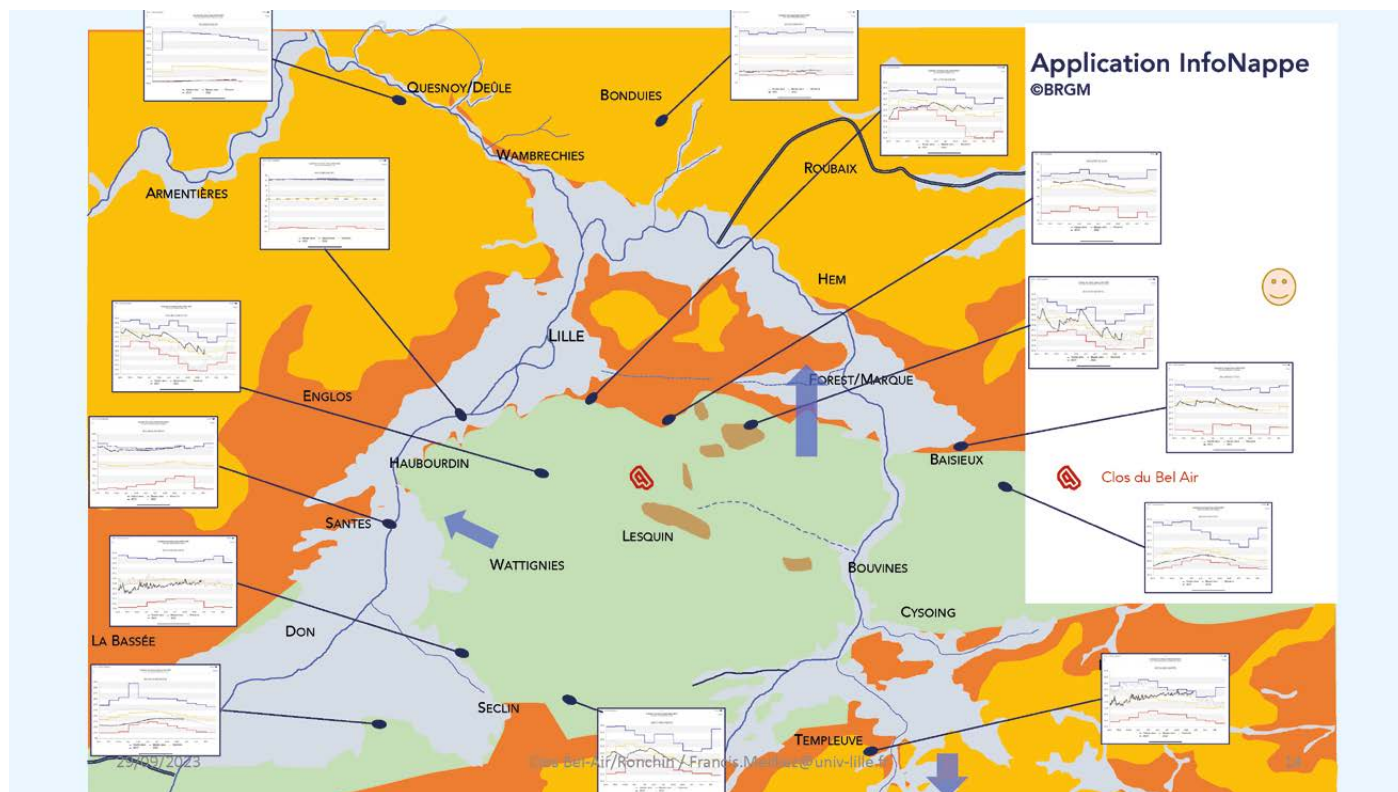


Fig. 1 – Carte géologique simplifiée du territoire centré sur la Métropole Européenne de Lille, et localisation des diagrammes au 29 septembre 2023.

NDLR : L'hydrogéologue agréé travaille sur une mission, administrativement réglementée, en s'appuyant sur les données qui lui sont fournies par le demandeur et les bureaux d'études concernés par le projet. Il s'appuie aussi sur les bases de données gérées par le BRGM. Depuis quelques années, le BRGM a aussi facilité l'accès de tout public à l'information permanente sur l'état de la ressource souterraine. C'est le but de l'app **InfoNappe** (©BRGM) qui illustre, via un smartphone ou une tablette numérique, les variations de niveau dans les piézomètres compris dans un rayon de 20 km autour du point d'observation.

Un diagramme montre 5 courbes : le niveau piézométrique (ordonnées) sur la durée d'une année civile (abscisses) :

- ❖ Courbe bleue : hautes eaux statistiquement maximales
- ❖ Courbe rouge : basses eaux statistiquement minimales
- ❖ Courbe jaune : niveau statistiquement médian

- ❖ Courbe grise : niveau observé à l'année N-1
- ❖ Courbe noire : niveau observé durant l'année en cours

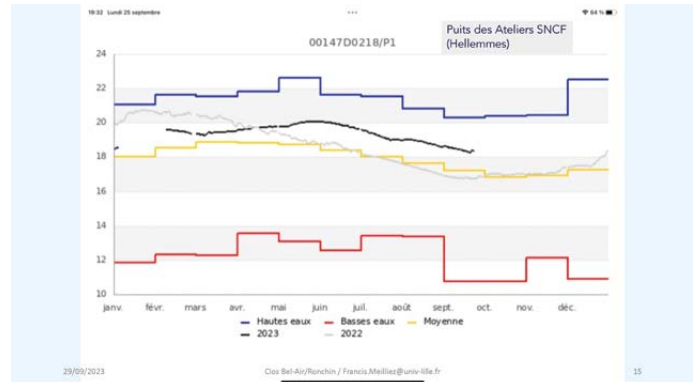


Fig. 2 – Diagramme piézométrique (nappe de la craie) aux Ateliers SNCF d'Hellemmes : noter le déficit de ressource durant le 3^e trimestre 2022 et l'hiver 2023.

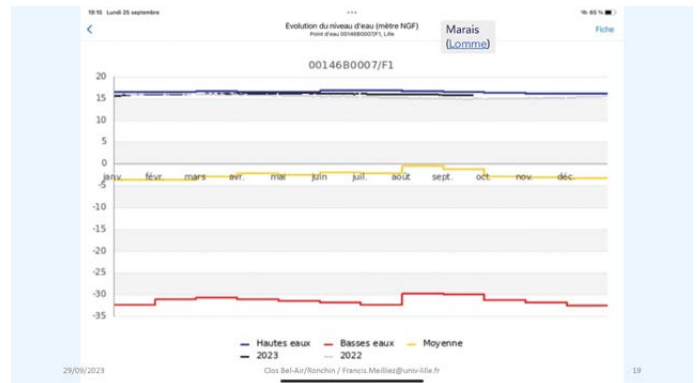


Fig. 3 – Diagramme piézométrique au Marais de Lomme : la nappe exploitée est la nappe alluviale de la Deûle, quasi constante.

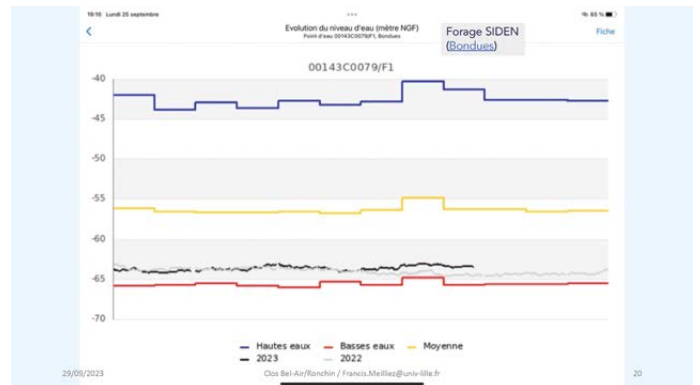


Fig. 4 – Diagramme piézométrique à Bondues (nappe de la craie) : sous une épaisse couverture tertiaire, la nappe de la craie ne s'est pas rechargée ni en 2022, ni en 2023.

LES ANCIENS AMÉNAGEMENTS AGRAIRES D'UNE ZONE HUMIDE : LA PLAINE DE LA SCARPE, DE L'ANTIQUITÉ À L'ÉPOQUE MODERNE

Ancient agrarian managements in wetlands: the Scarpe plain, from Antiquity to modern times

Étienne Louis

Archéologue, conservateur en chef du patrimoine honoraire. UMR 8529, IRHiS
etienne.louis930@gmail.com

UN CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET HYDROLOGIQUE PARTICULIER

Située dans le nord de la France, entre Douai et Valenciennes, la plaine de la Scarpe est une vaste zone dépressionnaire, longue d'environ 30 km, sur 6 à 15 de large (Fourrier 1989, p. 3), d'axe globalement ouest-est, insérée entre la plaine un peu surélevée et argileuse de la Pévèle au nord (Yprésien) et le plateau crayeux (Coniacien-Turonien) à recouvrement

limoneux de l'Ostrevent au sud (Fig. 1). Sa morphologie actuelle résulte de la mise en place de dépôts argilo-sableux éoliens et alluviaux durant les dernières périodes froides, spécialement au Dryas récent. Les principales dépressions, paléoméandres et thermokarsts, sont ensuite envahies par les tourbes holocènes (Deschodt 2019). Jusqu'aux travaux systématiques de drainage de la fin du XIX^e s., la plaine, conventionnellement délimitée par l'isohypse des 20 m d'altitude, est une vaste zone humide (Robaut 1834). Elle est drainée par la

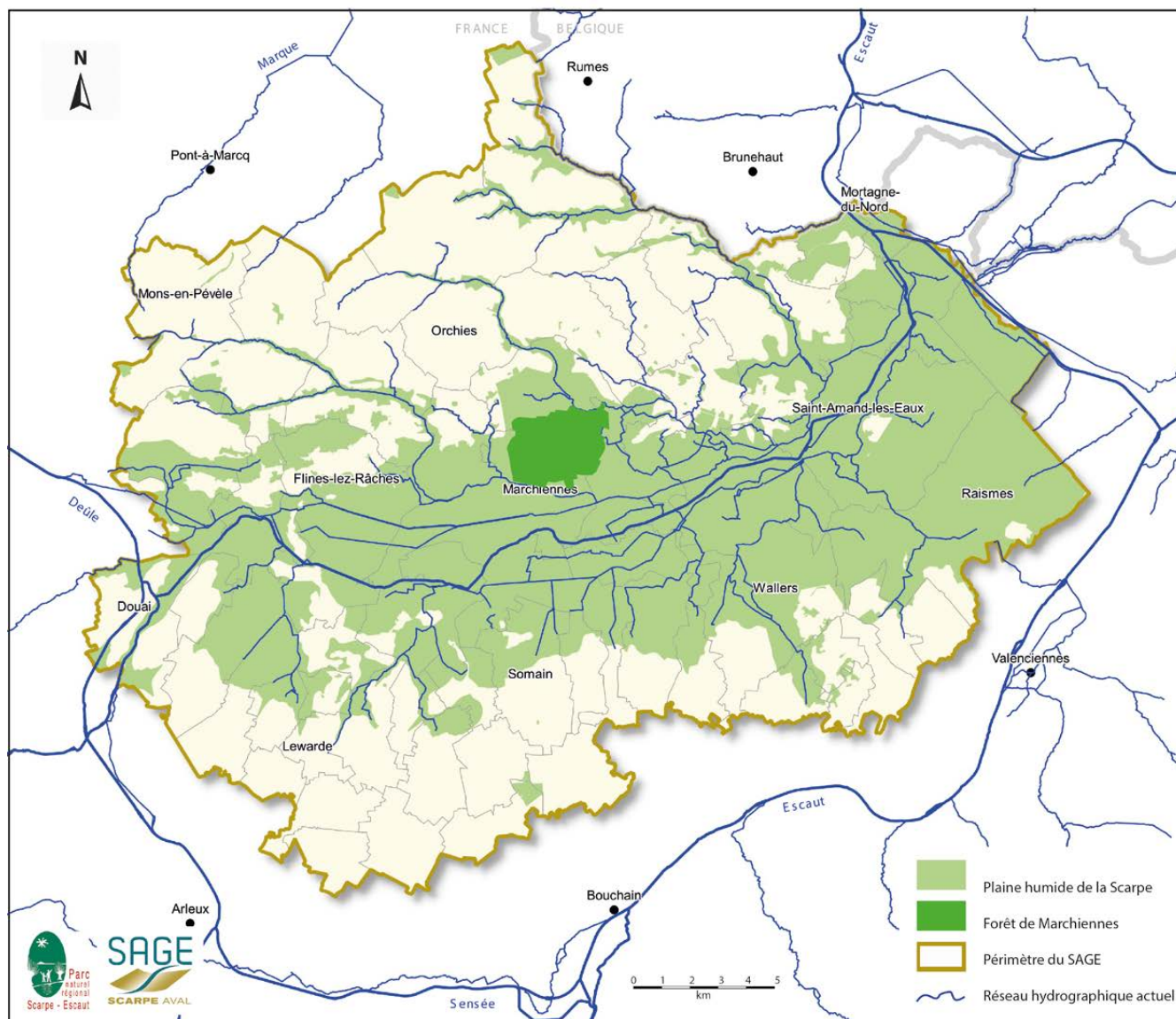


Fig. 1. – La plaine humide de la Scarpe et la forêt de Marchiennes. Document SAGE / PNR Scarpe-Escaut, modifié.

Fig. 1 – The Scarpe wet plain and Marchiennes forest. Document SAGE / PNR Scarpe-Escaut, modified.

Scarpe-aval, ou Scarpe inférieure, depuis les portes de Douai jusqu'au confluent avec l'Escaut à Mortagne-du-Nord. Avant le X^e s., la Scarpe inférieure était alimentée par trois ruisseaux issus des plateaux de l'Artois et de la Gohelle : l'Escrebieux, la rivière de Goelzin et le Boulენrieu ou Vieille-Rivière, un cours d'eau depuis longtemps artificialisé provenant du secteur de Dourges. Il faut y ajouter toute une série de petits affluents de rive gauche, provenant des hauteurs de la Pévèle (ruisseau de Coutiches, ruisseau de Beuvry, Elnon, etc.).

Des travaux de canalisation, que l'on date aujourd'hui du X^e s., font déverser dans la plaine la Scarpe supérieure, ou Scarpe-amont, provenant d'Arras, jadis affluent de la Sensée (Louis 2009). Des travaux récents ont montré que cet apport d'eau conséquent a provoqué un engorgement significatif de la plaine (Deschodt 2015, p. 5). Il ne fait toutefois aucun doute qu'antérieurement, et depuis les débuts de l'Holocène, le secteur constituait déjà une « zone humide », au sens actuel des géographes¹.

DES MARAIS AMÉNAGÉS AU MOYEN ÂGE ET À L'ÉPOQUE MODERNE

Les principaux événements de l'histoire de la mise en valeur de la plaine sont connus (Deudon 2015). Durant la première partie du Moyen Âge, la plaine de la Scarpe est largement couverte de forêts, y compris en secteur inondable (ripisylves). Des défrichements successifs, qui ne s'achèvent que dans les années 1830, n'en ont laissé subsister que des lambeaux isolés : massif de Raismes-Saint-Amand-Wallers (4 800 ha)², forêt de Marchiennes (800 ha), bois de Faux à Marchiennes, de Bouvignies, de Flines, de Montigny, des Éclusettes à Hasnon. Le nouveau paysage créé par les défrichements médiévaux est évoqué par un moine de Marchiennes écrivant dans les années 1116-1121 : « *Le site de Marchiennes est entouré d'eaux et de marais à roseaux. [...] la terre arable située dans une courbe est légèrement surélevée, elle est sableuse et infertile, bien que chaque habitant apporte fréquemment du fumier sur sa petite parcelle (portiuuncula). [...] Aux environs, la terre arable est resserrée et rare parce que le faible écoulement du cours de la rivière et les écluses des moulins provoquant de fréquentes inondations, la terre jadis fertile s'est trouvée noyée et est devenue marais. [...] De chaque côté de la rivière, [à Marchiennes] il y a de grands prés et partout de très abondantes herbes de marais. Plus loin s'étend une grande forêt d'arbres en pleine croissance qui donnent du bois pour tous types de construction et pour le feu.* » (Histoire-polyptyque, § 3 et 17, Delmaire 1985, traduction É. Louis).

1. Le code de l'environnement définit les zones humides comme « les terrains exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année » (article L211-1).

2. Seule une partie de ce massif appartient à la plaine de la Scarpe *stricto sensu*.

Les défrichements médiévaux ne se firent donc pas au profit des labours qui, par suite d'un assèchement très insuffisant, restent jusqu'au XVIII^e siècle, limités en superficie, mais bien de pâturages inondables plusieurs mois par an. Les premiers systèmes de drainage connus sont, aux XI^e et XII^e s., les « râches » (raisse en picard, *rascia* dans les textes latins). On en connaît 4 ou 5 dans la plaine de la Scarpe. Il s'agit de rigoles de drainage perpendiculaires ou légèrement obliques par rapport à l'axe de la plaine, permettant l'évacuation des eaux d'une zone marécageuse vers la Scarpe, sans doute en reprenant et en rectifiant de petits cours d'eau naturels. L'évocation de la « râche de Brillon » par deux textes complémentaires de 1116-1121 et 1136 permet d'en saisir le principe. Le courant naît dans « l'eau-morte » située dans la paroisse de Beuvry-la-Forêt (*a mortua scilicet aqua que iacet in parrochia de Beverui*, le marais de Quennebray). Il suit ensuite le ruisseau de Beuvry (*rivus de Beverui*) pour rejoindre la râche de Brillon proprement dit (*rascia de Breilun*), qui, elle-même, se jette dans la Scarpe (*a fluvio Scarpi usque illuc influit rascia*)³.

La très faible pente de la plaine et l'absence d'encaissement de la rivière limitent l'efficacité de ces systèmes locaux. À partir du XIII^e siècle, on voit apparaître, sur chacune des rives de la Scarpe, des rigoles de drainage parallèles à la rivière, chargées de l'égouttage des prairies en menant les eaux des marais le plus loin possible en aval, afin de bénéficier du maximum de dénivelé. Il s'agit principalement des réseaux du Décours (rive gauche) et de la Traitoire (rive droite), qui seront progressivement complétés et prolongés et finiront à la fin du XVIII^e siècle par rejoindre la confluence de l'Escaut. Ce n'est pas le lieu ici d'en retracer l'histoire bien connue (Deligne 1998). On fera simplement remarquer que, jusqu'au XVII^e s., leur extension et leur efficacité furent limitées par l'absence d'intervention d'autorité régulatrice supérieure, les travaux devant se limiter aux emprises foncières propres à chaque seigneurie ou à chaque abbaye, aux intérêts fréquemment divergents.

Si l'organisation générale du drainage de la plaine et son histoire sont assez bien connues, il n'en va pas de même au niveau du détail des parcelles. Avant la confection des cadastres napoléoniens et le lotissement systématique des marais (Dion 1988), seuls quelques plans du XVIII^e siècle nous renseignent sur l'organisation du réseau de fossés parcellaires.

On peut citer la série de plans sur parchemin représentant les 13 cantons de la seigneurie de Marchiennes⁴, le plan-terrier de la seigneurie de Râches, de 1734⁵, la *Carte generale* du village de Beuvry⁶, les plans généraux de l'échevinage de Douai (1614 et 1784) et plus spécifiquement une petite série de plans du Frais-Marais à Douai, de 1733 et 1762⁷.

3. Guerzaguet 2022, p. 262-264 et Delmaire 1985 §24.

4. Par exemple AD Nord.53fi 14 ou 53fi 242.

5. Conservé à la mairie de Râches.

6. AD Nord.53fi 56.

7. AM Douai, DD 74, DD 78, DD 85, DD 86.

Sur ces documents, deux types de paysages agraires se distinguent nettement. Les « marais », au sens agricole et administratif du terme, forment la première catégorie et sont constitués de vastes parcelles de prairies inondables, allant de quelques hectares jusqu'à 1 200 hectares d'un seul tenant au Marais des Six-Villes (Flines-lez-Râches). Elles sont entourées d'un large fossé périmétral et, pour autant que les plans anciens soient précis, semblent quasi dépourvues de structuration interne. Ce sont des propriétés seigneuriales ou communales. Le beau plan de 1698 du Marais des Six-Villes est sur ce point exemplaire⁸. Le lotissement progressif de ces marais en parcelles régulières entourées de fossés débute timidement vers 1535-1544 au Frais-Marais de Douai⁹. Il bat son plein à partir du milieu du XVIII^e s. : 1752, puis 1778 pour le marais des Six-Villes (Dion 1988), 1761 pour le Frais-Marais¹⁰. Il se généralise avec la mise en place progressive du système des « portions ménagères » à partir de 1777 (Fourdrignier 1983) ; il est pratiquement achevé lors

de l'établissement des cadastres napoléoniens (1815-1830). On peut, à titre d'exemple, comparer la représentation du marais de Guesnain sur le cadastre de l'an 12 (1803-1804) avec celle du levé cadastral suivant, de 1823 (Fig. 2).

Mais toutes les zones humides ne sont pas traitées en « marais », selon la définition ci-dessus. De larges secteurs, dès le second Moyen Âge (dès 1224 à Waziers, avant 1402 à Râches¹¹), situés généralement à la périphérie des marais en question, sont colonisés avec la trame serrée d'un parcelaire agricole plus ou moins régulier, la plupart de ces petites parcelles étant entourées d'un fossé. Il s'agit encore, presque toujours, de prairies naturelles (prés de fauche ou pâtures). La forme ramassée des parcelles montre bien qu'il ne s'agit pas de labours, l'usage de la charrue imposant un format rectangulaire allongé. Les cultures céréalières se limitent toujours aux petites éminences sablonneuses d'origine éolienne ou alluviale parsemant la plaine. Un détail du plan de Marchiennes de la seconde moitié du XVIII^e s. (secteurs d'Elpret et Lanseau), illustre le contraste entre la trame

8. <http://www.gallica.bnf.fr/ark:/12148>.

9. AM Douai DD 91-93.

10. AM Douai DD 102.

11. Louis 2021a (Râche) et Louis 2021b (Waziers).

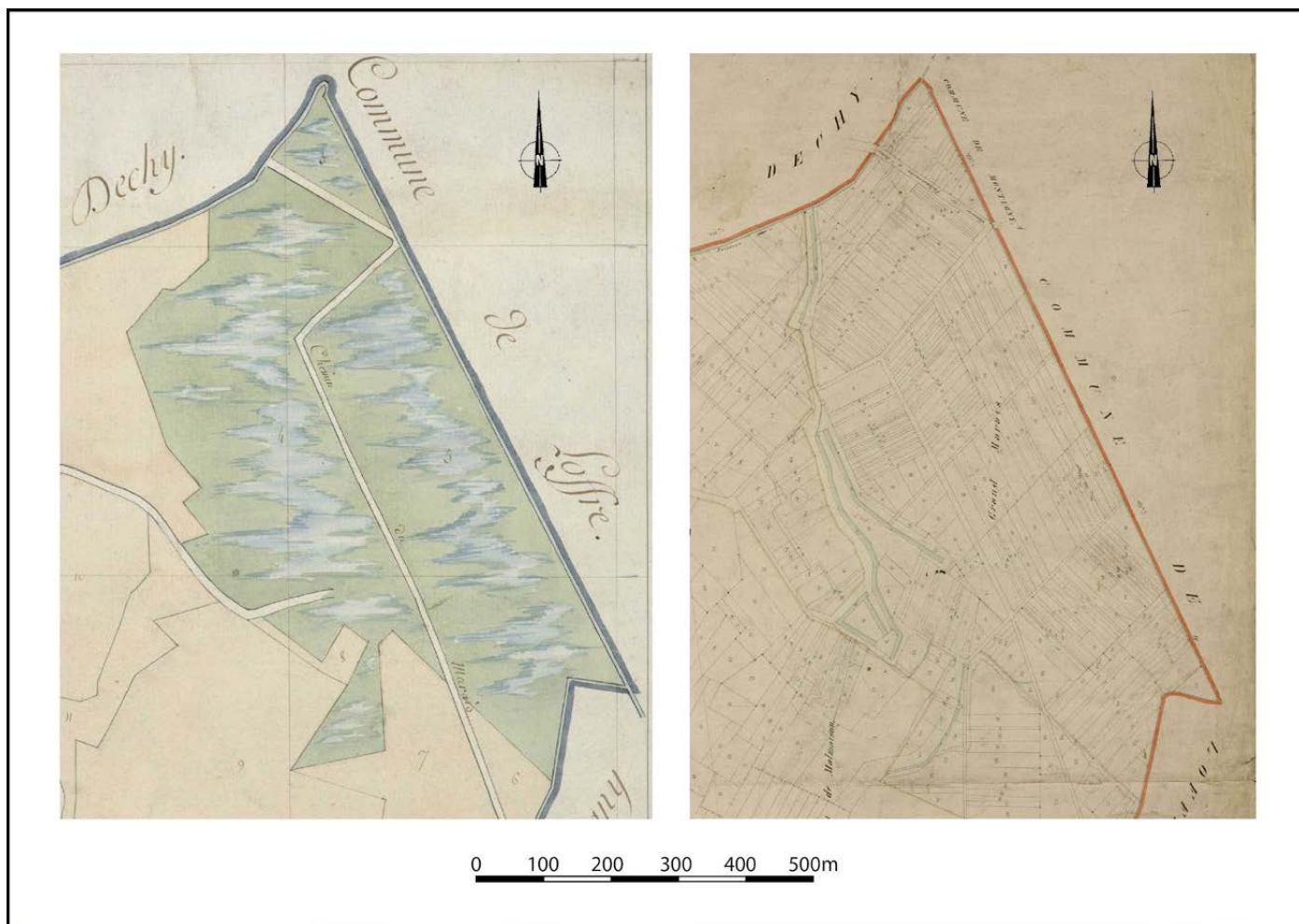


Fig. 2. – Le lotissement des marais en portions ménagère : L'exemple de Guesnain. Cadastre consulaire de l'An XII (1802-1803, AD Nord P30 / 153). Cadastre napoléonien de 1823 (AD Nord P31 / 148).

Fig. 2. – The subdivision of marshes into household portions: The example of Guesnain. Consular cadastre of An XII (1802-1803, AD Nord P30 / 153). Napoleonic cadastre of 1823 (AD Nord P31 / 148).



Fig. 3. – Petit parcellaire moderne périphérique aux grandes portions de marais. Marchiennes, canton de Lanseau, milieu du XVIII^e s. (AD Nord 53fi 19).
 Fig. 3. – Small modern parcels of land surrounding large marshland areas. Marchiennes, canton of Lanseau, mid-18th century (AD Nord 53fi 19).

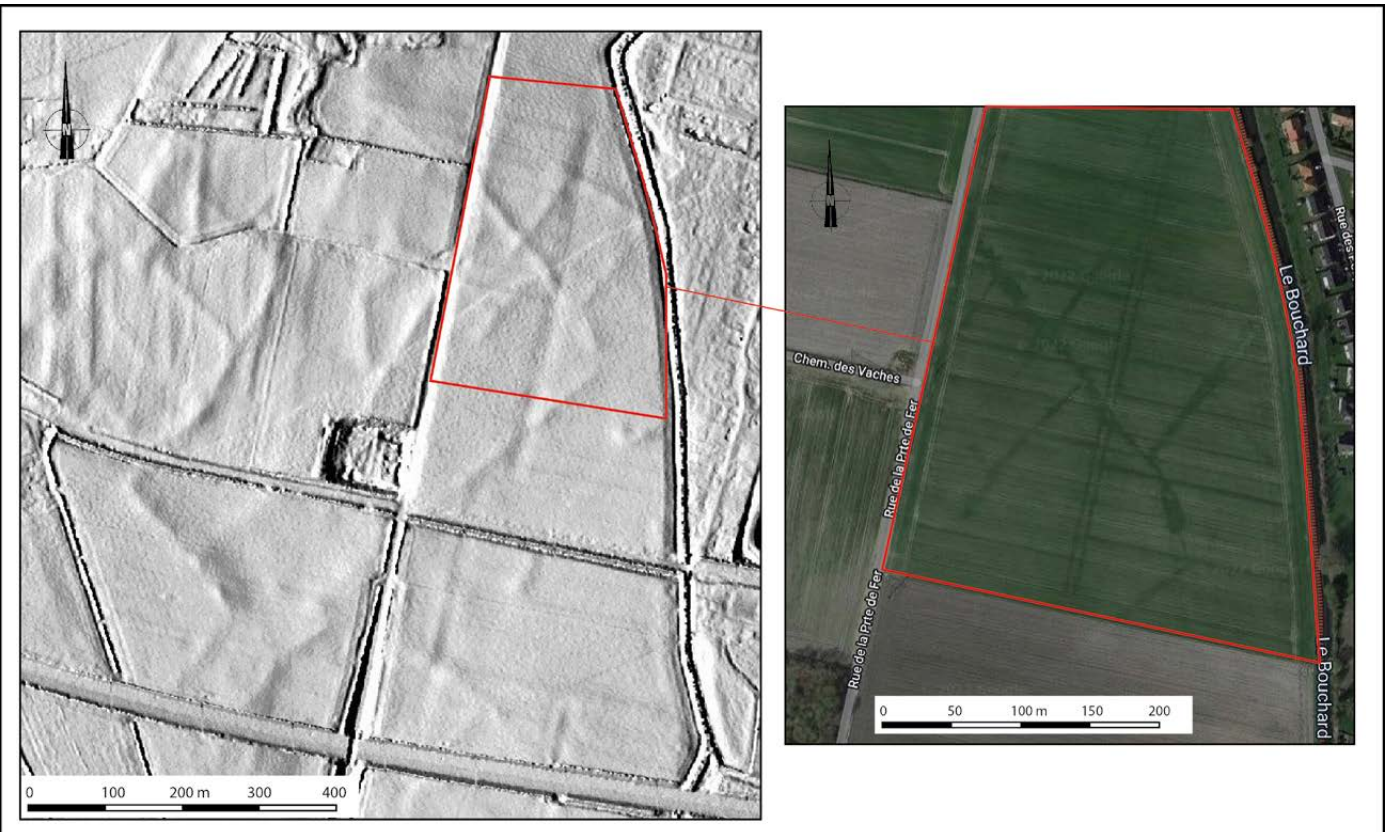


Fig. 4. – Sin-le-Noble, « Marais du Biez », parcellaire ancien, médiéval ou antique, visible sur le MNT DREAL-Scarpe et sur une photographie aérienne Google Earth.

Fig. 4. – Sin-le-Noble, « Marais du Biez », ancient, medieval or antique plot of land, visible on the DREAL-Scarpe DTM and on a Google Earth aerial photograph.

fossoyée des vastes quartiers de marais et celle des petites parcelles de prés (Fig. 3).

À défaut de plan ancien, la photographie aérienne ou l'imagerie LiDAR peuvent montrer la présence de ces anciens parcellaires fossoyés à l'emplacement de vastes parcelles de marais apparemment non structurées. C'est le cas par exemple à Sin-le-Noble, au « Marais du Biez » (Fig. 4). Ces opportunités sont cependant assez rares dans la plaine de la Scarpe et les fouilles archéologiques, trop peu nombreuses et d'ampleur trop limitée, ne permettent pas de mesurer l'étendue et l'ancienneté de ces parcellaires fossoyés implantés dans les zones humides.

LA PLAINE DE LA SCARPE : UNE RÉGION DENSÉMENT OCCUPÉE DANS L'ANTIQUITÉ

Il y a deux décennies à peine, la question de l'origine de ces parcellaires et de leurs premières extensions ne se posait pas ; il était plus ou moins entendu que, depuis le début de l'Holocène jusqu'au XII^e siècle, la plaine de la Scarpe était un quasi-désert forestier, tout juste percé par les clairières ouvertes autour des premiers établissements monas-

tiques d'origine mérovingienne : Saint-Amand (Elnone), Marchiennes, Hamage ou Hasnon¹².

On sait aujourd'hui qu'il n'en est rien. Des prospections systématiques de surface menées depuis 2002, assorties du contrôle des données réunies antérieurement par des amateurs locaux, ont montré la densité particulière de l'occupation du sol à l'époque gallo-romaine¹³. La carte archéologique du secteur de Marchiennes (Fig. 5) illustre ce phénomène. Les indices de site qui y figurent correspondent sans doute pour la plupart à de petites unités agropastorales, avec quelques grandes *villae*, plusieurs ateliers de tuiliers et quelques sites funéraires¹⁴.

Même s'il est très possible que plusieurs de ces indices de sites soient des leurres¹⁵, il ne fait guère de doute que la densité réelle de l'occupation antique soit bien supérieure,

12. Il en allait de même pour la Pévèle argileuse qui constituait naguère encore un vide archéologique.

13. 65 sites gallo-romains présumés sont enregistrés dans les bases de données des communes de Beuvry-la-Forêt, Bouvignies, Marchiennes, Tilloy-lez-Marchiennes et Warlaing, soit un site pour 60 hectares ou, selon un maillage hexagonal théorique, un site tous les 875 m

14. Selon l'usage antique, les sépultures sont installées à proximité immédiate des habitats.

15. S'agissant par exemple d'objets épars déplacés avec les fumures.

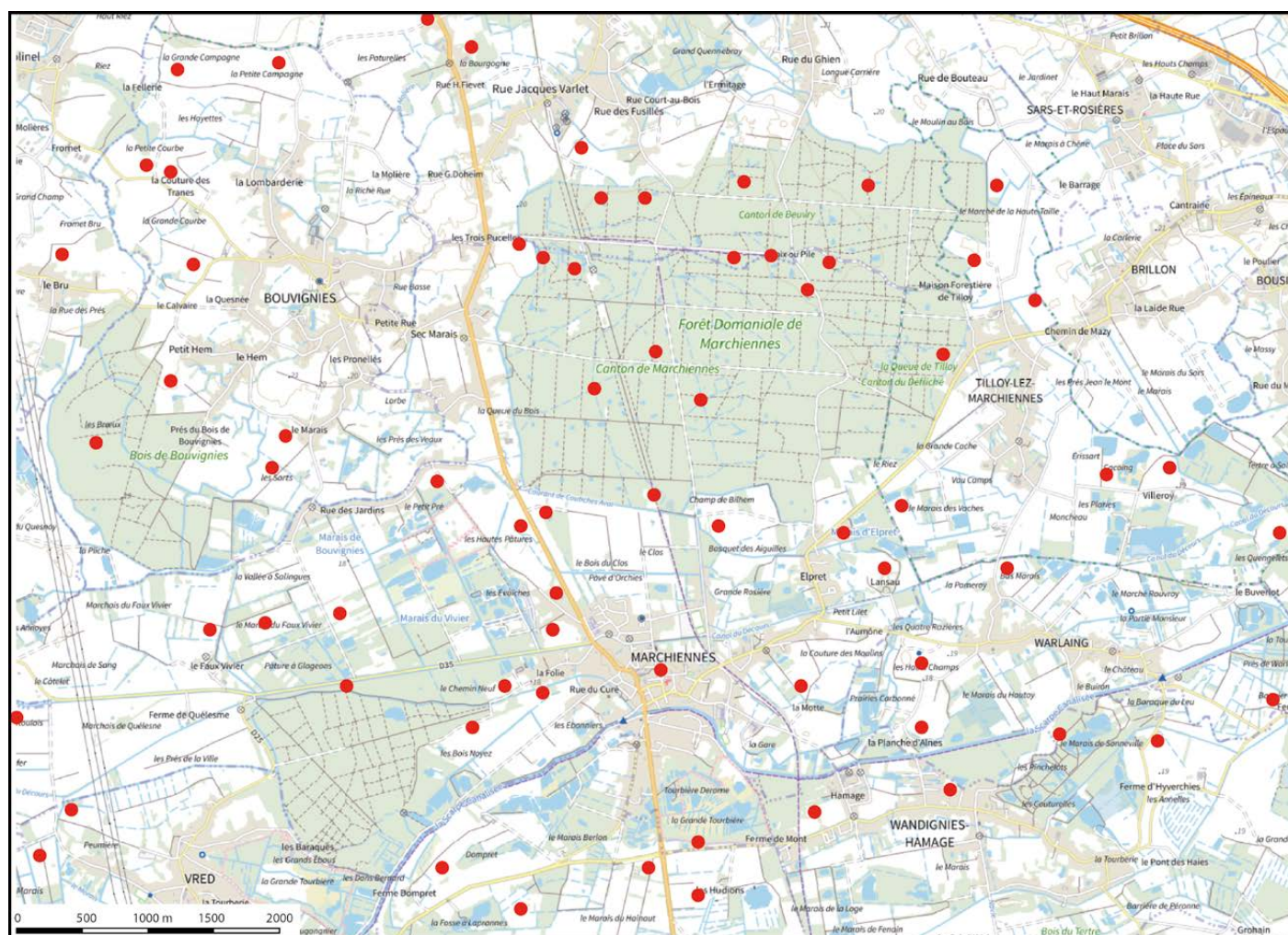


Fig. 5. – Carte archéologique du secteur de Marchiennes (sites gallo-romains). Fond de plan du site geoportail.fr
Fig. 5. – Archaeological map of the Marchiennes area (Gallo-Roman sites). Map from geoportail.fr

compte tenu des nombreuses surfaces inaccessibles à la prospection : bois privés et friches, prairies permanentes, jardins et espaces bâtis etc.

La première conclusion est que les massifs forestiers médiévaux, défrichés au XII^e siècle, toujours en place (forêt de Marchiennes) ou disparus au XVIII^e siècle (bois de Hamage ou de Tilloy) n'existent pas en tant que tel durant l'Antiquité, à tout le moins durant le haut empire romain (I^{er} - III^e s.).

S'agissant d'une zone humide a priori inaccessible à l'agriculture ou à l'élevage sans un minimum d'aménagement, la question se pose donc de l'organisation spatiale de cet espace et plus généralement des formes du paysage agraire antique et de son degré d'anthropisation.

LA FORÊT DE MARCHIENNES, UN SITE PARTICULIER, UNE ÉTUDE DE CAS PRIVILÉGIÉE

En 2020, l'auteur de cet article, conjointement à d'autres spécialistes régionaux, historiens, géoarchéologues ou personnel du parc naturel régional Scarpe Escaut, a été présenté par l'ONF, Office Nationale des Forêts, pour mener une expertise sur des traces d'aménagements anciens mal datés, repérés pour certains depuis longtemps dans la forêt domaniale de Marchiennes. Un programme de recherche a été lancé, qui est actuellement dans sa troisième année. Complétée par des reconnaissances au sol et quelques sondages ponctuels, la recherche s'appuie principalement sur la mise à disposition et l'analyse d'une imagerie LiDAR (DREAL-Scarpe 2008), permettant le relevé et la géolocalisation précise des anomalies microtopographiques sous couvert forestier. Depuis quelques années, l'usage archéologique des couvertures LiDAR a été largement médiatisé dans le cadre de recherches « exotiques », jungles mayas ou khmères. Moins connus du public, mais tout aussi productifs, de nombreux travaux analogues ont été menés en France, dans des massifs forestiers lorrains, bourguignons, picards ou ligériens.

Toutefois, à l'opposé des vestiges habituellement rencontrés et étudiés par l'archéologie en milieu forestier, constitués de pierriers, de talus et de microreliefs, le contexte géologique particulier de la plaine de la Scarpe et de la forêt de Marchiennes, évoqué plus haut, joint très concrètement à l'absence de tout affleurement de pierre ou de galets, font que les vestiges visibles sont constitués pour l'essentiel de structures en creux.

Toutefois, à l'opposé des vestiges habituellement rencontrés et étudiés par l'archéologie en milieu forestier, constitués de pierriers, de talus et de microreliefs, le contexte géologique particulier de la plaine de la Scarpe et de la forêt de Marchiennes, évoqué plus haut, joint très concrètement à l'absence de tout affleurement de pierre ou de galets, font que les vestiges visibles sont constitués pour l'essentiel de

structures en creux. D'aspect encore frais ou au contraire aux reliefs plus ou moins atténués, elles participent d'un hydrosystème complexe, en partie d'origine naturelle, mais très fortement anthropisé, constitué principalement de mares plus ou moins aménagées et de fossés dispersés sur l'ensemble du massif. Ces derniers forment des réseaux complexes largement interconnectés où il est possible d'observer des recoupements et des superpositions, et donc potentiellement de définir une chronologie relative (Fig. 6).

Les deux premières campagnes de recherche (2021 et 2022) ont été essentiellement consacrées au recueil de l'abondante documentation d'archive, largement inédite, ainsi qu'à la reconnaissance et à l'analyse des aménagements « forestiers » les plus « récents », attribuables de la fin du Moyen Âge jusqu'au XIX^e siècle. Il s'agit principalement de chemins, de fossés de limites de tailles¹⁶, de fossés de drainage connectant des secteurs antérieurement isolés, d'aménagements de mares (d'origine plus ancienne), de drainages ponctuels en merlons ou en « lègres¹⁷ », de traces d'anciens défrichements etc. À l'issue de ces deux années, et à la grande surprise de l'auteur, il est apparu que la plupart des traces d'aménagement révélées par le LiDAR ou observées in situ appartenait clairement à une strate nettement plus ancienne, indubitablement associée à des sites d'occupation gallo-romains, et constituant un remarquable réseau parcellaire antique couvrant la totalité des 800 hectares du massif forestier actuel.

16. Depuis le XIII^e s., la forêt de Marchiennes est divisée en 12 ou 13 « tailles » exploitées par rotation annuelle.

17. Les lègres sont des parcelles rectangulaires étroites et très allongées, au sol surélevé en étalant les déblais des fossés périphériques. Le mot est utilisé traditionnellement dans le marais de St-Omer. Dans la plaine de la Scarpe, il est utilisé par les agents du parc naturel régional pour désigner des aménagements comparables, faute de terme local, ou français correspondant.

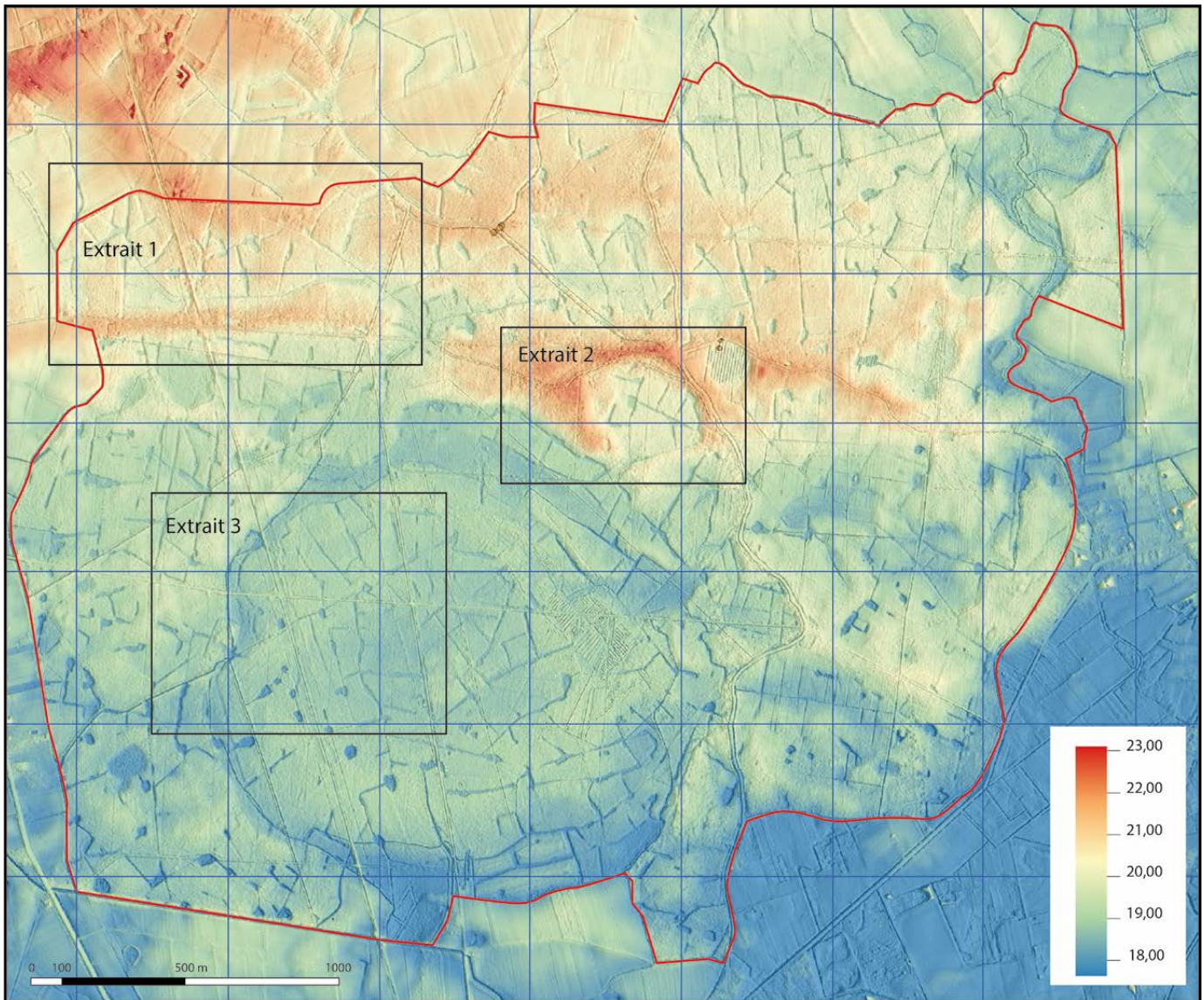


Fig. 6. – Modèle numérique de terrain de la forêt de Marchiennes et de ses abords. Situation des 3 extraits du SIG présentés dans le texte.
Fig. 6. – Digital terrain model of the Marchiennes forest and surrounding area. Location of the 3 GIS extracts shown in the text.

CARACTÉRISATION D'UN PAYSAGE ANTIQUE EN MILIEU HUMIDE

Pour cette présentation préliminaire, on s'appuiera sur trois extraits du SIG en cours de réalisation pour l'ensemble du massif.

Le premier extrait (parcelles 19 à 22, environ 8,5 hectares) concerne l'extrémité nord-ouest de la forêt (Fig. 7). Il montre que les structures en creux, mares et fossés de largeurs variables, sont réparties en étroite corrélation avec la microtopographie locale. Creusées en réseau serré dans les secteurs situés entre 19 et 20 m d'altitude; elles sont absentes sur les points hauts, au-delà de 21 m d'altitude. La seule exception, révélatrice, correspond à un enclos d'habitat et/ou d'exploitation, d'une superficie d'environ 0,9 hectare (en rouge sur le plan), entouré de fossés de faible ampleur. Plusieurs traces de bâtiments y ont été repérées, associées à du mobilier gallo-romain. Cette « ferme » de plan classique, à la tête d'un petit réseau parcellaire local (dont manque la partie septentrionale, hors forêt), a été implantée sur un léger relief. À l'exception de la zone d'habitat, les mares et les fossés ne forment pas de figures fermées ou d'enclos; on peut donc difficilement parler de « parcellaire » au sens strict, même si un certain nombre d'axes plus ou moins nord-sud semblent se dessiner. On comprend bien que ce type d'aménagement en mares et en larges fossés de plan irrégulier est incompatible avec l'exploitation de champs labourés. Il ne peut donc s'agir, dans les zones basses, que de pâtures.

On notera encore qu'à une date tardive, sans doute non antérieure au XVIII^e ou au début du XIX^e s., un effort particulier de drainage a été mené, en creusant de longs et étroits fossés destinés à connecter les vieilles dépressions d'origine antique. Certains de ces fossés d'interconnexion sont figurés sur le cadastre de 1817 (Beuvry, section A3). Enfin, à l'extrémité sud-ouest de l'extrait présenté, un autre habitat gallo-romain a été observé, en limite de la forêt, sur un cordon sableux surélevé pléistocène d'origine éolienne. Voilà qui pourrait suggérer que ce cordon dunaire ait servi dans ce secteur de limite méridionale « naturelle » au « domaine » exploité par la ferme de la parcelle 20.

Le second extrait concerne 3,75 hectares environ, situés au cœur de la forêt, dans les parcelles 23 à 25, à proximité du carrefour actuel de « Croix ou pile » que connaissent bien les promeneurs (Fig. 8). Il illustre l'étroite inféodation des aménagements agraires antiques au modelé naturel hérité du Pléistocène. Le prolongement oriental du cordon dunaire évoqué précédemment est entamé par une dépression circulaire presque fermée de 320 m de diamètre environ, d'origine très probablement thermokarstique. Le réseau de fossés antiques ne concerne que les secteurs situés en dessous de 20,50 m d'altitude et épargne totalement le bourrelet périphérique sablonneux situé au-dessus de cette cote. Là encore,

l'habitat antique fait exception, avec un enclos rectangulaire d'environ 50 x 100 m de côté, accosté de 2 mares et qui semble constituer le foyer d'un système de fossés rayonnants. Un autre habitat gallo-romain est situé plus à l'ouest au sommet du cordon dunaire. Il n'a été décelé que par la présence de tessons épars, le contexte naturellement bien drainé de l'éminence sablonneuse ne justifiant pas à l'époque le creusement de fossés drainants et se prêtant mal aujourd'hui à la conservation de microreliefs d'origine anthropique.

Le troisième et dernier extrait présenté (Fig. 9) couvre environ 7,15 hectares, dans les parcelles 35-37 et 61-63. C'est une partie d'une vaste zone circulaire déprimée de quelque 1 500 m de diamètre (Fig. 6), tout entière située entre 18,00 et 20,00 m d'altitude. Le réseau de mares et de fossés antiques recouvre l'ensemble du secteur et dessine assez clairement un système parcellaire à mailles irrégulières tendant toutefois vers des modules rectangulaires allongés. Une dépression un peu plus marquée, du nord au sud, correspond vraisemblablement à un écoulement temporaire saisonnier qui, aux époques historiques, n'a jamais correspondu à un véritable ruisseau. Dans l'Antiquité, ce pseudo-talweg a clairement structuré le paysage en étant souligné par une série de fossés, repris à la fin du Moyen Âge et à l'époque moderne par une importante limite de taille. Deux enclos rectangulaires, livrant de très nettes traces de bâti et d'occupation, se situent à 400 m l'un de l'autre. Ils mesurent chacun 60 à 70 m de large sur 150 m de long.

On notera que, dans aucun des 3 extraits présentés, on n'a pu repérer de chemin de desserte ou de connexion entre les différents noyaux d'habitat. Pour l'ensemble de la forêt, un seul chemin antique a été identifié, à son extrémité orientale, sur près de 1 500 m. Il est matérialisé par 2 fossés parallèles distants d'une douzaine de mètres et dessert un vaste enclos avec traces de bâti. Il faut croire que les autres modestes noyaux d'occupation ne justifiaient pas de tels investissements. Peut-être n'étaient-ils pas accessibles aux véhicules lourds, comme ce fut le cas jusqu'au XVIII^e s. dans bien des secteurs de la plaine de la Scarpe.

Dans l'état actuel de la recherche, la répartition des noyaux d'habitat et des présumés centres d'exploitation est très inégale. On a vu que certains d'entre eux, dépourvus d'enclos fossoyés, sont très difficilement détectables. Outre la question de la dispersion, celle de la chronologie n'est pas résolue. La période antique est longue : plus de 4 siècles, et tous ces noyaux ne sont peut-être pas exactement contemporains. L'irrégularité de la trame parcellaire, même mis de côté la question de l'adaptation à la topographie naturelle, plaide également pour une mise en place progressive, dont la chronologie fine nous échappe. L'hypothèse d'une origine pour partie antérieure à la conquête romaine ne peut être écartée. D'autre part, la date, le caractère éventuellement

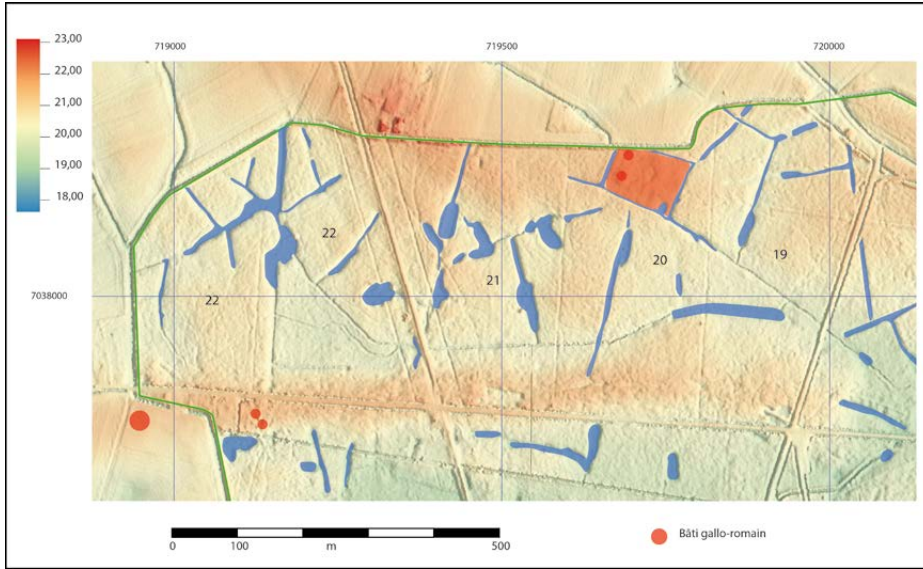


Fig. 7. - Extrait n° 1 du SIG de la forêt de Marchiennes (parcelles 19 à 22); Aménagements antiques.

Fig. 7. - Extract no. 1 of the Marchiennes forest GIS (plots 19 to 22); Ancient developments.

Fig. 8. - Extrait n° 2 du SIG de la forêt de Marchiennes (parcelles 23 à 25); Aménagements antiques.

Fig. 8. - Extract no. 2 of the Marchiennes forest GIS (plots 23 to 25); Ancient developments.

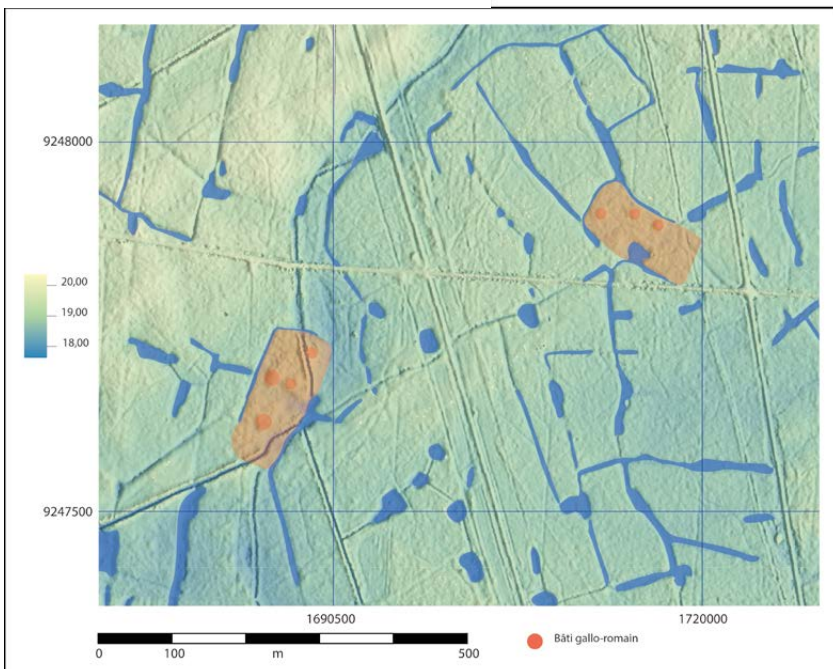
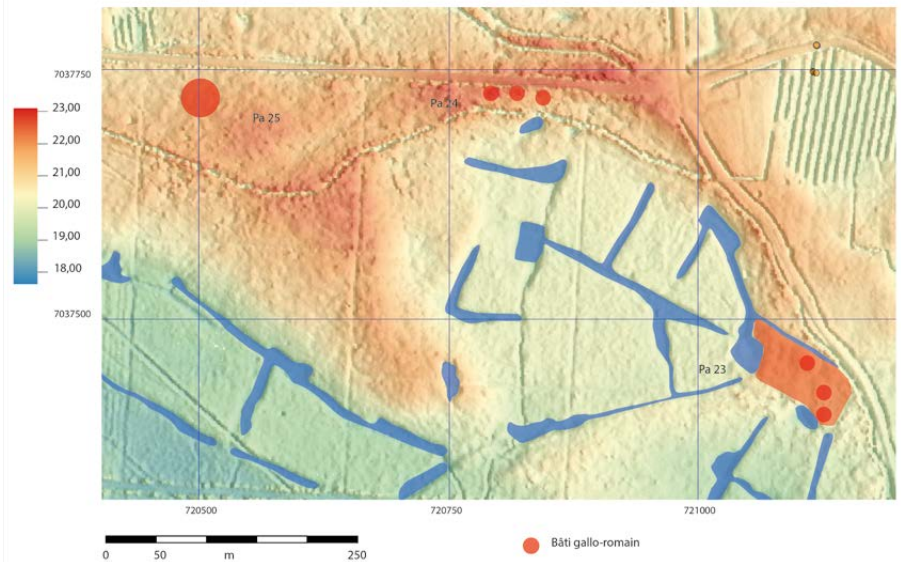


Fig. 9. - Extrait n° 3 du SIG de la forêt de Marchiennes (parcelles 35 à 37 et 61 à 63); Aménagements antiques.

Fig. 9. - Extract no. 3 of the Marchiennes forest GIS (plots 35 to 37 and 61 to 63); Ancient developments.

progressif de la disparition de ce paysage agraire ouvert, et donc les modalités du retour à la forêt (de toute manière avant le VII^e siècle) restent également des questions ouvertes.

Toutefois, la problématique majeure relative aux aménagements gallo-romains de la forêt de Marchiennes tient évidemment à la fonction précise des réseaux fossoyés (un drainage, sans doute mais pour quoi faire ?), et plus globalement aux aspects économiques de ce paysage rural. Quelles sont les places respectives de l'élevage extensif, des enclos de stabulation, des prés de fauche, de la céréaliculture, de systèmes de haies, des parcelles boisées...

Ces questions devront être abordées avec l'apport de la palynologie et, dans la mesure du possible, de la carpologie et de l'anthracologie. Encore faut-il identifier des dépôts organiques (tourbeux par exemple) datables de la bonne période et surtout non perturbés par l'activité biologique récente. La recherche de ces perles rares est ardue et se poursuit.

Quoi qu'il en soit, les recherches menées dans la forêt de Marchiennes illustrent d'ores et déjà l'importance de la mise en exploitation des zones humides de l'intérieur des terres à l'époque romaine sur le territoire des actuels Hauts-de-France.

EAU ET ACTIVITÉS TECHNIQUES DANS LE NORD AU XIII^E SIÈCLE

Water and technical activities in the north in the XIIIth century

Bernard Maitte

Professeur émérite des universités.

Bernard.Maitte@univ-lille.fr

LE CARNET DE VILLARD DE HONNECOURT

C'est un manuscrit sur parchemin composé de 33 folios 14 x 22 cm¹, couvert en recto-verso de dessins et commentaires ; relié, il est conservé à la BNF². Au verso du premier folio, on lit la dédicace : « *Villard de Honnecourt vous salue, et prie tous ceux qui de ces engins œuvreront – qu'on trouvera en ce livre – qu'ils prient pour son âme et qu'ils leur souviennent de lui (...)*³ ». Le carnet contient des représentations, plus ou moins stylisées, géométrisées, de personnages, scènes de la vie - religieuse ou non -, chevaliers et leurs armures, musiciens et leurs instruments, statues, animaux, ornements, meubles, rosaces, fenêtres, pavements, mosaïques, vitraux, charpentes et lanternes, procédés de constructions (de piliers, voûtes et ponts...), plans de nefs et de chevets, élévations d'architectes. Entre autres peuvent y être identifiés des éléments des églises de Cambrai, Chartres, Laon, Reims, Saint-Quentin, Vaucelles... Cet article s'intéresse à d'autres représentations : celles qui concernent des engins et instruments mus par la force de l'eau, celle-ci jouant, lors de la « révolution industrielle du XIII^e siècle », un rôle analogue à la machine à vapeur au XIX^e et au pétrole au XX^e.

On sait peu de choses sur Villard de Honnecourt, né vers 1200 à Honnecourt-sur-Escout, à une heure de marche de Vaucelles (il s'y élevait une splendide abbaye, un château, un moulin – à eau –, totalement rasés en 1917 au cours du conflit mondial, comme beaucoup de monuments et ouvrages dans la région). Il a voyagé dans toute celle-ci, est allé à Meaux, Reims, Chartres, Lausanne, Pilis en Hongrie. La sureté de son trait est telle que l'on peut le croire architecte et artiste, *architecte-ingénieur*, passionné de problèmes techniques, relevant les procédés utilisés (mais qui, comme Léonard de Vinci, commet des erreurs en reproduisant des machines), en inventant d'autres (il croit avoir résolu le problème du mouvement perpétuel) ; artiste se plaisant à représenter feuillages et draperies, jeux de lignes dont sortent parfois figures humaines ou statues détachées de l'édifice, stylisées, épurées ; homme en recherche surtout, voulant résoudre des problèmes de construction, montrant la complémentarité de tous les corps de métiers qui coopèrent pour faire un

édifice et veut aller plus loin et ailleurs que ses prédécesseurs, « disputant⁴ » avec ses contemporains.

L'EAU DANS LES ACTIVITÉS HUMAINES AU XIII^E

Dans l'article « La cathédrale d'Amiens, ses matériaux, sa construction⁵ » (Belin & Maitte, 2019), les auteurs soulignent que le chapitre de la cathédrale exploite des carrières choisies pour « rapprocher les lieux d'extraction et de chantier, pouvoir utiliser les voies d'eau aptes aux transports que sont l'Avre, la Selle, la Somme » : ce rôle des cours d'eau dans les transports et pour minimiser les coûts est bien connu, point besoin d'y insister. Mais que l'eau serve aussi de force motrice principale dans une région où le relief est très faible peut surprendre. C'est que, les ouvrages ou traces qui restent de cet usage le montrent, les cours d'eau sont dérivés vers les machines, leurs débits régulés ou augmentés au moyen de biefs, béals*, bisses*, canaux, vannages, bassins de rétentions, conduites forcées, ouvrages de maçonneries diminuant la profondeur ou restreignant la largeur du cours d'eau ; les solides charriés étant retenus par grilles, tamis, filtres. Les hommes de cette époque veulent dépasser leurs prédécesseurs, inventent la production en série, créent et font évoluer l'art gothique, veulent transmettre leurs pratiques et découvertes : c'est cette fonction que remplit le carnet de Villard quand il décrit divers outils et machines, dont la scie hydraulique et celle pour ajuster des pilotis.

La scie hydraulique

La scie que représente Villard (Fig. 1) est une machine automatique à deux temps : le mouvement circulaire des roues, transmis par un arbre, est converti en mouvement alternatif de la scie et fait aussi avancer le bois vers la scie. Le cours d'eau est représenté en haut à gauche. Il fait tourner la roue à aubes dont l'axe porte une roue dentée et quatre cames. La roue dentée fait avancer la pièce de bois à scier, maintenue entre quatre guides. Les cames appuient sur un des bras articulés qui soutiennent une des extrémités de la scie verticale, l'autre est maintenue par une perche flexible

4. La *disputatio*, art d'opposer les arguments afin d'en tirer la synthèse est la méthode, héritée de Pierre Abélard, utilisée par les universités naissantes pour enseigner.

5. J.-J. Belin, B. Maitte, *La cathédrale d'Amiens, ses matériaux, sa construction*, Ann. Soc. Géol. Nord, T. 26 (2^e série), Déc. 2019, p. 47 - 57.

1. On estime que plus de la moitié des folios ont été perdus.

2. Numérisé sur Gallica, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b10509412z/fl.item.zoom>

3. Le texte est en picard, nous adoptons une graphie française.

solidement fixée (à droite) à une poutre sur laquelle sont aussi fixées les extrémités des bras articulés. En appuyant sur un bras, la came fait descendre la scie et courbe la perche. Celle-ci, grâce à sa flexibilité fait remonter la scie dès que la came a cessé d'appuyer sur le bras. Dans son mouvement alternatif haut-bas, l'axe des bras articulés (donc la scie) reste vertical car il est maintenu par un logement pratiqué dans une poutre, non représentée.

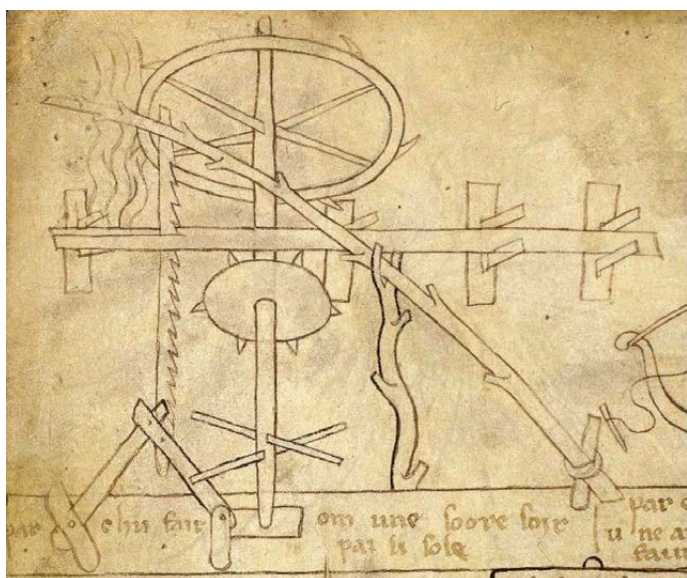


Fig. 1. – Carnet de Villard de Honnecourt, folio 22 V.
Fig. 1. – Villard de Honnecourt notebook, folio 22 V.

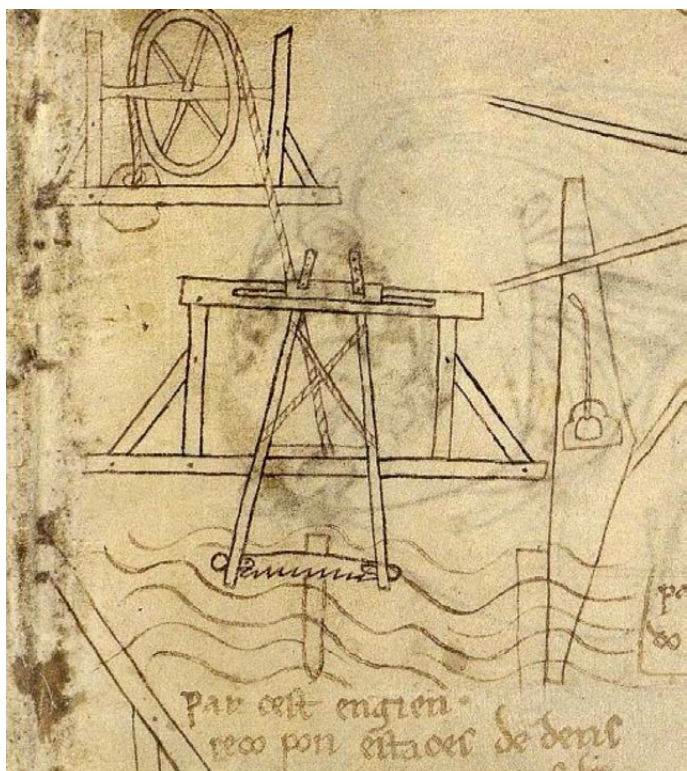


Fig. 2 : Carnet de Villard de Honnecourt, folio 23 R.
Fig. 2. – Villard de Honnecourt notebook, folio 23 R.

La machine à scier des pilotis dans l'eau.

Cet outil (fig. 2) permet de scier automatiquement à une même hauteur des pilotis enfoncés dans l'eau et devant soutenir une plateforme, des fondations de piles de ponts etc. Voici comment la décrit J.-B. A. Lassus⁶. La scie est « ...fixée horizontalement à un bâti qui sort de l'eau et qui repose sur une plate-forme, sur laquelle les ouvriers la font glisser en lui imprimant un mouvement de va et vient. Le contre poids appliqué à une corde attachée à la scie sert à la presser contre le pieu à recéper, de façon qu'elle avance sans cesse dans le trait qui a été commencé. Le niveau et le fil à plomb, placés à côté le long d'un pieu, ont pour but de montrer la nécessité de s'assurer de leur verticalité. » La technique a été perdue à la Renaissance. L'article « Pont » de l'Encyclopédie décrit sa réalisation par de Vauglie, après 1737.

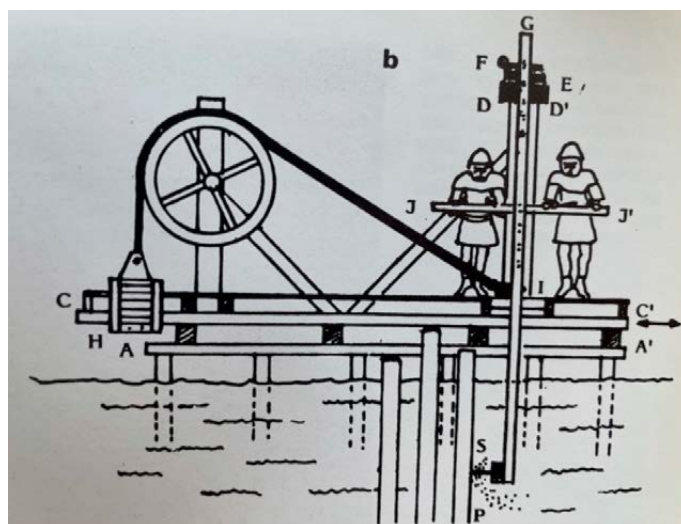


Fig. 2 bis : Interprétation de la fig. 2 (Machine à scier des pilotis dans l'eau)
Coupe schématique du dispositif : AA' support provisoire (plancher posé sur des pieux enfoncés dans le lit du fleuve); CC' support qui se translate sur le plancher; DD' support sur lequel coulisse l'élément E solidaire aux bras G et G' (invisible), qui tendent la lame de scie S en pivotant autour de I (et I' invisible); F clavette de réglage de G et G'; J - J' barre de manœuvre de va-et-vient de la scie. La pièce mobile horizontale dont la coupe est en I permet d'appliquer fortement la scie S contre le pilot P à couper grâce au contre poids H. D'après R. Bechmann, Villard de Honnecourt..., Paris, Le Picard, 1991, p. 235.

Fig. 2 bis: Interpretation of fig. 2 (Pile sawing machine in the water)
Schematic cross-section of the device: AA' temporary support (floor placed on piles driven into the river bed); CC' support which translates on the floor; DD' support on which slides the element E attached to the arms G and G' (invisible), which tension the saw blade S by pivoting around I (and I' invisible); F adjustment key for G and G'; J - J' bar for manoeuvring the saw back and forth. The horizontal moving part at I allows the saw S to be pressed firmly against the pilot P to be cut, thanks to the counterweight H. Adapted from R. Bechmann, Villard de Honnecourt..., Paris, Le Picard, 1991, p. 235.

6. Album de Villard de Honnecourt, architecte du XIII^e siècle, manuscrit publié en fac-similé annoté par J.-B. A. Lassus, Paris, 1858; p. 148, cité par J. Gimpel, in Carnet de Villard de Honnecourt, Paris, Stock, 1986, p. 32.

Le pont Standardisé

Au Moyen-Âge, on construit surtout des ponts en bois, faciles à mettre en œuvre et à détruire en cas d'arrivée d'un ennemi. Ils peuvent être édifiés d'une seule portée ou sur des piles préexistantes. Le pont de Villard représenté sur le folio 39 (Fig. 3) est construit entre deux piles de maçonnerie. La légende précise « *de cette façon on fait un pont par-dessus une eau avec des pièces de fûts de vingt pieds de long* ». On remarque en effet que tous les fûts de bois sont égaux (environ 6 à 7 m), seuls deux contreventements ayant une longueur de moitié moindre. La portée du pont est donc de 24 à 28 m. Les rondins sont liés avec des cordes. Cette technique est analogue aux structures tubulaires métalliques utilisées depuis le XX^e (inconnues au XIX^e). Les deux portiques situés au-dessus des piles de pierre sont utilisés pour lancer le pont : on y attache des cordes qui permettent de descendre les cadres triangulaires, trapézoïdaux ou rectangulaires préfabriqués. Une telle standardisation est adoptée pour tailler les pierres destinées aux murs, voûtes ou colonnes de la cathédrale d'Amiens (voir note 5)

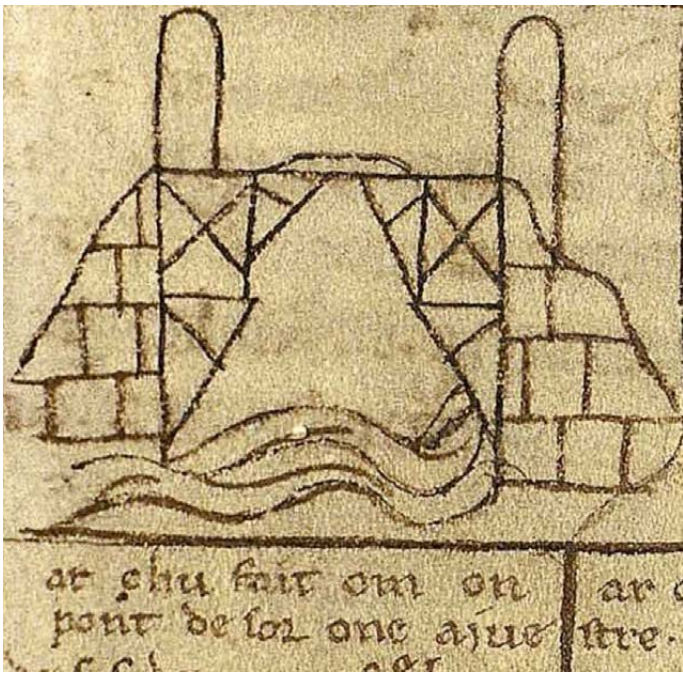


Fig. 3 : Carnet de Villard de Honnecourt, folio 19 V.
Fig. 3. – Villard de Honnecourt notebook, folio 19 V.

L'EAU DANS LE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE

C'est l'usage de la force motrice de l'eau qui a permis, en grande partie, la révolution industrielle du XIII^e et l'expansion cistercienne (les cisterciens ont fait usage de nombreuses machines à eau, ont automatisé de nombreuses fonctions, afin de s'affranchir de l'utilisation de la main-d'œuvre humaine). La France du XX^e siècle, voit disparaître les derniers vestiges

de cette civilisation : à Saint-Jean de Belleville (Savoie), au début des années 1970, il reste un moulin et deux scieries à eau. Le moulin est abandonné à la mort du dernier meunier, les scies sont d'abord reconverties lors de la construction du barrage de La Coche (1972), un barrage souterrain de turbinage-pompage qui tarit les sources et diminue le débit des torrents⁷ : à sa mise en service, EDF offre aux artisans-scieurs un moteur électrique, destiné à remplacer la force motrice de l'eau, et l'abonnement correspondant. Pas la consommation électrique, énorme en raison des volants d'inertie associés aux scies hydrauliques. Les propriétaires ne peuvent que fermer leur entreprise à la réception de la première facture. Cet exemple le montre : le « tout électrique » ne peut constituer une solution pour atténuer le dérèglement climatique actuel. « L'ère des réseaux » (dissociation entre les sources d'énergie et les lieux d'utilisation), qui commence avec l'approvisionnement en charbon des machines à vapeur, continue par la distribution du gaz d'éclairage, puis des hydrocarbures naturels, enfin de l'électricité, a amené beaucoup de souplesse dans la mise à disposition des ressources et de l'utilisation énergétiques, favorisé le développement économique et social, mais aussi la surconsommation, l'épuisement des ressources de la planète, le réchauffement climatique. Tout ceci prouve qu'il faut changer de modèle, en adopter un autre qui soit sobre, plus économe et mieux pensé. L'utilisation de l'électricité confère la souplesse : il convient de ne point s'en priver, mais de l'utiliser en complément ou pour des usages spécifiques (télécommunications, hydrolyse etc.). Penser et réaliser cette complémentarité est un défi : une piste est de consommer sur le lieu de production, avec un seul convertisseur, le maximum de ressources énergétiques possible (machines hydrauliques, chauffage solaire passif, etc.), les compléter, si besoin, par l'électricité (où plusieurs convertisseurs sont nécessaires⁸ et la perte en ligne obligatoire). Pour aller vers ce type de développement, pour redonner à l'eau un rôle insigne comme ressource énergétique renouvelable, pour redévelopper la navigation locale, peu onéreuse, aussi, des investissements sont nécessaires, tels ceux dont été capables de mobiliser les contemporains de Villard de Honnecourt. Comme celui-ci l'a fait, il convient aussi de coupler recherche historique, observation, innovation, invention et se mettre l'esprit en éveil pour sortir de la tradition et ouvrir des pistes nouvelles.

7. Le turbinage permet la production d'électricité, puis le déversement des eaux dans le barrage d'Aigueblanche, près de 1 000 m plus bas ; le pompage prend, aux heures creuses, des eaux dans ce barrage et les remonte à La Coche. Sur le plan de la physique, cette opération coûte de l'énergie, beaucoup, puisque tout convertisseur a un rendement très inférieur à 1. Sur le plan économique, il bénéficie de la différence de tarification heures pleines/heures creuses, permet de réguler la production, constante, des centrales nucléaires, l'électricité qu'elles produisent étant utilisée pendant les heures creuses pour remonter l'eau, le turbinage d'augmenter la puissance électrique disponible en heures pleines.

8. Convertir l'énergie mécanique du vent en électricité (parcs d'éoliennes), puis convertir l'électricité en énergie mécanique est une aberration sur le plan de la seule physique.

BILAN DE LA RESSOURCE EN EAU DU BASSIN ARTOIS-PICARDIE

Water resource assesment within the Artois-Picardie Basin

Olivier Prévost

DREAL Hauts-de-France

olivier.prevost@developpement-durable.gouv.fr

RAPPELS SUR LE GRAND CYCLE DE L'EAU

La planète étant sphérique, la quantité d'eau qui entre dans sa composition peut être considérée comme fixe, dès lors que les échanges avec l'espace hors de la stratosphère sont considérés comme équilibrés. Il est admis (de Marsily, 2009) que 1 380,5 millions de kilomètres cubes d'eau sont présents sous forme liquide en surface et dans la croûte terrestre, et qu'un volume égal à double est contenu dans le manteau terrestre. Entre autres, cette eau interne permet la dynamique interne du globe, et contribue à la tectonique des plaques, laquelle modifie la géographie en permanence. Cependant une large part (97,5 %) de l'eau de surface est salée. Sur les 2,5 % restants, 1,9 % se trouvent temporairement figés dans les glaces. En conclusion, moins de 1 % de l'eau qui entoure la Terre est douce et suffit à la vie sous toute ses formes (Fig. 1).

L'eau est en perpétuel mouvement entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et le vivant. Le grand cycle de l'eau alimente l'atmosphère par évaporation, et la redistribue par précipitation. Le transit continental se fait par

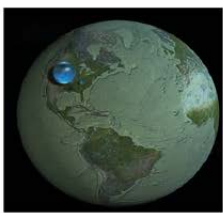
divers mécanismes (ruissellement, infiltration) qui en différencient la durée, et par conséquent engendrent des stocks en équilibre dynamique (océans, lacs, cours d'eau, nappes souterraines). Au passage, le vivant utilise les remarquables propriétés physico-chimiques de l'eau pour en retirer, *versus* lui confier, des éléments minéraux essentiels à son métabolisme. A l'échelle de la planète, les mouvements dans les fluides (atmosphère, hydrosphère) sont déterminés par les paramètres mécaniques astronomiques, modulés localement par les effets de relief de la lithosphère. On qualifie de climat ces interactions, dont les variations zonales justifient l'hétérogénéité de répartition de l'eau autour du globe (Fig. 1).

LE BASSIN ARTOIS-PICARDIE

La loi de 1964 (Loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964) qui a institué les agences de bassin, a constitué un composite avec ce bassin, bien qu'il soit le plus petit (20 000 km² ; 3,6 % du territoire) en France (Fig. 2). Il regroupe trois ensembles : les bassins versants de tous les fleuves côtiers de Bray-Dunes à Mers-les-Bains ; l'amont du bassin versant de la Sambre, rattaché pour

La ressource en eau

La ressource naturelle en eau douce sur un territoire dépend du climat. Sa disponibilité est influencée par les conditions géographiques et géologiques



- Eau salée : 97,5 %
- Eau douce : 2,5 %
- 1,9 % glace
- 0,6 % eau liquide



Cycle de l'eau

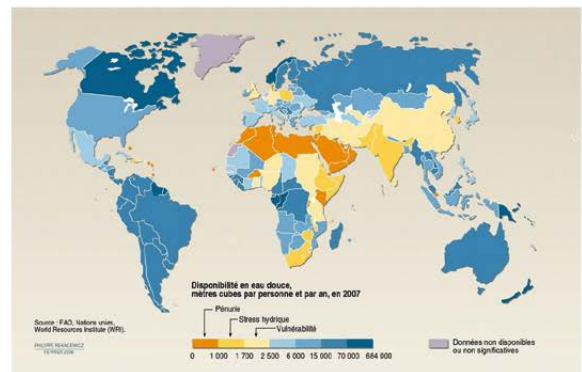


Fig. 1 – Le grand cycle de l'eau : Le volume d'eau douce disponible, rapporté au globe, n'est qu'une goutte. Bloc-diagramme schématique du cycle de l'eau en un site donné [source : <https://professionnels.ofb.fr/en/node/126>]. Carte de la répartition mondiale des précipitations (source FAO Nations unies, World Ressources Institute) : la partie méridionale du continent asiatique et la frange orientale du continent africain sont à la fois très peuplées et pauvres en précipitations.

Fig. 1 – The great water cycle: The volume of available fresh water, relative to the globe, is only a drop. Schematic block diagram of the water cycle at a given site [source : <https://professionnels.ofb.fr/en/node/126>]. Map of the global distribution of precipitation (source FAO United Nations, World Resources Institute): the southern part of the Asian continent and the eastern fringe of the African continent are both highly populated and poor in precipitation.

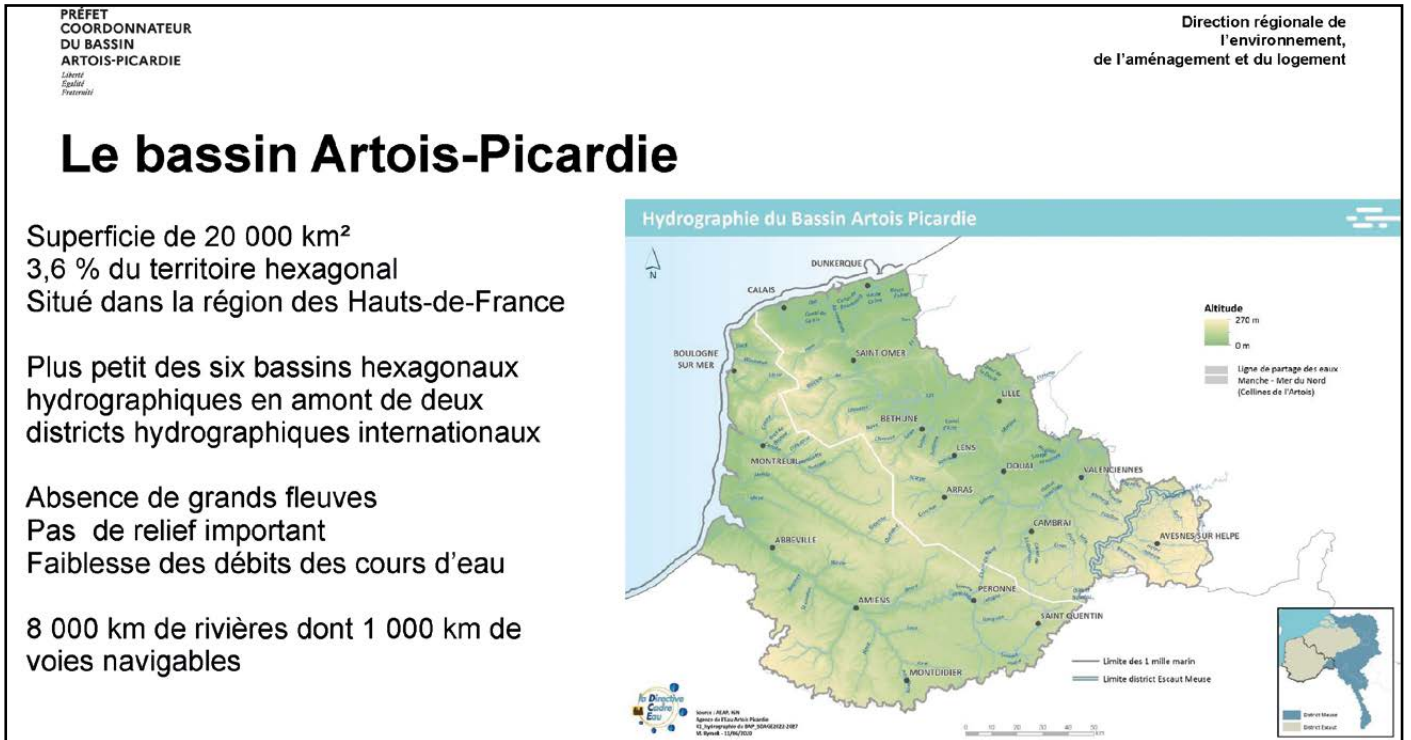


Fig. 2 – Le bassin Artois-Picardie : extrait de L'état des milieux des districts hydrographiques Escaut, Somme & cours d'eau côtiers Manche, mer du Nord, Meuse (partie Sambre), parties françaises-Annexes cartographiques p. 4.
 Fig. 2 – The Artois-Picardie basin: extract from the state of the environments of the river basin districts Escaut, Somme & coastal waterways Channel, North Sea, Meuse (Sambre part), French parts - Cartographic appendices p. 4.

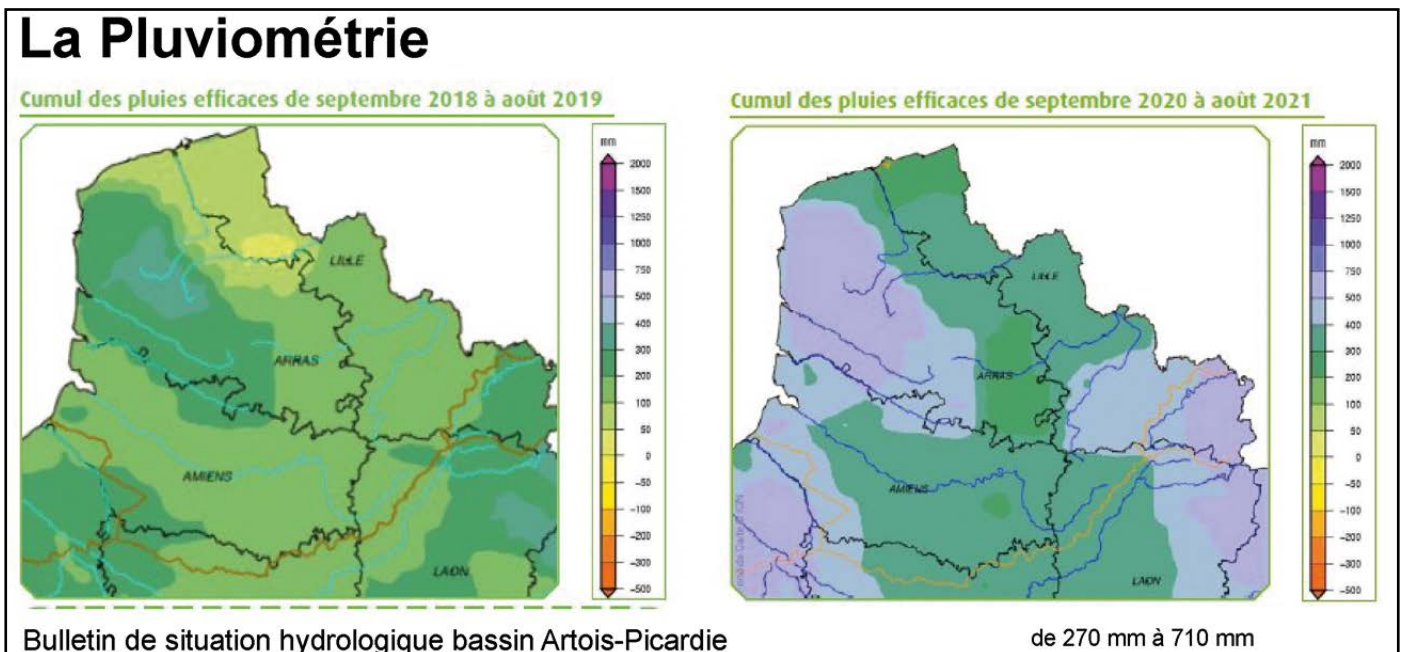


Fig. 3 – La pluviométrie régionale qui assure le renouvellement. [Bulletin de situation hydrologique bassin Artois-Picardie- Bilan de l'année hydrologique : septembre 2020 - août 2021, p. 7 & septembre 2018 - août 2019, p. 7]
 Fig. 3 – The regional rainfall which ensures renewal. [Hydrological situation bulletin Artois-Picardie basin - Review of the hydrological year: September 2020 - August 2021, p. 7 & September 2018 - August 2019, p. 7]

le reste à l'Agence de bassin Rhin-Meuse, et surtout l'amont du bassin versant de l'Escaut. Le réseau hydrographique est dense : 8 000 km de cours d'eau, dont 1 000 de voies navigables. Sa caractéristique est de ne comporter aucun fleuve au débit d'étiage suffisamment important et régulier pour participer de façon significative à la ressource. La faiblesse du relief ne favorise pas le débit. Pour l'essentiel (96 %), la ressource prélevée par l'espèce humaine est donc d'origine souterraine.

La géologie régionale est formée d'un socle, avant-pays sédimentaire de la chaîne varisque (Paléozoïque), plissé et faillé, surmonté en discordance d'une mince couverture méso-cénozoïque (moins de 300 m au nord du Pays de Bray). Le socle affleure dans le Boulonnais, quelques fonds de vallées artésiennes et surtout en Avesnois. Les synclinaux de Calcaire Carbonifère y constituent les principaux aquifères locaux, soit en position libre (Avesnois, Boulonnais), soit captifs entre Armentières-Lille et Tournai - Valenciennes. Dans la couverture, la Nappe de la Craie est le principal aquifère régional ; elle est en position libre sur la majeure partie du territoire régional, et captive là où l'érosion n'a pas encore enlevé les terrains tertiaires. Les nappes locales qui contiennent ces derniers ont longtemps été la ressource des localités qui couronnent les buttes picardes ; c'était aussi la nappe principale en Flandres où, de ce fait, l'habitat pouvait être plus dispersé que sur les pays crayeux. Aujourd'hui cette eau (nappe des sables landéniens) n'est pas utilisée pour la production d'eau potable, à cause de sa faible productivité ; elle est réservée aux usages industriels et agricoles.

Sans surprise, le renouvellement par les précipitations est relativement plus important sur les aires les plus hautes : revers de l'Artois jusqu'à l'Authie, Avesnois, Pays de Bray (Fig. 3). Dans l'absolu, la quantité d'eau annuelle n'est pas

plus importante que dans le sud marocain, mais elle est plus largement distribuée au long de l'année.

PRÉLÈVEMENTS ET USAGES

Un tableau (Fig. 4) illustre la structure des prélèvements et usages en 2016, répartis selon deux origines d'une part, de surface ou souterraine, et quatre destinations d'autre part : eau potable, usages agricoles, usages industriels et le renouvellement des canaux. Ce dernier poste est le plus important en volume. L'eau potable est essentiellement d'origine souterraine, ce qui justifie les précautions nécessaires face à la vulnérabilité des nappes. Dès qu'un polluant s'infiltré, il n'est guère possible de le circonscrire pour l'extraire ; la seule mesure de défense est de condamner les captages situés en aval de l'écoulement souterrain, et d'attendre que la dilution naturelle opère. Ce qui peut prendre plusieurs années. Le deuxième poste de prélèvement concerne l'industrie. Le tableau montre une diminution. Depuis 2000, les volumes prélevés ont quasiment été divisés par deux. Cela tient à une amélioration des process de fabrication industrielle, encouragée par l'Agence de Bassin d'une part, mais hélas aussi à la désindustrialisation qu'a connue le territoire sur la même période d'autre part. L'agriculture reste stable, avec une faible orientation à la hausse. Depuis 2016, lors des années de sécheresse, les prélèvements pour l'irrigation agricole ont fortement augmenté avec une pointe à plus de 80 Mm³, soit plus du double.

La consommation en eau des ménages sert à 93 % aux besoins de nettoyage et à l'hygiène, et seulement 7 % aux besoins alimentaires. Un ménage consomme entre 150 et

Les prélèvements							
Origine de l'eau	Prélèvements (en Mm3) en 2016 pour un usage ...						Part
	Eau potable	Agricole	Industriel	Total			
eau de surface	→ 22	1	↘↘	90	↘	113	22%
eau souterraine	→ 299	34	↘	72	↘	405	78%
Artois - Picardie	→ 321	35	↘	162	↘	518	100%
		62%		7%		31%	

Tableau 38 : Répartition des volumes d'eau prélevés par origine

Légende du Tableau 38 : Évolution des pressions depuis 6 ans (quand la donnée est disponible).
 ↘↘ au moins -20% ; ↘ entre -20 et -5% ; → entre -5 et +5% ;
 ↗ entre +5 et +20% ; ↗↗ au moins +20%.

94 % de la production d'eau potable à partir des eaux souterraines

Réalimentation des canaux 440Mm3 prélevés dans les eaux de surface

Fig. 4 – Tableau des prélèvements : extrait de L'état des milieux des districts hydrographiques Escaut, Somme & cours d'eau côtiers Manche, mer du Nord, Meuse (partie Sambre), parties françaises- tableau 38, p. 78]

Fig. 4 – Table of withdrawals: extract from The state of the environments of the river basin districts Escaut, Somme & coastal watercourses Channel, North Sea, Meuse (Sambre part), French parts - table 38, p. 78]

200 litres par jour en France, moins de 30 dans les villes d’Afrique.

A la nécessaire prise de conscience de cette distorsion géographique s’ajoute celle liée aux produits manufacturés, à la fabrication desquels l’eau prend une part significative : 140 litres pour une tasse de café, 1 500 litres pour un kilo de blé, 2 000 litres pour un tee-shirt en coton, 8 000 pour un jean en coton, 40 000 litres pour une tonne de papier, 2 millions de litres pour une tonne de plastique, 125 millions de litres pour une tonne d’aluminium. Il n’est pas plus rassurant de constater la consommation individuelle : 6 à 12 litres pour une chasse d’eau, 60 à 80 litres pour une douche, 150 à 200 litres pour un bain, plusieurs milliers de litres pour le remplissage d’une piscine. Un site internet permet de suivre l’évolution des consommations :

<http://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/product-gallery>.

FAIRE FACE À LA DEMANDE D’EAU POTABLE

Les épisodes de sécheresse de ces dernières années ont montré la fragilité du maintien de l’ensemble des usages et le lien fort entre qualité et quantité. Que les captages soient abondants autour des centres urbains n’est pas étonnant. La contrepartie est que la vulnérabilité à toutes formes de pollution l’est également. L’usage des pesticides, engrais, herbicides n’est pas restreint au milieu rural. Environ 750 captages, sur les 1 600 du territoire régional (≈ 47 %) sont dégradés par les nitrates ou les pesticides (Fig. 5). La faiblesse des pendages des couches aquifères et le faible relief contribuent à la lenteur des transferts dans la masse. Le retour à un équilibre de bonne

qualité est donc très long après un accident ; on dit que les nappes sont peu réactives. Par ailleurs, même si les textes existent depuis longtemps (loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964, relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution et au niveau européen directive 91/271/CEE du 21 mai 1991, relative au traitement des eaux résiduaires urbaines), le raccordement obligatoire à l’assainissement contrôlé, individuel ou collectif, en tout point de la région, n’a été de fait réalisé que depuis quelques années. L’adduction à l’eau potable a été obtenue plus rapidement. Dans l’intervalle de temps entre les deux, un certain nombre de puits privés (habitat particulier) a été reconverti en fosse d’aisance, aménagée au mieux en fosse septique. Ce qui a constitué une source diffuse de nitrates durant quelques années. Un travail reste à faire pour le renouvellement des réseaux anciens (porosité, casse, mauvais/absence de raccordement), l’amélioration du traitement de certaines stations (obsolescence, traitement du temps de pluie) et la conformité des systèmes d’assainissement autonomes (30 % conformes, état des lieux 2019).

Le constat est que les solutions curatives (dilution/traitements) atteignent leurs limites (coûts, efficacité, dilution d’eaux de plus en plus dégradées...), de même que le transfert d’eau sur de longues distances (coûts, disponibilités, ...) dans le contexte de changement climatique. Ceci nécessite une prise de conscience et une action collective forte à court, moyen et long terme tant sur le plan quantitatif que qualitatif.

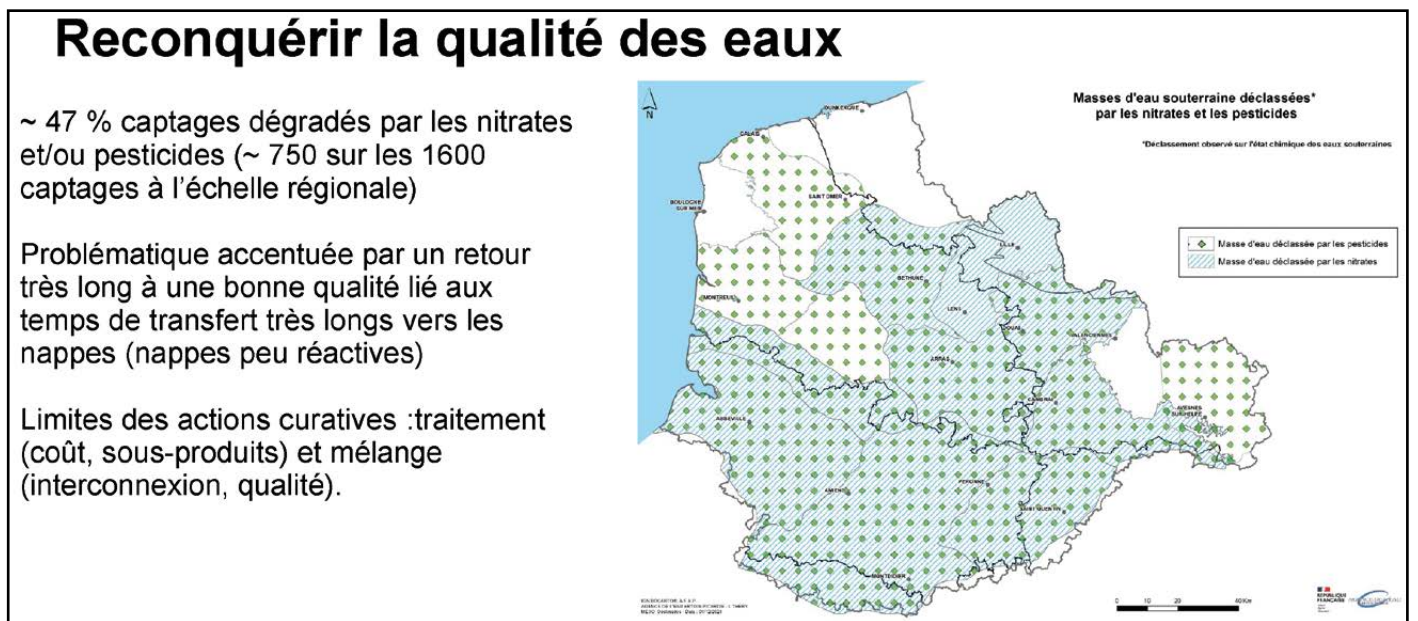


Fig. 5 – Masses d’eau souterraine déclassées par les nitrates ou les pesticides [Agence de l’eau Artois-Picardie-L.Thery_MESO_déclassée, 01/12/2021]
 Fig. 5 – Groundwater bodies declassified by nitrates or pesticides [Artois-Picardie Water Agency-L.Thery_MESO_déclassified, 01/12/2021]

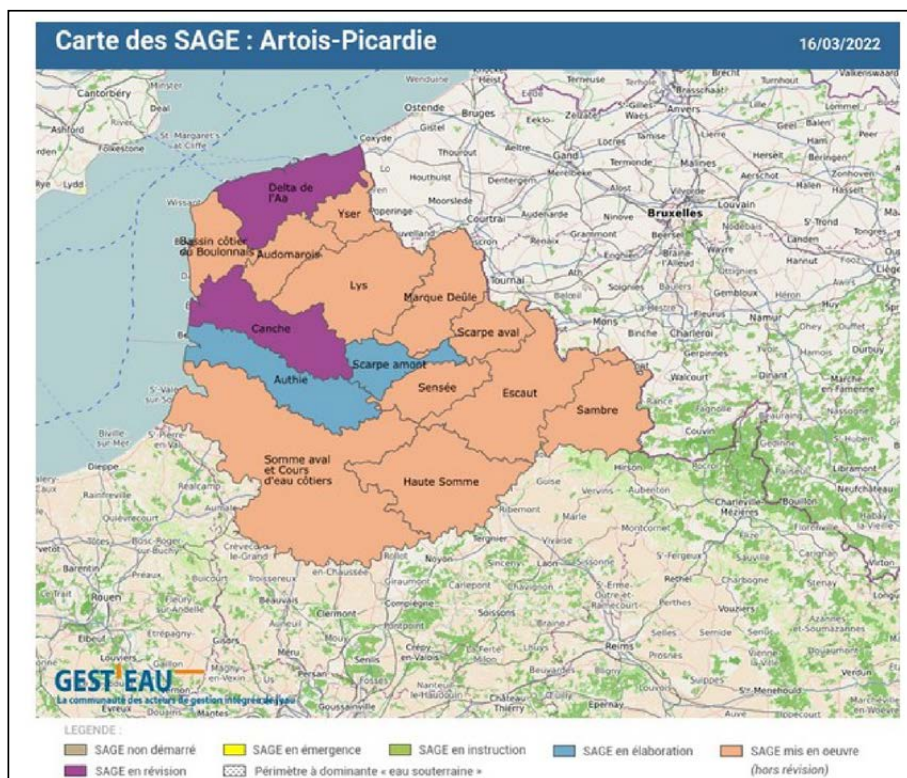


Fig. 6 – Carte des territoires gérés par un SAGE [https://www.gesteau.fr/sage/map/bassin/FR000001]
 Fig. 6 – Map of territories managed by a SAGE [https://www.gesteau.fr/sage/map/bassin/FR000001]

UNE VOLONTÉ DE RÉAGIR : LE PROJET DE TERRITOIRE POUR LA GESTION DE L'EAU (PTGE)

Les Assises de l'eau qui se sont tenues en 2018-2019 (<https://www.ecologie.gouv.fr/assises-leau>) ont fait émerger 3 objectifs prioritaires :

- ✧ Protéger les captages d'eau potable pour garantir une eau de qualité à la source ;
- ✧ Économiser et mieux partager l'eau pour préserver une ressource vitale ;
- ✧ Préserver nos rivières et nos milieux humides.

Le 1^{er} février 2022, le Premier Ministre concluait 9 mois de concertation (*Varenne agricole* : <https://agriculture.gouv.fr/mots-cles/varenne-de-leau>) avec les acteurs du monde agricole afin de développer une meilleure résilience devant les contraintes imposées par l'évolution climatique. Concernant l'eau, le but majeur était de l'économiser et d'en mieux gérer le partage. Ce qui a été décliné en objectifs :

- ✧ Réduire les fuites des réseaux.
- ✧ Favoriser l'infiltration des eaux de pluie.
- ✧ Réduire les prélèvements d'eau de 10 % en 5 ans et de 25 % en 15 ans.
- ✧ Tripler les volumes d'eaux non conventionnelles réutilisées d'ici 2025.
- ✧ Favoriser les économies d'eau dans les secteurs agricole et industriel.
- ✧ Élaborer des projets de territoires pour la gestion de l'eau.

Ce dernier projet est destiné à réguler les actions sur un périmètre cohérent d'un point de vue hydrologique et hydrogéologique. Il est élaboré dans la perspective d'équilibrer sur la durée les besoins avec les ressources en eau, de parvenir à une certaine sobriété dans les usages de l'eau, de préserver la qualité des eaux et la fonctionnalité des systèmes aquatiques, d'anticiper le changement climatique et ses conséquences sur la ressource en eau pour s'y adapter. Une instruction gouvernementale du 7 mai 2019 précise les trois étapes de sa réalisation :

- ✧ Mise en place d'une structure de concertation entre les différents acteurs et usagers concernés.
- ✧ Réalisation d'un diagnostic.
- ✧ Élaboration concertée et partagée d'un plan d'actions et de règles de gestion des prélèvements.

La structure de concertation qui s'impose naturellement est celle du territoire sur lequel est défini un schéma d'aménagement et de gestion de l'eau (SAGE), structure mise en place par la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992, dite "loi sur l'eau". Ce territoire est bâti autour d'un bassin versant (Masson, 2021) (Fig. 6) ; les relations entre bassins versants relevant d'une Agence de l'Eau sont gérées par un schéma directeur (SDAGE : Vatin & Euverte, 2021). Depuis, le plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau (30 mars 2023) a établi une feuille de route avec 53 mesures pour l'eau : <https://www.gouvernement.fr/preservons-notre-ressource-en-eau/les-53-mesures-du-plan-eau>

DÉTERMINATION ET ÉVOLUTION DES TENSIONS QUALITATIVES SUR LE BASSIN ARTOIS-PICARDIE

Une étude importante est enclenchée ; elle se déroule en quatre phases :

1. Un diagnostic de l'état des ressources.
2. Une analyse prospective sur la gestion de la ressource.
3. Des propositions de sécurisation de l'alimentation en eau.
4. La détermination d'un volume prélevable sur un territoire en tension.

Sans entrer dans les détails, quelques points de méthode peuvent être précisés. A partir des mesures directes sur le terrain (précipitations, ruissellements, évapotranspiration, RFU), divers indicateurs ont été définis, notamment pour affiner l'estimation des variations saisonnières de la disponibilité. Deux modes de calculs ont été menés : sur les relevés de l'année 2017 d'une part, sur une moyenne évaluée pour la tranche de temps 1981-2010. Ils ont permis de construire une simulation de la recharge issue d'une pluie fictive homogène. La comparaison de ces estimations de recherche avec les prélèvements réels, et leurs variations saisonnières, conduit à cerner les territoires en tension, ou menaçant de le devenir.

L'analyse prospective a été menée pour 2030 d'une part, 2050 d'autre part, en déclinant régionalement deux scénarios retenus par le GIEC (<https://www.ipcc.ch/>) à titre d'hypothèses de travail : IPSL-RCP4,5 est retenu comme scénario optimiste (légère augmentation de la température et de la pluviométrie) ;

CRNM-RCP8,5, scénario pessimiste qui voit une augmentation de la température quotidienne et une baisse de la pluviométrie annuelle. Sans surprise, ces calculs conduisent à envisager une baisse de 5 % de l'eau disponible d'ici à 2030 et 12 % d'ici à 2050. La traduction géographique de ces perspectives dans l'étendue du bassin Artois-Picardie ne laisse que la Picardie et le Hainaut sans menace de tension identifiée à ce jour (Fig. 7).

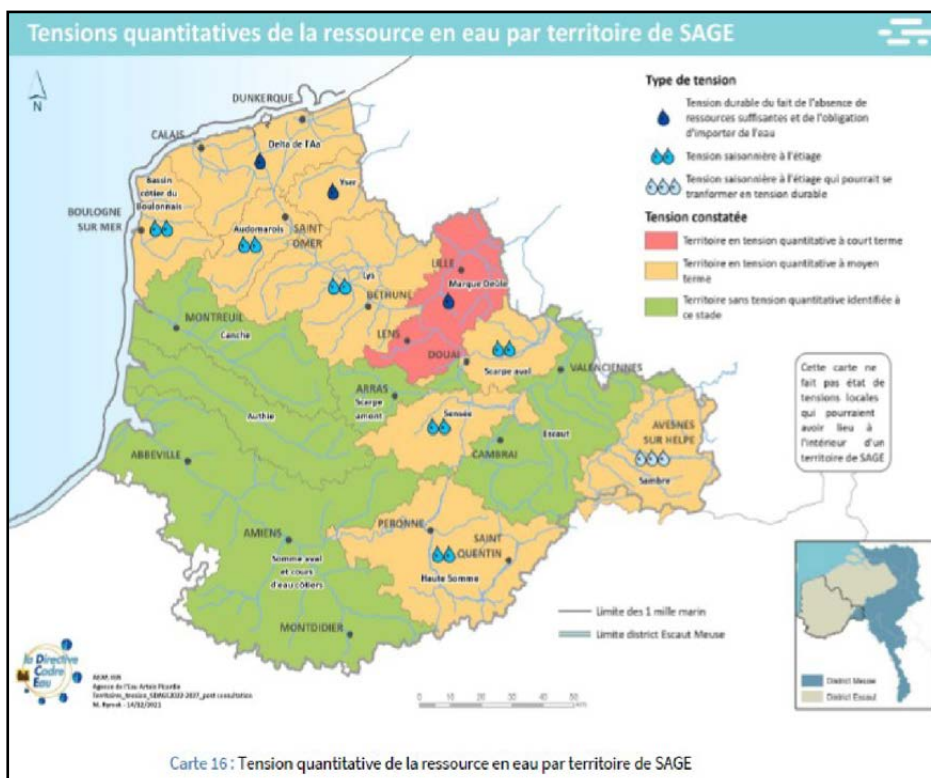
EN GUISE DE CONCLUSION TEMPORAIRE : UNE DÉMARCHÉ VOLONTARISTE

Maintenant que le constat est posé, tant à l'échelle de l'ensemble du territoire que de chacun des bassins versants, que faire ? Le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux du bassin Artois-Picardie 2022-2027 invite les SAGE à définir les volumes disponibles par sous-bassins et proposer une répartition par usages via une démarche PTGE ou similaire (disposition B-2.3). Le décret 2021-79 du 23 juin 2021 précise la notion de volume prélevable : « on entend par volume prélevable, le volume pouvant statistiquement être prélevé huit années sur dix en période de basses eaux dans le milieu naturel aux fins d'usages anthropiques, en respectant le bon fonctionnement des milieux aquatiques dépendant de cette ressource et les objectifs environnementaux du SDAGE. Il est issu d'une évaluation statistique des besoins minimaux des milieux sur la période de basses eaux. Il est réparti entre les usages, en tenant compte des enjeux environnementaux, économiques et sociaux... ». Cette tâche étant entreprise, il faut inventorier tous les types de ressources potentiellement utilisables, en plus des ressources actuelles :

eaux de pluie, eaux grises à collecter et traiter... Un des principes est de limiter les transferts d'eau, donc de retenir le plus possible en amont les eaux potentiellement disponibles. C'est une philosophie totalement opposée à celle qui, vers la fin des années 1960, comptait sur la technologie croissante pour résoudre toutes les opérations nécessaires à ce que chaque individu puisse accéder à tout moment à une eau saine, en quantité suffisante. Elle demande une prise de conscience et une volonté de réaction de la part de tous les citoyens, dans le respect des règles de vie collective élémentaires.

Fig. 7 – Carte des territoires en tension avérée ou prévisible. [Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux 2022-2027 du bassin Artois-Picardie-livret 4, p. 23]

Fig. 7 – Map of territories in proven or predictable tension. [Master plan for water development and management 2022-2027 for the Artois-Picardie basin-booklet 4, p. 23]



L'EAU DANS LES COMMUNES DES HAUTS-DE-FRANCE

Interview réalisée par Francis MEILLIEZ et Didier TORZ le 26/07/2023, en mairie de Watten, avec :

- ✧ Daniel DESCHODT, maire de Watten (DD) et Marc DAMBRICOURT (MD), adjoint au maire, en charge de l'eau.
- ✧ Joël DEVOS, maire de Steenwerck (JD).

Objectif : Ecouter le ressenti et les souhaits de maires face aux problèmes induits par l'accès à l'eau et à l'assainissement, pour lesquels la loi française les place en responsabilité devant leurs concitoyens.

Pour rappel :

✧ Watten : 2 549 habitants (INSEE 2015) ; 7,32 km² ; en rive droite de l'Aa (cote 2 m), à la sortie de la tête d'estuaire de l'Aa, au pied d'une cuesta (point culminant à 72 m) qui traverse l'Argile des Flandres (Yprésien) ; anciennes tuileries (1912-1960) ; verrou de sortie du Marais audomarois ; LGV-TransManche traverse le nord du territoire. <https://www.watten.fr>

✧ Steenwerck : 3 649 habitants (INSEE 2023) ; 27,47 km² ; terrain plat vers 16-17 m, en rive gauche de la Lys, centre du village situé à 6 km au NW du méandre naturel recoupé de la Lys ; traversé par la Grande Becque qui reçoit entre autres la Becque du Mont Noir ; centre habité encadré par l'A25 et la LGV-TransManche. <https://www.steenwerck.fr>

Question : De quelle façon avez-vous pris conscience des responsabilités qui devenaient les vôtres, avec cette fonction de maire, sur le thème de l'eau ?

Réponses : Les deux maires ont succédé à un élu qui avait effectué plusieurs mandats, et avec qui ils ont travaillé, entre autres sur ce thème. La surprise n'a donc pas été totale. Toutefois, DD a réalisé l'ampleur de la responsabilité en découvrant que le réservoir d'eau potable de l'agglomération dunkerquoise est localisé sur la « colline de Watten ». L'eau est pompée dans la craie de Houille, conduite et relevée jusqu'au stockage de Watten, puis s'écoule gravitairement jusqu'aux points de distribution.

Les inondations de 2002 ont entraîné la création du Syndicat mixte pour l'aménagement et la gestion des eaux de l'Aa (<https://www.smageaa.fr>), auquel MD a participé en tant qu'agriculteur, élu de la commune de Watten. La démarche a notamment élaboré le SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau) de l'Audomarois (2005, renouvelé en 2013). Malheureusement, à ce jour, ce SAGE s'arrête à Watten, exutoire

de l'Aa supérieur ; la partie aval de l'Aa, sur la plaine maritime, n'est pas incluse.

L'Union syndicale d'aménagement hydraulique du Nord, l'USAN (<https://www.usan.fr>), dont le siège est à Bailleul, a été créée (1966) pour assurer l'entretien des becques et des fossés à la place des riverains qui, normalement, y sont tenus par la loi. Devant les inondations récurrentes dans la plaine de la Lys (annuelles dans les années 1970), l'objectif a été étendu aux actions susceptibles de limiter les effets désastreux. La commune de Steenwerck y a adhéré de suite, le maire (JD) étant professionnellement très sensibilisé, au sein des services de l'Équipement, en France métropolitaine comme en Outre-Mer (Mayotte), tant aux enjeux d'inondations que de carences d'eau potable. Aujourd'hui l'USAN participe au projet de Dorsale de l'Eau (Mametz, 2022), porté par NOREADE, la Régie du SIDEN-SIAN (syndicat intercommunal de distribution d'eau du Nord, et syndicat intercommunal d'assainissement du Nord).

Questions : Vous sentez-vous suffisamment informés, techniquement, administrativement, alors que les situations liées à l'eau sont l'objet d'une quantité de textes de plus en plus abondante et pointilleuse ? Est-ce efficace pour informer aussi le citoyen ?

Réponses : Après avoir fortement encouragé la collecte de l'eau dans des canalisations jusqu'à la fin des années 1980, les pouvoirs publics (dont l'Agence de Bassin Artois-Picardie) encouragent au contraire à retenir l'eau le plus possible à l'amont : c'est la stratégie de « gestion à la parcelle ». Ce qui limite les ruissellements de surface, les volumes à transférer, et soulage les stations d'épuration à l'aval. Une telle stratégie devrait aussi contribuer à responsabiliser l'usager. Le rôle du maire est essentiel dans cette démarche.

Cependant, les trois élus déplorent que rares sont les citoyens qui s'intéressent réellement à cette question de l'eau dans sa globalité. Les médias diffusent des informations parcellaires qui sont rarement à l'échelle

du besoin de l'usager, lequel a du mal à établir les liens avec ce qu'il vit au quotidien. Il s'ensuit un désintérêt qui se ressent même chez les citoyens élus de la commune : l'absentéisme aux réunions de conseil est un mal permanent ; la représentation de la commune dans des réunions et manifestations qui se tiennent le week-end est de plus en plus problématique. Tout se passe comme si les jeunes générations considéraient que le maire et son adjoint spécifique pour ces questions doivent gérer seuls ces questions techniques. C'est une situation difficile à vivre et qui conduit vers des difficultés encore plus grandes lorsque viendra l'heure du renouvellement des équipes d'élus. Si cette carence s'aggrave, l'appréhension de ces questions, leur gestion, seront de plus en plus dictées par des textes réglementaires pour pallier l'absence de prise de responsabilité de proximité.

Le développement de l'intercommunalité n'arrange pas la situation car le citoyen de base se sent de plus en plus éloigné des gestionnaires. L'alternative qui s'offre au citoyen curieux est alors le cadre associatif, dont la palette est très large. En revanche, l'intercommunalité permet de prendre un meilleur recul sur les situations à observer et facilite les arbitrages sur la hiérarchie des investissements nécessaires. La notion de SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau) est un bon exemple de cette distance qui s'installe. Toutefois cette notion de SAGE a l'avantage de correspondre à une unité fonctionnelle, le bassin versant. Il faut donc parvenir à amener le citoyen à considérer sa propre situation dans ce cadre.

Question : Que faudrait-il améliorer ? Comment préparer votre succession ?

Réponses : Il semble qu'il y ait une véritable évolution chez nos jeunes concitoyens qui paraissent ne pas percevoir l'intérêt du temps de préparation, de l'apprentissage aux côtés des responsables en place. Comment peut-on convaincre qu'assurer une fonction, ce n'est pas seulement succéder, mais aussi apprendre aux côtés des personnes auxquelles on va succéder ? Il faut toucher ces successeurs potentiels dans leurs intérêts propres pour qu'ils comprennent l'enjeu.

La plaine de la Lys a accueilli depuis une trentaine d'années un nombre croissant d'urbains voulant s'écarter de la ville dense, mais qui ne connaissent pas nécessairement la dynamique naturelle du territoire. Le citoyen ne se sent réellement concerné que lorsqu'il

est inondé. Il demande alors au maire de s'en charger sans se préoccuper un instant de la topographie, de la toponymie (les Basses Terres, la Mauvaise Rue, ...), la densité des fossés, et autres sources d'observation qui renseignent sur les raisons naturelles de la présence épisodique d'eau en excès. Il y a donc un réel besoin de pédagogie.

La vie d'un maire n'est pas faite d'actions spectaculaires mises bout à bout. Elle est tissée maille par maille. Préserver le lien de proximité, c'est, par exemple, assurer un contact avec la famille du défunt lors d'un décès. Montrer qu'économiser l'eau, bien public, c'est aussi réduire aux périodes nécessaires l'accès aux robinets des cimetières. Le respect des équipements publics n'est pas l'apanage de l'autorité, sous ses diverses formes ; c'est aussi la liberté de chaque citoyen, dès son plus jeune âge. La liberté ne peut s'exercer que dans la confiance réciproque.

LES EAUX PLUVIALES : D'UN STATUT DE DÉCHET À CELUI DE RESSOURCE ET DE RICHESSE POUR LES TERRITOIRES

Rainwater: from waste to resource and wealthy-support for territories

Maëlle Ancelle

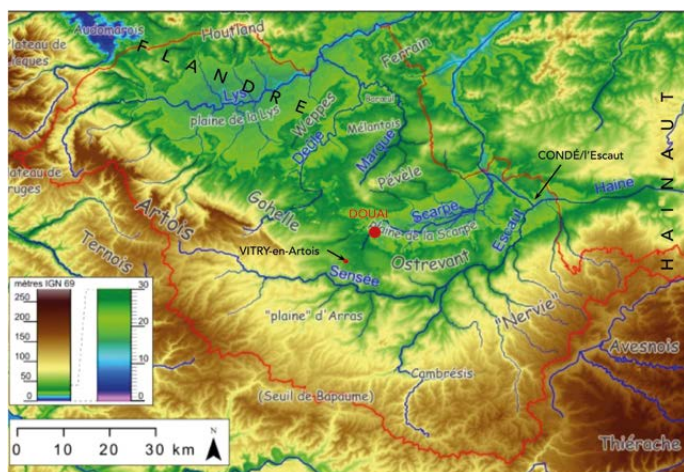
directrice ADOPTA 120, rue Gustave Eiffel 59500 Douai

mancelle@adopta.fr

INTRODUCTION

Le secteur de Douai est géologiquement déterminé pour être inondé. Avant que l'espèce humaine n'ait trop modifié le paysage naturel, quelques petits cours d'eau convergeaient vers un point situé à l'aval de la ville actuelle, et alimentaient une rivière paresseuse qui occupait une large gouttière géologique jusqu'à rejoindre l'Escaut (Meilliez & Belin, 2023). Avec un tel déterminisme, il n'est guère étonnant que l'agglomération qui s'y est installée ait été victime d'inondations à répétitions. Le développement ultérieur de l'urbanisme, imperméabilisant les sols, n'a fait qu'accentuer les effets négatifs.

Différents acteurs du territoire, dont le Syndicat Intercommunal d'Assainissement de la Région de Douai (SIADO), la société des Eaux de Douai et la ville de Douai, ont alors eu l'idée de réfléchir au recours à des technologies qui permettraient de capter et dériver les eaux pluviales tombant sur des surfaces imperméabilisées, avant qu'elles ne se rassemblent et engorgent les réseaux d'assainissement et les stations d'épuration. Pour accompagner ce changement révolutionnaire de pratiques, est née l'ADOPTA, initialement Association Douaisienne pour la Promotion des Techniques Alternatives dans la gestion des eaux pluviales.

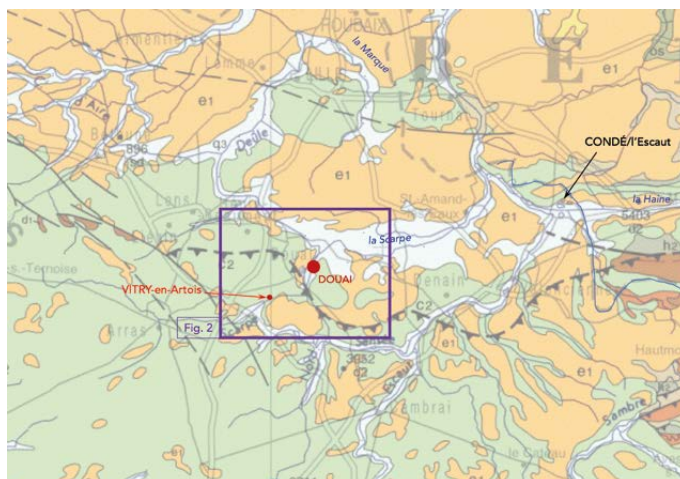


LE CONTEXTE TOPOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DE L'AGGLOMÉRATION DOUAISIENNE

Dans la France du nord, les causes d'inondation les plus fréquentes sont le débordement d'un cours d'eau, et un ruissellement excessif sur des terrains peu perméables à la suite de fortes précipitations, la première étant pour partie une des conséquences de la seconde. Le site de Douai est particulièrement propice à des inondations qui n'ont fait que s'amplifier avec les développements de l'urbanisation (Fig. 1).

Fig. 1 – Le contexte géographique et géologique de l'agglomération de Douai : A – Modèle numérique de terrain réalisé par L. Deschodt, illustrant le réseau hydrographique naturel, avant interventions humaines; B – Carte géologique (©Infoterre) montrant que Douai est à l'amont d'une plaine alluviale large, insérée dans les dépôts sablo-argileux de la base des terrains tertiaires; noter au passage l'absence d'alluvions récentes dans le secteur de Vitry-en-Artois.

Fig. 1 – Geographical and geological context of the Douai conurbation: A - Digital terrain model by L. Deschodt, illustrating the natural hydrographic network before human intervention; B - Geological map (©Infoterre) showing that Douai lies at the head of a broad alluvial plain, embedded in sandy-clay deposits at the base of the Tertiary terrains; note in passing the absence of recent alluvium in the Vitry-en-Artois area.



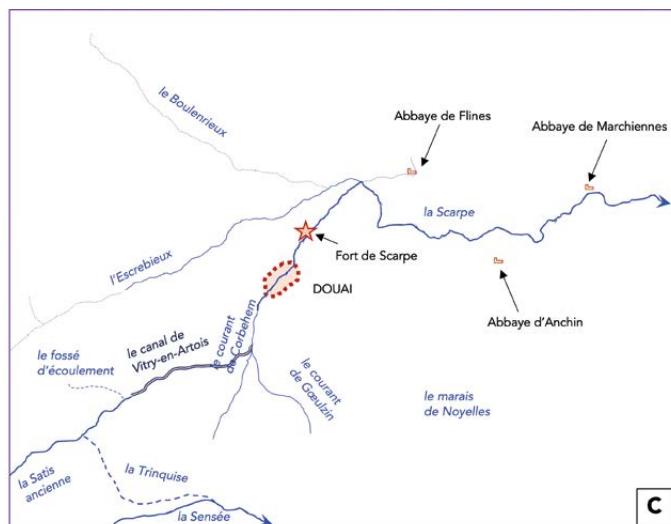
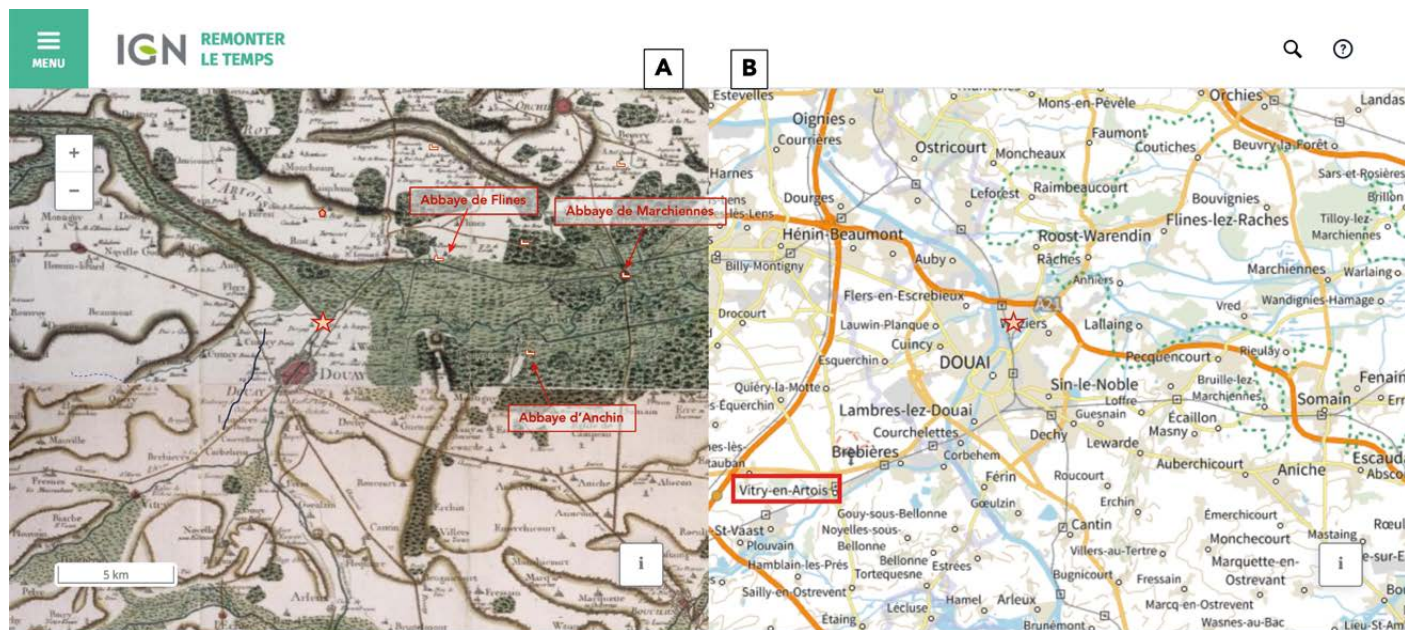


Fig. 2 – Sur fond cartographique tiré du site IGN/Remonterletemps (©), on peut juger de l'intensité des interventions humaines sur ce territoire : A – Carte de Cassini montrant que la ville historique de Douai s'est vraiment installée en rebord de plateau crayeux, légèrement surélevé par rapport à la plaine marécageuse. B – Extrait de carte actuelle. C – schéma qui repositionne les divers cours ayant concouru à la formation de la Scarpe. Fig. 2 – A map extracted from the IGN/Remonterletemps (©) site shows the intensity of human intervention in this area: A – Cassini map showing that the historic town of Douai was actually built on the edge of the chalk plateau, slightly higher than the marshy plain. B – Current map extract. C – Diagram showing the various courses that contributed to the formation of the Scarpe river.

La Scarpe est un affluent de rive gauche de l'Escaut qui coule paresseusement dans une plaine marécageuse, large en aval de Douai (Fig. 1A). Les alluvions modernes (Fig. 1B) y couvrent les limons périglaciaires d'âge Weichsélien (Deschodt, 2014), lesquels ont empâté une vallée aux formes molles et nombreux chenaux, installée dans les couches sablo-argileuses de la base du Thanétien (Fourrier, 1989). Historiquement (Demolon *et al.*, 1990), la ville s'est implantée sur les deux rives d'une cluse étroite entaillant le rebord crayeux qui ferme modestement au sud cette large plaine. Un reste de couverture sablo-argileuse thanétienne coiffe la rive gauche. La Scarpe elle-même résulte de la convergence de plusieurs cours d'eau issus du rebord crayeux du sud et de l'ouest (Fig. 2) : au sud-sud-est le Ruisseau de Gœulzin, au sud-ouest le Courant de Corbehem, à l'ouest le Courant de la Brayelle et l'Escrebieux, au nord-ouest le Boulenrieux (Gosselet, 1897; Deschodt, 2014). Le lit du Courant de Corbehem a été ré-utilisé dès la fin du IX^e siècle pour y

faire passer un fil d'eau qui détournait à partir de Vitry-en-Artois le cours supérieur de la Sensée, qu'aujourd'hui on appelle Scarpe d'Arras. Un modeste canal destiné à soutenir le courant d'eau qui alimentait les moulins de Brebières et Corbehem, a été ensuite élargi et rendu navigable à la fin du XVI^e siècle (Ladrière, 1888; Gosselet, 1897; Louis, 1990; Derville, 1990). Enfin le cours du Boulenrieux a été aménagé dès la fin du XVII^e siècle pour y faire passer le canal reliant la Scarpe à la Deûle (Gosselet, 1897; Louis, 1990; Heddebaut (2002, 2023).

Historiquement, la Scarpe marquait la limite entre la Flandre et le Hainaut (Verrier, 2020). Cette voie d'eau était donc stratégique et les divers aménagements qu'elle a subis ont notamment été marqués par les rivalités entre les différentes abbayes (Fig. 2 : Flines-les-Râches, Marchiennes, Anchin, St-Amand-les-eaux, ...) et les pouvoirs civils qui la bordaient (Heddebaut, 2023). L'ouverture du canal de Vitry-en-Artois par Philippe II (1595) n'a fait qu'apporter un supplément d'eau dans un lit mineur qui n'était pas dimensionné pour cela; ce qui a contribué à faciliter la divagation des fils d'eau dans le lit majeur. Mais, à l'époque, personne n'avait conscience des conséquences possibles d'une telle décision dans l'aménagement du territoire. Dans ce secteur, les lignes de partage des eaux naturelles constituent des obstacles faci-

lement franchissables, d'où la présence de plusieurs canaux. En particulier, la jonction canalisée, à grand gabarit (3500t) qui relie la plaine maritime (région de Dunkerque) à l'Escaut (secteur de Bouchain), puis au canal du Nord (Fig. 3) a fait de Douai un point névralgique de la batellerie française. Cette vocation sera renforcée avec le prochain embranchement au canal Seine-Nord-Europe (CSNE).

L'origine du changement de la politique pluviale du Douaisis

Douai a été confrontée à des problématiques d'inondations dans un quartier (Faubourg de Béthune) à la suite de 5 orages dits décennaux (1 orage qui se produit statistiquement 1 fois tous les 10 ans) sur 5 ans. Des travaux correctifs sur les systèmes d'assainissement n'ont pas réussi à résoudre ces problèmes. Il a alors fallu réfléchir à trouver de nouvelles solutions qui éviteraient de rejeter les eaux pluviales dans les systèmes d'assainissement et qui permettraient de les gérer à la source. En effet, s'il n'était plus possible de gérer l'eau de pluie dans les réseaux, il fallait donc chercher à ne plus l'y envoyer. Est alors née en 1992 la nouvelle politique pluviale

du syndicat d'assainissement du Douaisis, basée entre autres sur l'expérience de la ville de Bordeaux qui avait mis en place des techniques dites « alternatives » au tout tuyau. Cette nouvelle politique consiste, sur l'ensemble du territoire, à infiltrer la goutte d'eau au plus près de son point de chute pour chaque projet d'aménagement neuf mais aussi lors de projets de mutation, de renouvellement de la ville.

Pour accompagner ce changement, trois acteurs du territoire ont décidé de créer une association locale, l'ADOPTA, soutenue financièrement par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et la Région Nord – Pas de Calais. D'abord locale, elle a vu son périmètre géographique s'agrandir pour répondre aux besoins et accompagner d'autres territoires confrontés aux mêmes problématiques et devenir ainsi en 2010 une association régionale puis nationale : l'Association pour le Développement Opérationnel et la Promotion des Techniques Alternatives.



Fig. 3 – Modèle numérique de terrain et réseau hydrographique (©CAUE) sur lequel sont particulièrement distingués les canaux de liaison entre bassins versants et leur date d'ouverture. L'histoire de leur ouverture témoigne des vicissitudes de l'Histoire de France dans une région longtemps frontalière.
 Fig. 3 – Digital terrain model and hydrographic network (©CAUE), highlighting canals linking watersheds and their opening dates. The history of their opening bears witness to the vicissitudes of French history in a region that has long been a border region.

L'Association pour le Développement Opérationnel et la Promotion de Techniques Alternatives (ADOPTA), une réponse d'adaptation

Fondée en 1997, cette association mêlant acteurs de la construction de la ville et de sa gestion et institutions, a d'abord travaillé à promouvoir des solutions techniques adaptées aux situations (voir infra). Les résultats emportant peu à peu la conviction, les partenaires se sont multipliés : les Agences de l'Eau Artois-Picardie, Seine-Normandie, la Région Hauts-de-France, l'ADEME, l'Europe, le Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, soutenant financièrement les actions de l'Association Et les missions se sont précisées et ont été codifiées. Aujourd'hui l'ADOPTA regroupe plus de 200 membres adhérents et associés, acteurs de l'aménagement urbain (collectivités, aménageurs, bailleurs, bureaux d'études, paysagistes, entreprises de travaux publics...) dont plus de 25 % hors Région Hauts de France. Ses compétences sont reconnues nationalement et amènent de nombreuses structures, professionnelles issues du Public et du secteur Privé, et des élus de collectivités de tous coins de France, mais aussi de Belgique toute proche.

L'ADOPTA a un objectif central : promouvoir et développer le recours à la gestion durable et intégrée des eaux pluviales dans l'aménagement urbain. Elle assure quatre missions essentielles :

- ✧ sensibilisation et communication (<http://adopta.fr>) : réalisation de documents de vulgarisation, mise en place et visite d'un show-room présentant les différentes solutions permettant une gestion durable et intégrée des eaux pluviales et de sites, organisation conférences et débats, participation à divers salons, création du Forum National de la Gestion Durable des Eaux Pluviales (qui se tient tous les 2 ans) ;
- ✧ animation et formation : sessions à la demande, interventions en milieux scolaires, universitaires et de formation professionnelle ;
- ✧ accompagnement : adaptation des structures tant publiques que privées à la mise en place d'une politique de gestion des eaux pluviales, pratique de la transversalité et de la transdisciplinarité, conseil aux études et projets ;

L'urbanisation entraîne une artificialisation des sols, responsable de plusieurs conséquences : imperméabilisation accrue et perturbations induites du cycle naturel de l'eau, inadéquation des réseaux d'assainissement (par l'accroissement de l'urbanisation), croissance d'îlots de chaleur qu'accroît le réchauffement climatique avec aussi des épisodes de sécheresse et de problématiques de recharge des nappes phréatiques, ... La prise en compte des eaux pluviales doit entrer dans la vision intégrée de tout chantier, pas seulement à l'échelle du projet mais aussi en le replaçant dans son contexte local.

Une pléiade de solutions

De nombreuses solutions sont possibles qui s'accordent avec trois principes philosophiques :

- ✧ Faire des eaux pluviales une richesse, une ressource et non plus un déchet qu'il faut évacuer le plus et loin et le plus vite possible. Les problématiques ont changé. Les réponses doivent donc s'adapter.
- ✧ Les infiltrer dans le sol au plus près de leur point de chute, pour revenir au grand cycle naturel de l'eau (laquelle s'infiltrait dans les sols).
- ✧ En cas d'impossibilité, les tamponner et rejeter l'excédent, à débit limité, vers le milieu naturel superficiel de préférence.

Ce qui, concrètement, se traduit en quatre principes techniques :

- ✧ Ne pas concentrer les eaux pluviales.
- ✧ Ne pas faire ruisseler les eaux pluviales. 80 % de la pollution des eaux pluviales est issue de leur ruissellement sur des surfaces imperméabilisées. Moins les eaux pluviales ruissellent, moins elles se chargent en éléments polluants et moins il y a à mettre en place de systèmes de traitement qui ont un coût en investissement et en fonctionnement. D'où une gestion des eaux pluviales au plus près de leur point de chute.
- ✧ Aménager et réaménager sans imperméabiliser les sols, c'est-à-dire profiter d'opérations nouvelles ou de projets de renouvellement urbain pour ne pas/plus rejeter les eaux pluviales dans les réseaux d'assainissement
- ✧ Donner plusieurs fonctions à un même espace : ne plus créer d'ouvrages spécifiques pour gérer les eaux pluviales. Donner une seconde fonction à un espace (un espace vert va être transformé pour gérer les eaux pluviales en même temps. La constitution d'un corps de chaussée va être adaptée pour stocker des eaux pluviales...).

Les solutions permettant de recourir à cette gestion des eaux pluviales à la source sont multiples et se répartissent en 3 catégories :

- ✧ Les solutions fondées sur la nature, solutions basées sur la végétalisation de l'espace : noues, toitures végétalisées, jardins de pluie...
- ✧ Les revêtements de sol perméables
- ✧ Les techniques enterrées : chaussées à structure réservoir, tranchée d'infiltration, cuve de récupération, puits d'infiltration...

La mise en pratique de ces principes et de ces solutions apporte aussi bien d'autres bénéfices appréciables :

- ✧ Cette nouvelle gestion des eaux pluviales permet, en remettant l'eau de pluie dans les sols, de contribuer à la recharge des nappes phréatiques, source de 97 % de l'eau potable sur le territoire Artois Picardie.



✧ Elle génère de sérieuses économies financières : évacuer les eaux pluviales nécessite un système de réseaux de tuyaux sous nos rues et routes, très coûteux, qu'il faut entretenir, réparer, renouveler. La plurifonctionnalité des ouvrages est source d'économies.

✧ Cela crée une meilleure adaptation de la ville au changement climatique, notamment via les solutions fondées sur la nature et les revêtements de sol perméables ; lequel engendre des pluies bien plus intenses, que les réseaux traditionnels n'arrivent pas à avaler.

✧ La gestion des eaux pluviales, à la source, permet d'agréments les lieux habités, de rendre le cadre de vie plus agréable et participe au redéveloppement de la biodiversité.

LE PAYS DES WATERINGUES, UNE COHABITATION DISPUTÉE ENTRE L'ESPÈCE HUMAINE ET LA MER

Wateringues-land, a long-term fight between human species and sea

Francis Meilliez
Arnaud Beucherie
Laurent Deschodt
Christine Maréchal
Justin Lecomte
Jean-Pierre Nicollin

Et avec la collaboration de Renée Duchemin au nom du Groupe Médiation : François Duchaussois, Arnaud Bak, Nathalie Rouget, Nadine Sarrazin, Christine Moreels

INTRODUCTION

Le *Pays des Wateringues* est une expression courante mais non formelle, pour désigner la partie française de la plaine maritime qui limite à l'est la Mer du Nord, depuis le cap Blanc-Nez jusqu'aux rivages polonais de la Baltique puis jusqu'en Russie (Gosselet, 1893). Le paysage actuel est un héritage des glaciations quaternaires dont le dernier rebond n'est pas encore terminé¹. La frange littorale est formée de

matériaux détritiques fins, peu perméables hors du rivage proprement dit, dont la présence est révélée par un réseau hydrographique dense (Fig. 1). Derrière un cordon dunaire quasi continu (haut de 5 à 15 m), la plaine humide ne dépasse pas 3 à 4 m d'altitude, que les marées hautes de vives eaux peuvent couvrir (DREAL 59/62, 2013). Les formations sédimentaires de la *Plaine Maritime* (Somme, 1977, 2013) témoignent de l'évolution quaternaire du littoral de la Mer du Nord méridionale. Elles complètent une trame de référence pour le Quaternaire, qui justifie leur prise en compte dans

1. En 2008, en Estonie, une avocate était chargée de gérer le statut juridique des territoires nouvellement disponibles sur les rives de la Baltique, en conséquence de ce rebond (FM).



Fig. 1 – Modèle numérique de terrain et du réseau hydrographique (réalisation de Clément Terrier, CAUE-59). Les cours d'eau principaux (Aa, Yser, Escaut, Lys, Sambre, Meuse) sont surlignés en tiretés. Ca = Calais, Du = Dunkerque, SO = Saint-Omer, Bx = Bruxelles, Ga = Gand.

Fig. 1 – Digital terrain and hydrographic network model (created by Clément Terrier, CAUE-59). The main rivers (Aa, Yser, Escaut, Lys, Sambre, Meuse) are highlighted in dashed lines. Ca = Calais, Du = Dunkirk, SO = Saint-Omer, Bx = Brussels, Ga = Ghent.

l'Inventaire Régional du Géopatrimoine². L'objectif de cet article est de partager avec les usagers de ce territoire les connaissances acquises lors d'observations d'opportunité, le plus souvent temporaires et ponctuelles, pour les mettre en perspective dans la durée. En effet, l'espèce humaine fréquente le littoral depuis le Pléistocène moyen, et intervient au moins localement sur la dynamique du comblement de la plaine maritime depuis le Néolithique final (barrage en bois et terre d'un chenal de marée à Tétéghem : Lançon et Boulen, 2019). L'aménagement de la plaine maritime holocène est intensif (drainage, points d'eau) depuis au moins le Haut Moyen Âge en usant des, et s'adaptant aux conditions issues des dynamiques littorales (Deschodt *et al.*, 2021). Cependant, la puissance technologique dont l'espèce humaine s'est dotée au cours des 70 dernières années marque fortement le territoire, en négligeant sa dynamique propre. S'ensuivent nécessairement des confrontations, voire des conflits d'usage le long d'une bande littorale de quelques dizaines de kilomètres de large, exacerbés à la fois par la croissance de la densité de population dans cette bande, et en même temps par l'ignorance des nouveaux usagers quant au fonctionnement naturel de l'écosystème.

Au fil du temps et des nécessités, les usagers autochtones ont toujours développé des solutions d'adaptation. Certaines ont été des succès, au moins temporaires, d'autres, notamment en temps de guerre, ont rappelé que l'eau libre occupe systématiquement tous les points bas, pour une durée qui dépend surtout des variations climatiques et des contraintes anthropiques, conscientes ou non, qui lui sont imposées. Les usagers ont consenti des efforts financiers et techniques considérables pour subsister dans ces conditions précaires. Aujourd'hui (depuis moins d'un siècle), la bande littorale n'est plus utilisée uniquement par les autochtones. La mondialisation des échanges commerciaux attribue au détroit du Pas-de-Calais une position stratégique qui attire des activités industrielles lourdes, un tourisme croissant, et les services conséquents, ce qui entraîne une augmentation de résidents et de passagers pour qui les vicissitudes environnementales naturelles doivent être traitées avec obligation de résultat par une technologie optimale pour l'économie. Au vu de l'Histoire, une telle évolution tend vers un épisode d'aveuglement technocratique et des risques localement préjudiciables. Les lignes qui suivent ont pour but de rappeler les contraintes naturelles du territoire et de les remettre en perspective écosystémique dans la durée.

RAPPEL DU CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA PLAINE MARITIME

La plaine maritime est l'interface marine de la Flandre, dans laquelle sont aussi différenciés les Monts de Flandres et la plaine de la Lys (Fig. 2). Le tout est limité au sud-ouest par les collines du Boulonnais et de l'Artois. Le Boulonnais représente l'extrémité sud-est d'un anticlinal qui se poursuit en Angleterre par le Weald ; les falaises crayeuses de Douvres sont en regard de celles du Cap Blanc-Nez (Fig. 3a). Cet anticlinal dissymétrique s'est individualisé depuis l'Éocène supérieur (âge entre 30 et 40 millions d'années environ), et a déterminé un relief fermant au sud l'espace appelé à devenir la Mer du Nord. Cette déformation est l'un des effets lointains de la surrection des Pyrénées (Wyns, 2014), un des événements orogéniques, parmi d'autres, qui ont contribué à modifier le climat en faisant baisser la teneur atmosphérique en CO₂ et par conséquent la température (Ramstein, 2015). Le refroidissement engagé a conduit aux glaciations qui ont marqué le Pléistocène (de 2,58 millions d'années à 11 700 ans)³.

3. La chronostratigraphie est précisée sur les tableaux de la Fig. 6.

2. Sous l'égide de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), la Commission Régionale du Patrimoine Géologique (CRPG) instruit les dossiers pour ménager protection et valorisation des ressources minérales naturelles (voir webographie).

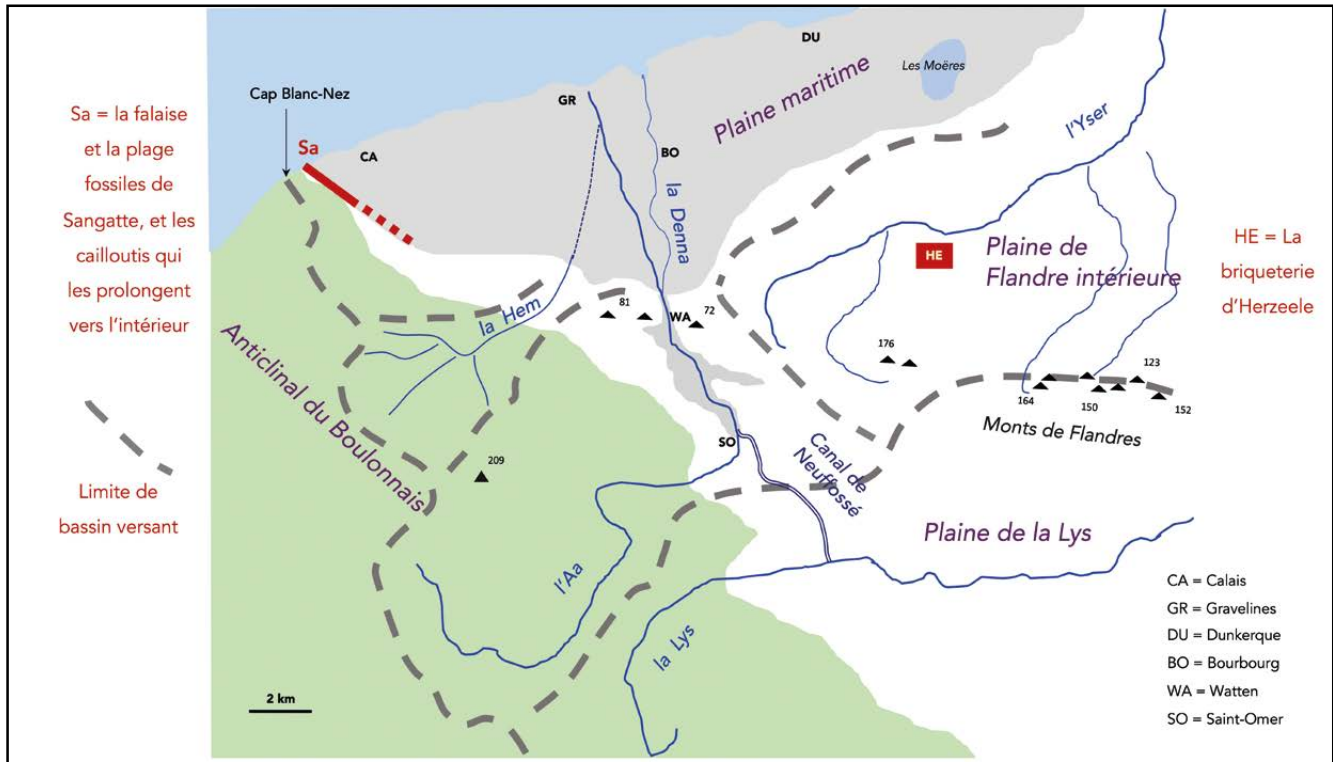


Fig. 2 – Carte géologique simplifiée (FM) de la plaine maritime et de son arrière-pays.
 Fig. 2 – Simplified geological map (FM) of the maritime plain and its hinterland.

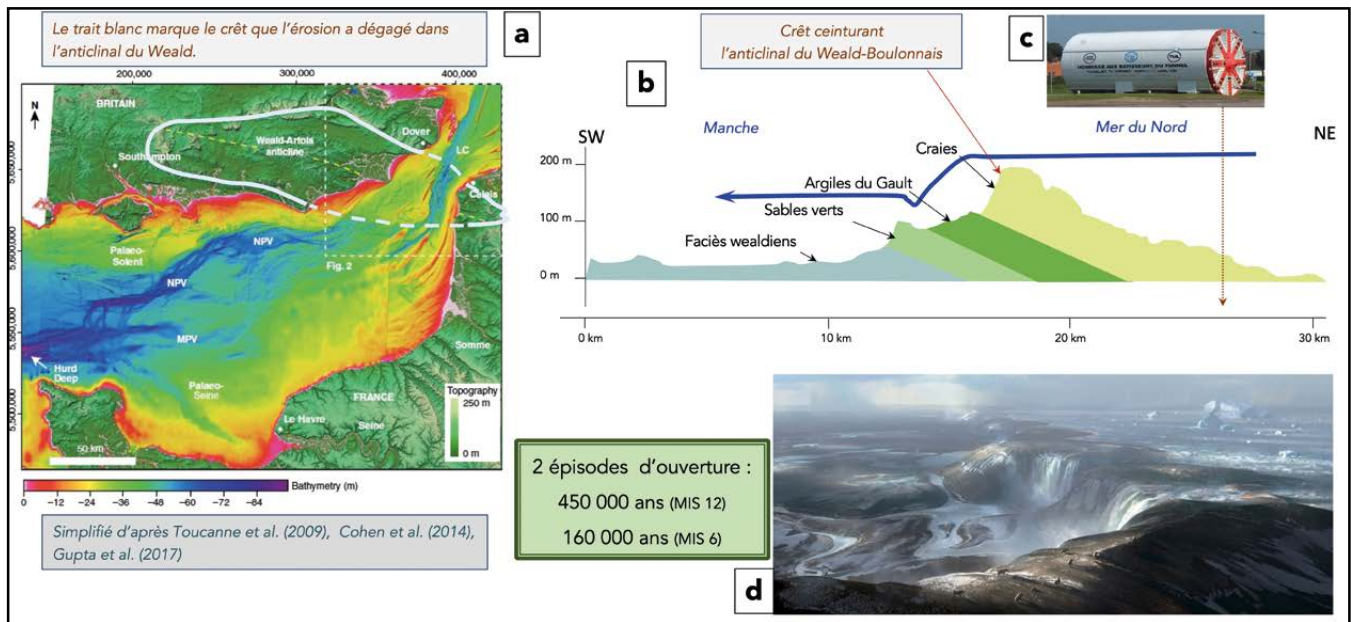


Fig. 3 – Illustration composite du mécanisme (incision d'une cluse en travers de l'anticlinal Weald-Boulonnais) par lequel le détroit du Pas-de-Calais a connecté la Mer du Nord à la Manche : (a) – la carte topographique du fond de la Manche révèle la trace d'un fleuve Manche, reconstitué par plusieurs équipes de chercheurs; (b) – la vidange du lac proglaciaire, au sud de la future Mer du Nord; au moins deux épisodes de vidange sont caractérisés (vers 450 000 ans et vers 160 000 ans) en tranchant le crêt déterminé par le flanc nord de l'anticlinal (coupe géologique en haut à droite); (c) – les travaux de reconnaissance du tunnel sous la Manche (évoqué par le tunnelier) ont révélé les dépressions (Fosses Dangereard) déterminées par les chutes d'eau, et comblées de sédiments aujourd'hui datés; (d) – la représentation en bas à droite est une vue d'artiste.

Fig. 3 – Composite illustration of the mechanism (incision of a lock across the Weald-Boulonnais anticline) by which the Strait of Pas-de-Calais connected the North Sea to the English Channel: (a) – the topographic map of the bottom of the Channel reveals the trace of a Channel river, reconstructed by several teams of researchers; (b) – the draining of the proglacial lake, south of the future North Sea; at least two draining episodes are characterized (around 450,000 years and around 160,000 years) by cutting the crest determined by the northern flank of the anticline (geological section at top right); (c) – reconnaissance work on the Channel Tunnel (mentioned by the tunnel boring machine) revealed depressions (Fosses Dangereard) determined by waterfalls, and filled with now dated sediments; (d) – the representation at the bottom right is an artist's impression.

Dans l'hémisphère nord, l'englacement a débuté au Groënland, il y a environ 3 Ma. Au cours du dernier million d'années, des glaces permanentes ont occupé les sommets alpins, le nord des îles Britanniques et la Scandinavie (Fig. 4A). La baisse continue de la température moyenne s'est faite par oscillations (de l'ordre de 100 ka) qui se sont régularisées tandis que leur amplitude s'accroissait (Fig. 5). Le développement épisodique d'une banquise a restreint, voire fermé la liaison entre la Mer du Nord et l'océan Atlantique. Chaque épisode glaciaire s'est accompagné d'émissions de limons que les vents ont dispersés sur l'Europe du nord-ouest. C'est pourquoi la vallée de la Somme a pu enregistrer dans ses terrasses alluviales les variations climatiques et leurs expressions sédimentaires corrélatives (Antoine *et al.*, 2007, 2014). A l'échelle de l'Eu-

rope occidentale, tous les grands fleuves s'écoulent vers la calotte glaciaire, au gré de ses extensions/rétractions (Fig. 4B), s'adaptent à ses déplacements et alimentent le lac périglaciaire, verrouillé au sud-ouest par le relief déterminé par l'anticlinal du Weald-Boulonnais (Fig. 3). La mer du Nord, la Baltique et les grands lacs du nord de la Russie sont ainsi l'équivalent du St-Laurent et des grands lacs d'Amérique du Nord, en périphérie de la calotte canadienne. Les travaux de recherche d'hydrocarbures d'une part, et ceux effectués pour réaliser le tunnel TransManche ont apporté les éléments du récit de l'incision d'une cluse en travers de l'anticlinal du Weald-Boulonnais (Fig. 3b) par laquelle le lac glaciaire a pu se vidanger par le fleuve Manche (Gupta *et al.*, 2007; Toucanne *et al.*, 2009 a et b).

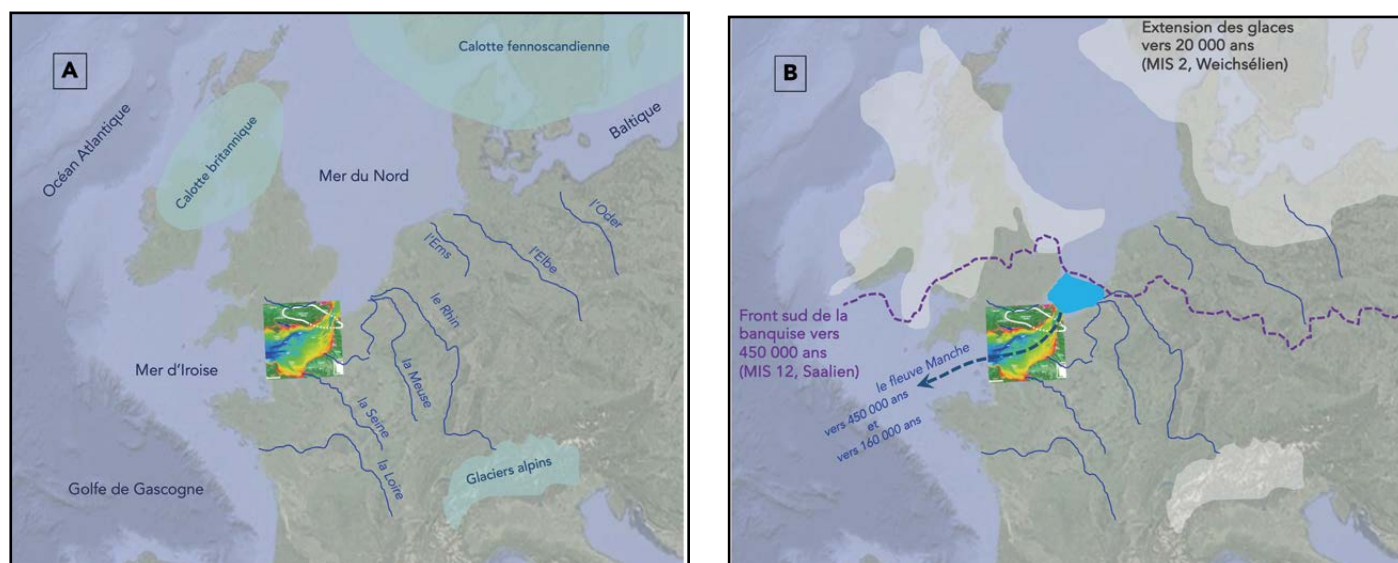


Fig. 4 – Sur fond de carte extrait de Google Earth, sont reportés quelques fleuves européens. Tous coulent vers la Mer du Nord et la Baltique, actuelles reliques des calottes glaciaires qui ont nucléé, au cours du Pléistocène, sur la péninsule fennoscandienne et le nord des îles Britanniques (A). Il est arrivé que ces calottes se soient soudées à celle venue du Groënland et du Canada, notamment durant la période dite Saalienne, dont le front glaciaire est alors descendu très au sud (B). La dernière glaciation (Weichsélien) est restée plus en retrait.
 Fig. 4 – On a map taken from Google Earth, some European rivers are shown. All flow towards the North Sea and the Baltic, current relics of the ice sheets which nucleated, during the Pleistocene, on the Fennoscandian peninsula and the north of the British Isles (A). It happened that these ice caps merged with that coming from Greenland and Canada, particularly during the so-called Saalian period, the glacial front of which then descended very far to the south (B). The last glaciation (Weichselian) remained further behind.

En résumé, le calendrier géologique (Fig. 5) montre que l'espèce humaine a pu se rendre à pied dans les futures îles Britanniques, comme le suggère la vue d'artiste (Fig. 3d). Il montre aussi que le réchauffement climatique dans lequel nous vivons, a débuté il y a moins de 20 000 ans, et que nous vivons dans un interglaciaire que l'activité humaine contribue à prolonger au-delà des quelques centaines de siècles que suggèrent les précédents interglaciaires. C'est pourquoi il faut examiner plus en détail la situation de la plaine maritime dans cette perspective.

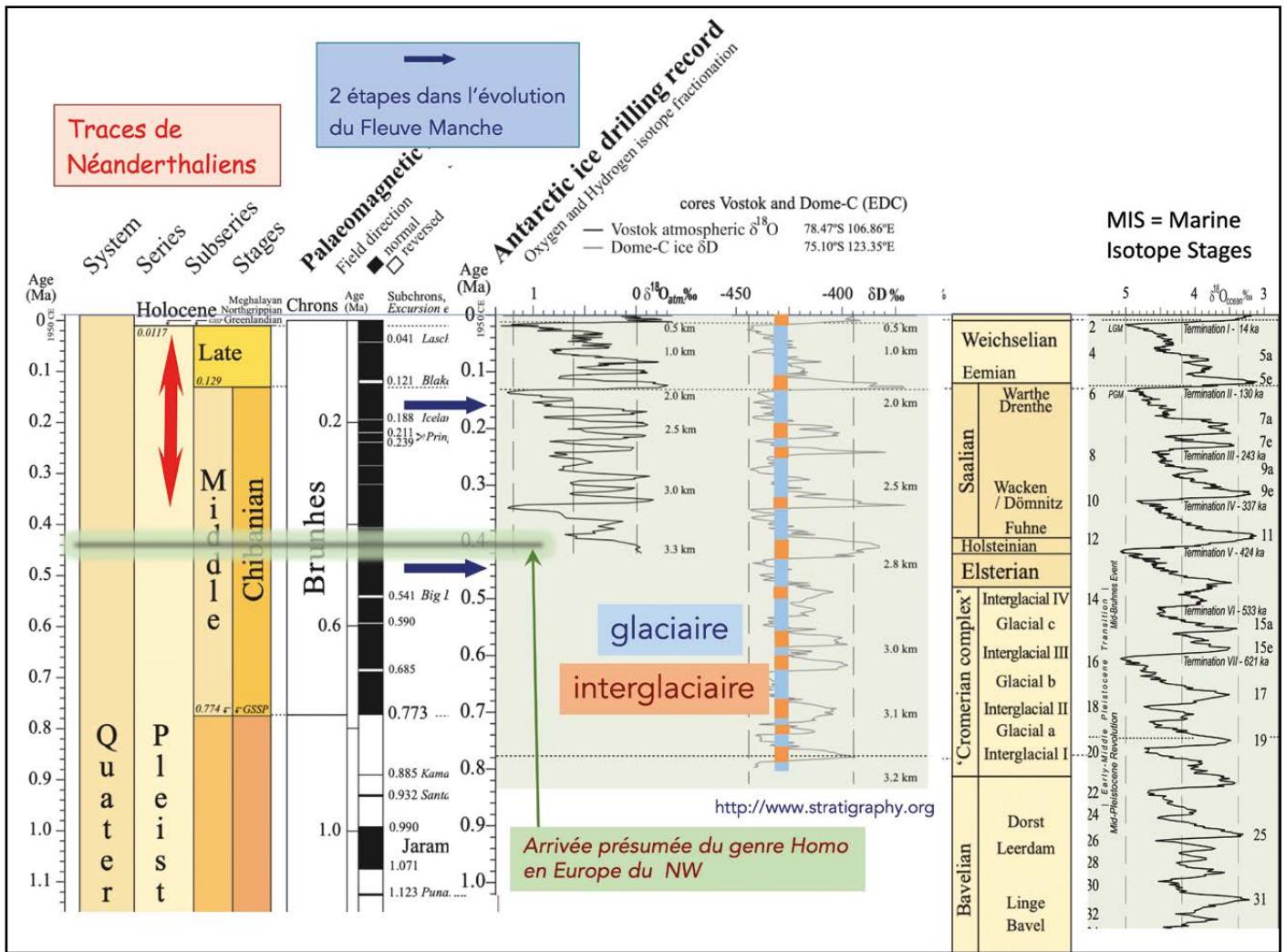


Fig. 5 – Extrait du tableau géochronologique de référence (<https://stratigraphy.org/>) sur lequel sont reportés quelques événements majeurs (épisodes d'ouverture du détroit du Pas-de-Calais, traces de présence humaine); la colonne de droite révèle les oscillations thermiques dont les glaciations sont les extrêmes repérés par les MIS pairs, tandis que les épisodes chauds sont identifiés par des MIS impairs.

Fig. 5 – Extract from the reference geochronological table (<https://stratigraphy.org/>) on which some major events are reported (episodes of opening of the Strait of Pas-de-Calais, traces of human presence); the right column reveals the thermal oscillations of which the glaciations are the extremes identified by the even MIS, while the warm episodes are identified by the odd MIS.

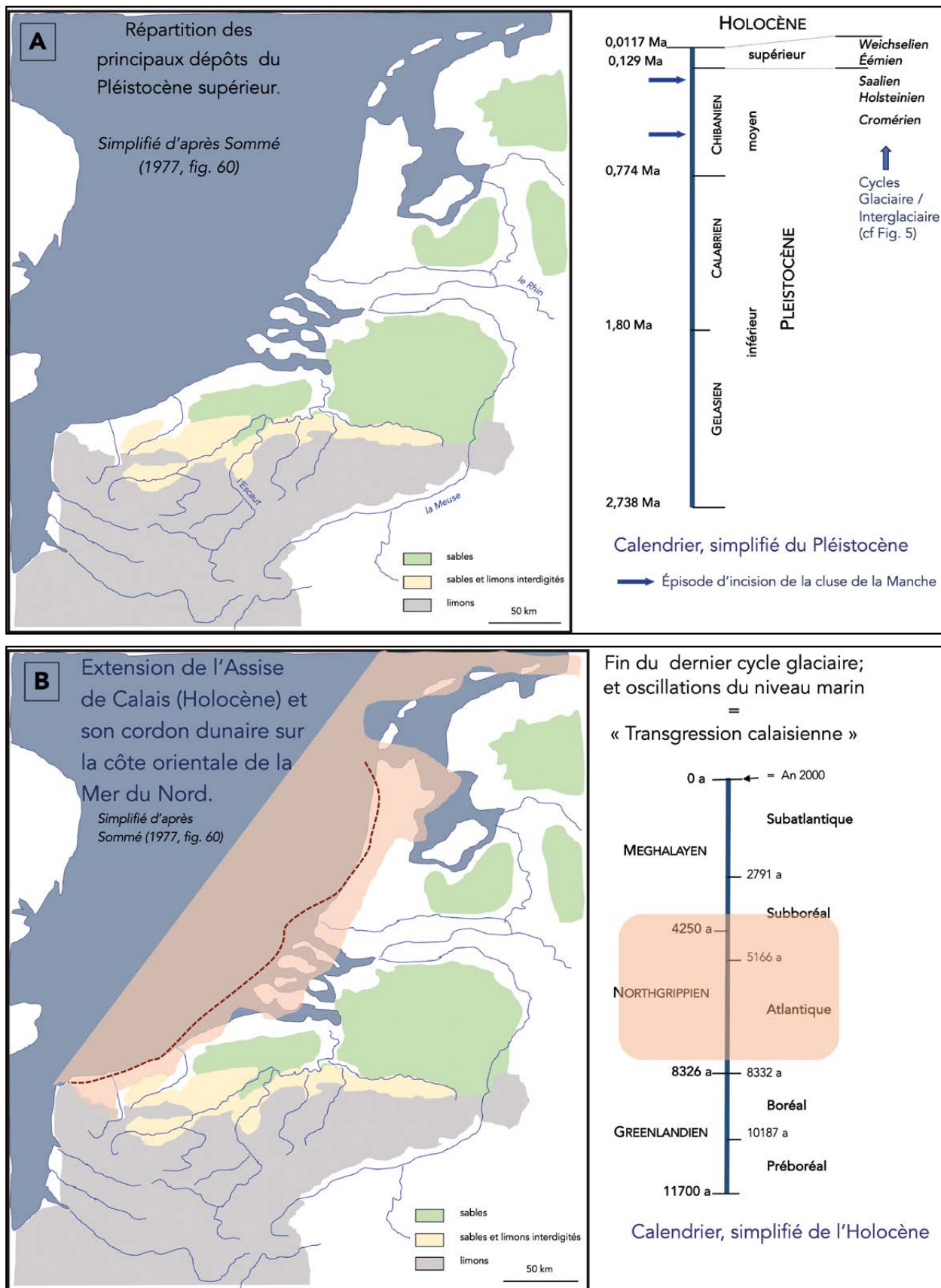


Fig. 6 – Cartes simplifiées (d'après Sommé 1977) montrant une reconstitution des dépôts sédimentaires durant le Pléistocène (A), puis durant la partie ancienne de l'Holocène ayant déposé l'Assise de Calais, dont les témoins de son cordon littoral (pointillé brun) (B).

Fig. 6 – Simplified maps (after Sommé 1977) showing a reconstruction of sedimentary deposits during the Pleistocene (A), then during the early part of the Holocene which deposited the Assise de Calais, including the evidence of its coastal strip (brown dotted line) (B).

LA PLAINE MARITIME DEPUIS LA FIN DE LA DERNIÈRE GLACIATION

La géologie de la plaine maritime française a été l'objet d'une étude détaillée de la part de Jean Sommé (1977). Ajoutant aux observations antérieures toutes les siennes, il s'est évertué à les situer dans la trame que géologues néerlandais et belges ont construite au fil du temps. C'est ainsi que pour l'ensemble de la période pléistocène (Fig. 6A), il a mis en évidence un gradient entre les dépôts compréhensifs, sableux et marins du nord vers les dépôts lacunaires, limoneux et continentaux du sud. Leur prisme, continu et relativement épais au nord, s'amenuise vers le sud. La plaine maritime française est donc l'espace où les deux types de faciès sont imbriqués, trahissant les variations du niveau marin durant cette période.

L'anticlinal du Boulonnais, qui bloquait l'extension marine, a été incisé comme l'illustre un dessin d'artiste (Fig. 3d) et en témoignent la paléofalaise de Sangatte et ses dépôts de piedmont (Fig. 7). A la même époque (fin du Chibanién = Pléistocène moyen) (Fig. 6A), le futur site de la carrière d'Herzeele (Fig. 8) se trouvait à l'interface entre la mer et les terres émergées (Meilliez & Styza, 2023) ; le niveau marin était donc alors supérieur à l'actuel de quelques mètres.

Puis, au dernier interglaciaire (Eemien) a succédé le dernier cycle glaciaire (Weichselien) qui a fait baisser le niveau marin de 120 m par rapport à l'actuel, dénudant à nouveau la Manche orientale, dont la vallée s'est élargie. Le pic du refroidissement a été atteint vers 20 000 ans (MIS 2 :

Fig. 4B, et 5), à la suite de quoi le réchauffement vers l'interglaciaire actuel a commencé. Sommé (1977, p. 513) a rappelé l'âge et les caractéristiques sédimentaires des dépôts, dans lesquels deux ensembles avaient été distingués en première approximation : Assise de Calais (Fig. 6B), plus sableuse, puis Assise de Dunkerque fréquemment à grain plus fin. Chacune contient plusieurs cycles, terminés la plupart avec des niveaux de tourbe qui s'anastomosent vers l'amont, dans l'estuaire de l'Aa, entre Saint-Omer et Watten (Gandouin *et al.*, 2007). Les études menées dans la plaine maritime belge montrent que le retour d'une activité tidale historique dans la profondeur de la plaine n'est pas forcément associé à une hausse du niveau de la mer, mais plutôt à une dégradation des tourbières favorisées par une extraction anthropique intense (Baeteman, 2016). Si la présence humaine a perduré dans un paysage littoral largement soumis aux flux et reflux des marées⁴, l'atterrissement s'est accéléré vers la fin du XI^e siècle ; la découverte de monnaies romaines sous ses dépôts a permis d'en dater le début de transgression de la fin du III^e siècle (Gosselet, 1893). Un retrait marin s'est ensuite amorcé vers la fin du XI^e siècle ; il a été accompagné par une volonté de l'espèce humaine de disposer des terres asséchées pour

4. L'estimation de la variation du niveau marin, pour les derniers milliers d'années, a surtout été basée sur une reconstitution bathymétrique de la zone littorale déduite de la proximité, latérale et verticale, de faciès très différenciés (avant-plage, chenal, vasière, marais salé, marais d'eau douce, pré salé, ... : voir Baeteman, 2016). Or, la zone d'interface littorale est large de plusieurs kilomètres, avec un marnage de l'ordre de 5 m ; ainsi, les corrélations entre sondages sont trop aléatoires pour garantir une absence de confusion entre superposition et juxtaposition latérale. D'où une vision historique très simplificatrice des variations bathymétriques.

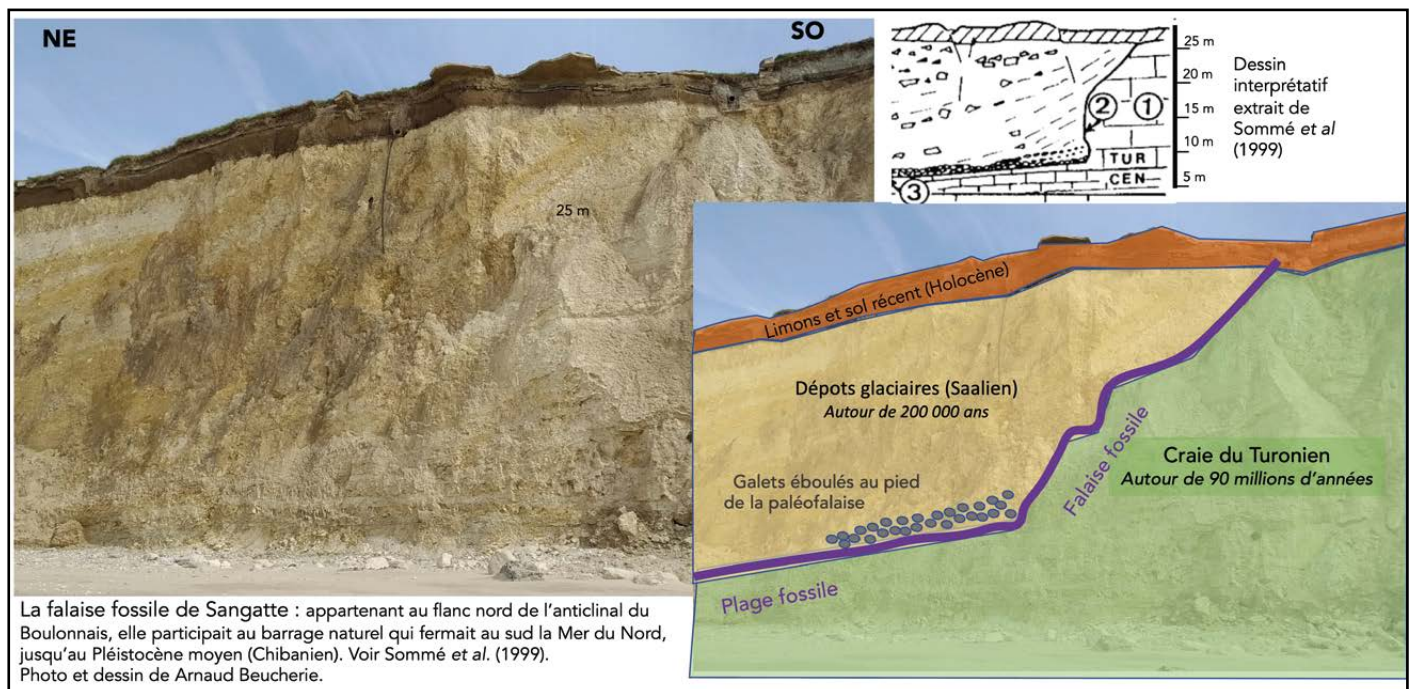


Fig. 7 – La paléo-falaise de Sangatte (localisation sur Fig. 2). Interprétation simplifiée d'après Sommé *et al.* (1999). Présentation par A. Beucherie (Journées Nationales de Géologie 2023).

Fig. 7 – The Sangatte paleo-cliff (location on Fig. 2). Simplified interpretation according to Sommé *et al.* (1999). Presentation by A. Beucherie (National Geology Days 2023).

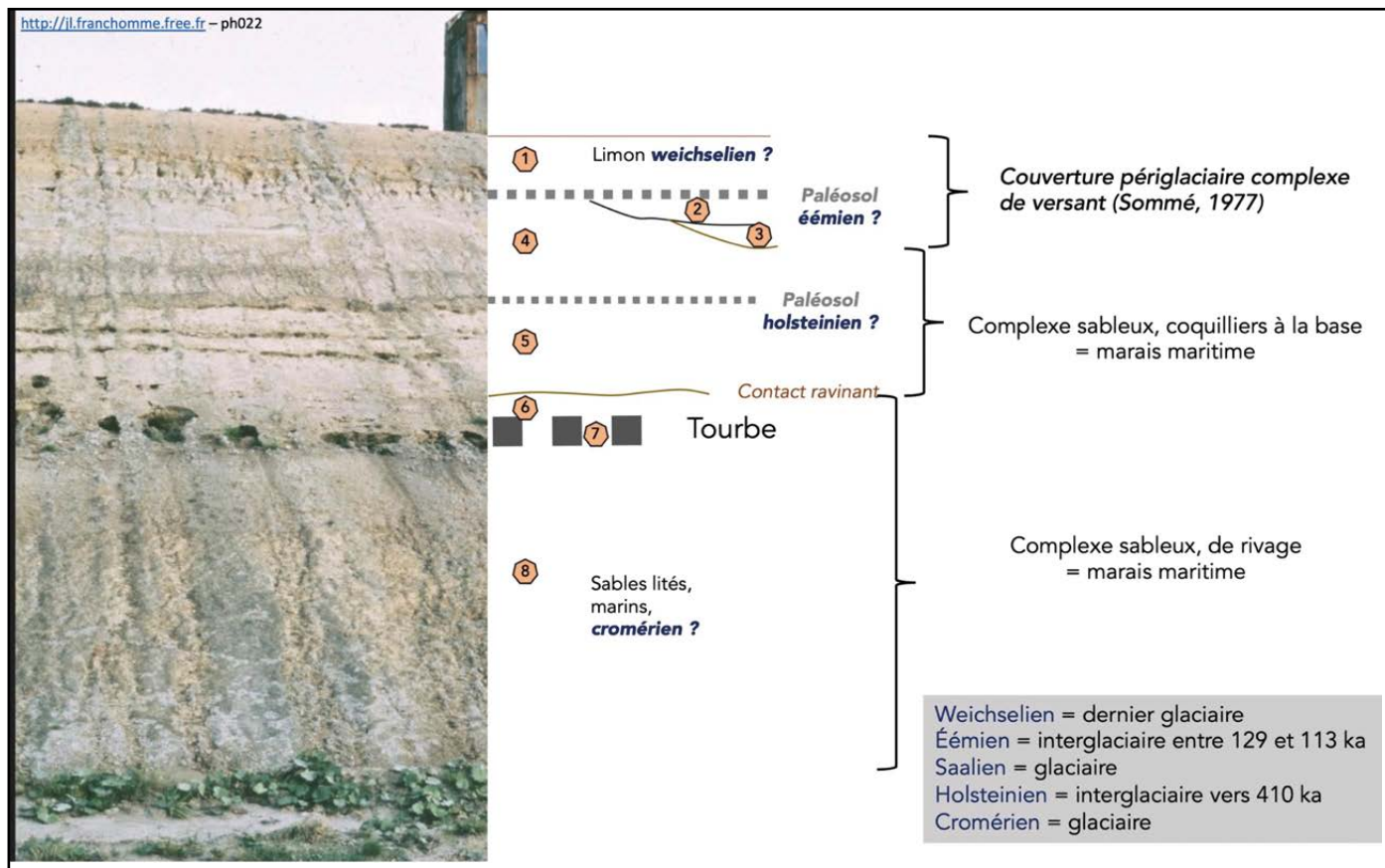


Fig. 8 – Vue partielle et interprétation géologique de la carrière d’Herzelee (Localisation sur Fig. 2). Illustration reprise de Meilliez & Styza (2023) avec autorisation du Comité Flamand de France. Photo extraite de <http://jl.franchomme.free.fr>; interprétation basée sur Sommé *et al.* (1999).

Fig. 8 – Partial view and geological interpretation of the Herzelee quarry (Location in Fig. 2). Illustration taken from Meilliez & Styza (2023) with authorization from the Flemish Committee of France. Photo taken from <http://jl.franchomme.free.fr>; interpretation based on Sommé *et al.* (1999).

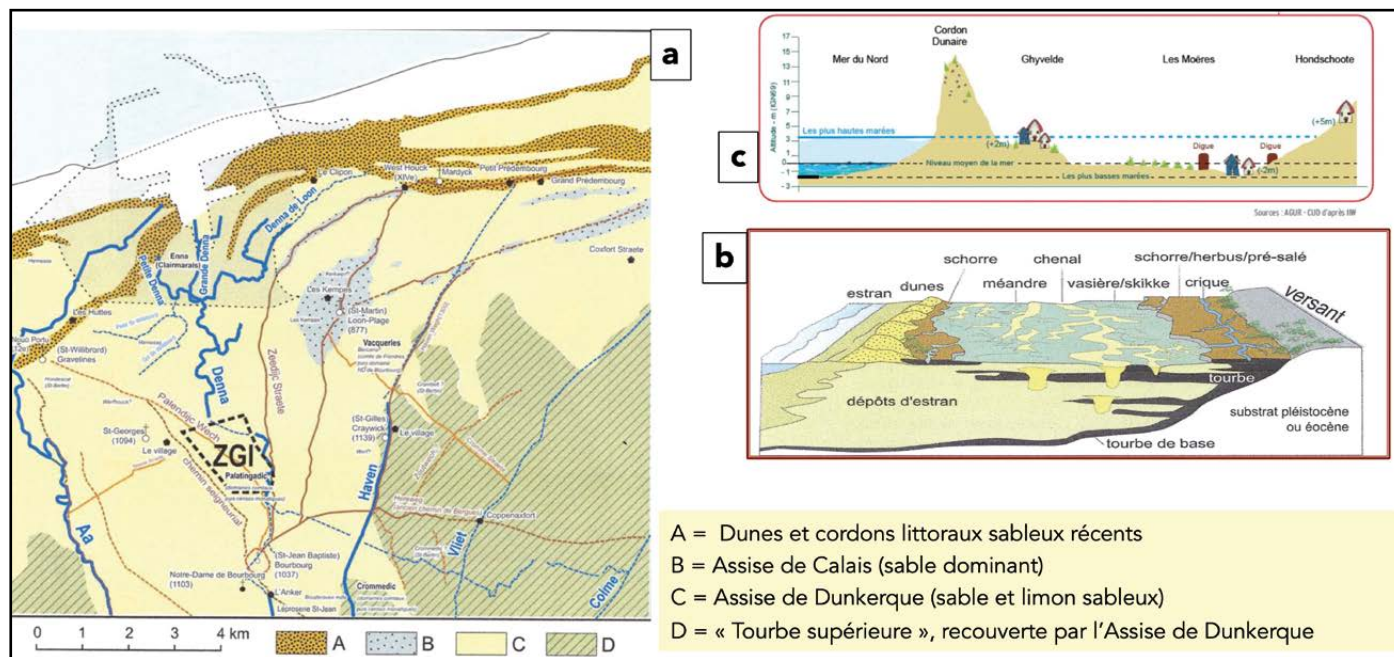


Fig. 9 – Illustration composite résumant les connaissances de l’environnement géologique de la Zone de Grande Industrie programmée à Bourbourg. 1 – Carte géologique extraite de Deschodt *et al.*, 2021; 2 – schéma tridimensionnel positionnant l’un par rapport à l’autre les faciès identifiés; 3 – Coupe transversale de la plaine maritime au niveau des Moères (localisation en Fig. 2).

Fig. 9 – Composite illustration summarizing knowledge of the geological environment of the Large Industry Zone planned for Bourbourg. 1 – Geological map taken from Deschodt *et al.*, 2021; 2 – three-dimensional diagram positioning the identified facies relative to each other; 3 – Cross section of the maritime plain at the level of Moères (location in Fig. 2).

une mise en culture (Delaine, 1969). Le projet de Zone de Grande Industrie (ZGI) programmé à Bourbourg (Fig. 9) a entraîné une étude d'archéologie préventive dont le résultat a été récemment publié (Deschodt *et al.*, 2021). Un schéma explique l'environnement actuel, en cette période où le niveau marin tend à s'exhausser (Fig. 9B). La remontée glacio-eustatique flandrienne s'est achevée au cours de l'Holocène. La courbe est plutôt bien connue maintenant (moyenne d'env. 1 m/siècle). Pour évoquer un taux de remontée moyen, il ne faut pas tenir compte des derniers milliers d'années où les oscillations du niveau de la mer ont été négligeables. La remontée du niveau de la mer, actuelle et modélisée pour le futur, est une conséquence de la dilatation de l'eau et d'un nouveau glacio-eustatisme causé par le réchauffement anthropique.

La question est donc de déterminer jusque quand il faut investir pour contenir l'évolution en cours, et à partir de quand il faut orienter les investissements vers une prise en compte de cette évolution, pour anticiper une adaptation progressive. Bien entendu, les deux dates peuvent différer d'un endroit à l'autre.

VISITE DE TERRAIN, PARTAGÉE AVEC L'UNIVERSITÉ DU TEMPS LIBRE (UTL) DE LILLE

Le 5 avril 2023, à l'initiative de l'UTL de Lille, une visite de terrain a conduit une cinquantaine de personnes dans les locaux de l'Agence d'Urbanisme de Dunkerque (AGUR)⁵. Un exposé présenté par Xavier Chelkowski et Philippe Parent, a précisé les enjeux, les risques et l'organisation (logistique, acteurs) du système des wateringues. Puis le groupe s'est rendu sur les sites de deux ouvrages dunkerquois majeurs (la croix, le barrage Tixier), sur un point de contrôle hydraulique des Moères (Caester Hof) et enfin au sommet de la colline de Watten.

Les enjeux de l'aménagement de ce territoire disputé à la mer

La mise en perspective géologique a rappelé que cette partie de territoire régional appelée *plaine maritime française* n'est que l'extrémité méridionale du domaine où terre et mer voient leur ligne d'affrontement changer de position au cours du temps, en Europe du nord-ouest (Fig. 4). Au cours du dernier million d'années, la structure tectonique présente (anticlinal Weald-Boulonnais) a contraint les eaux du ruissellement continental à fixer les estuaires de la Hem, de l'Aa et de la Tamise. L'ouverture du détroit du Pas-de-Calais par une cluse (Fig. 3) a entraîné de profondes modifications du système sédimentaire. A l'effet des marées s'est ajouté celui des courants franchissant le détroit dans les deux sens, en

fonction des cycles astronomiques et des variations climatiques. La conséquence en est que des courants longitudinaux redistribuent les sédiments fluviaux apportés par les cours d'eau qui aboutissent tant à la Mer du Nord qu'à la Manche (Anthony, 2000). Ce mécanisme a conduit aux accumulations à dominante sableuse des Assises de Calais puis de Dunkerque (Fig. 6). L'ensablement est rapide comme en atteste Gosselet (1893, p. 33) qui relate un dépôt approchant les 2 m, ayant comblé en un demi-siècle, un « *large bassin de chasse creusé pour y aménager une darse* ». Aujourd'hui, on comprend de mieux en mieux comment se construisent et migrent les corps sableux qu'apprécient les touristes, mais que craignent les aménageurs (Trentesaux, 1993, 2005).

Dans un contexte de montée actuelle du niveau marin, avec un relief très peu contrasté mais quand même différencié entre autres par les interventions humaines (canaux, exploitations de tourbe, digues), la position de la ligne de rivage varie de façon irrégulière. On constate simplement que Strabon, accompagnant l'armée de César en Gaule (I^{er} siècle BC), a découvert les marées et leurs effets, ce qu'il ne connaissait pas en Méditerranée. Et la transgression qui s'est manifestée dès la fin du III^e siècle et a recouvert les traces de la période gallo-romaine, a connu son apogée au IX^e siècle. Les terres libérées de la mer ont peu à peu été colonisées par une population agricole dès le X^e siècle (Deschodt *et al.*, 2021). Gosselet (1893), Delaine (1969) rapportent des faits précis et relatent les aléas de ce retrait marin apparent qui illustrent l'affrontement entre d'une part la volonté des humains à occuper et valoriser de nouvelles terres, et d'autre part les à-coups de tempêtes particulièrement sévères (submersions marines). Difficile de faire la part des responsabilités entre les irrégularités naturelles et les crises humaines (guerres) qui ont déterminé les retours locaux et temporaires d'un environnement marin. C'est pendant cette période que les humains ont très nettement commencé à transformer le paysage, et donc modifier sa dynamique évolutive, par le creusement de canaux (*watergangs* ou *watergands* selon les auteurs) et la construction de vannes et d'écluses. Une date décisive est la mise en place d'équipements (canaux et vis d'Archimède) par Cobergher au XVII^e siècle, pour assécher la dépression des Moères.

Aujourd'hui, Le dispositif en place protège la plaine maritime, un territoire de 100 000 hectares sur lequel vivent environ 450 000 habitants. Ce territoire abrite deux grands ports (Dunkerque et Calais) et le terminal français du Lien TransManche; il dispose aussi de la plus puissante des centrales nucléaires françaises et s'apprête à en accueillir d'autres; il juxtapose des sites industriels importants et en aménage d'autres aussi. Ce qui devrait contribuer à accroître tant le nombre de résidents que le nombre de passagers (rail, route). Et tout cela doit cohabiter avec une agriculture qui tente de survivre : espace qui se restreint, coin salé marin qui gagne en profondeur, pollutions industrielles. On doit

5. Les institutions citées sont identifiées par leur acronyme et leur site en webographie.

aussi ajouter l'enjeu du développement touristique, tout en le reconnaissant plus entreprenant en Belgique qu'en France. On comprend que les enjeux économiques soient lourds face au déterminisme de l'évolution géologique, certes lent mais inéluctable.

Le problème à résoudre et les acteurs pour le faire

Le problème à résoudre n'est pas que celui d'empêcher la mer d'envahir l'intérieur des terres, il est aussi de permettre aux fleuves d'évacuer à la mer l'eau collectée dans leurs bassins versants (Fig. 10); et ce à tout moment, y compris pendant une marée haute de vives-eaux, ce qui n'est plus le cas actuellement, sans recours à des stations de pompage. A marée basse de vives-eaux, l'évacuation gravitaire est la situation normale. A marée basse de mortes-eaux, l'évacuation gravitaire est de moins en moins efficace et divers mécanismes ont été historiquement élaborés pour procéder à cette évacuation malgré tout. Il faut noter qu'une telle situation est normale par rapport à la dynamique naturelle, mais pas au regard des humains. En effet, c'est cette disposition

qui contribue à envaser naturellement les estuaires, bloquant peu à peu les sédiments collectés en amont (Anthony, 2000). On comprend donc qu'un des moyens d'aider à la gestion de la préservation du pays des waterings est de réduire le plus possible les excès de sédiments que collectent les bassins versants. Qu'il s'agisse de travaux publics ou de pratiques agricoles, nombre d'actions dans ce sens sont possibles; elles doivent être considérées et suivies d'effets.

Si l'eau ne peut être évacuée gravitairement, il faut donc la stocker temporairement⁶ dans des sites compatibles avec les planifications du développement urbain et de l'aménagement du territoire. Ceci peut entraîner des conflits d'usage dans un territoire où l'activité se densifie (voir plus haut).

Aujourd'hui, l'Institution Intercommunale des Waterings (IIW) est un syndicat mixte fermé auquel adhèrent 6 EPCI, les Sections des Waterings (Fig. 11). Afin de bien

6. Aujourd'hui, l'eau est stockée dans les canaux. Pour éviter les débordements, des stations de pompage sont actionnées afin d'évacuer le trop plein à la mer. Dans le futur, mais il faut une décision politique, peut-être que des zones de stockage seront aménagées. Mais il faudra un gros travail de pédagogie et de concertation avec la profession agricole. [Note de X. Chelkowski]

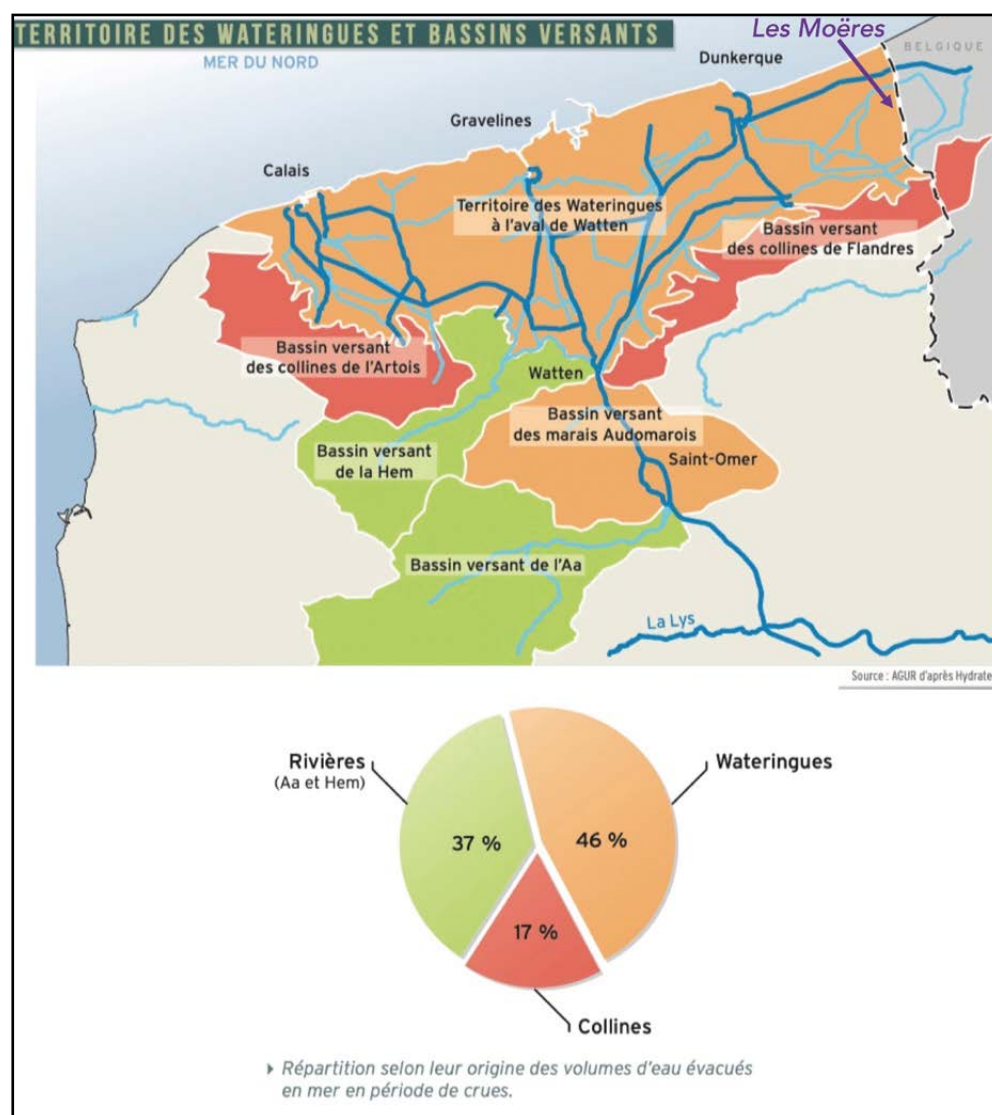


Fig. 10 – Le système des waterings doit évacuer à la mer les eaux apportées par les cours d'eau (fleuves, canaux) ainsi que les eaux de ruissellement des pieds de côtes. La tendance actuelle de la montée du niveau marin rend cette évacuation de plus en plus problématique en fonction des marées. Schéma fourni par l'AGUR.

Fig. 10 – The watering system must evacuate to the sea the water brought by the water-courses (rivers, canals) as well as the runoff water from the foot of the hillsides. The current trend of rising sea levels makes this evacuation increasingly problematic depending on the tides. Diagram provided by AGUR.

apprécier l'interaction de cette organisation avec l'évolution géologique naturelle il faut en rappeler le principe opérationnel (Fig. 12). Aujourd'hui, l'exutoire à la mer est unique : à Dunkerque, l'ouvrage Tixier est une porte particulièrement équipée (voir détail ci-dessous). L'eau arrive par des canaux, navigables, dont le réseau est géré par VNF (Voies Navigables de France). Ces canaux reçoivent eux-mêmes les écoulements acheminés par les watergangs qui délimitent les casiers hérités de l'histoire pluriséculaire et gérés par les Sections de Wateringues. Chacune est une association obligatoire des propriétaires fonciers locaux, qui payent une taxe avec laquelle la section assure le faucardage et l'entretien des watergangs, l'électricité des stations de relevage et les réparations lorsque nécessaire. Cette organisation, mise en place au fil des besoins, a permis au territoire de faire face à des épreuves variées. La jonction entre deux ouvrages linéaires est contrôlée par un système de vannes. Certaines sont encore exclusivement manuelles tandis que des systèmes de commandes asservies tendent à automatiser les nœuds des réseaux.

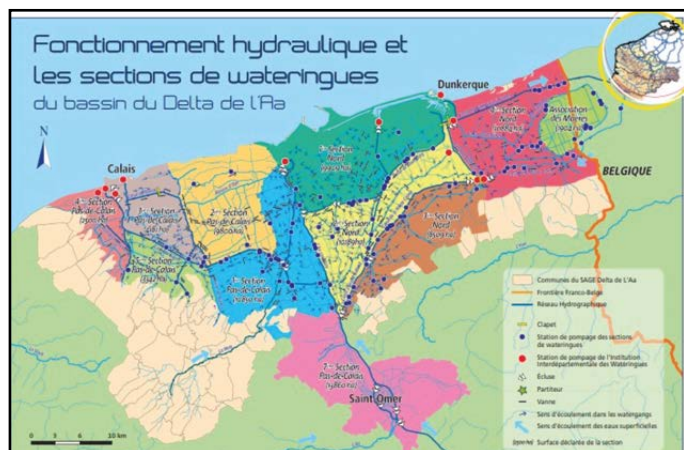


Fig. 11 – Carte fonctionnelle des wateringues : chaque section gère son territoire ; l'ensemble est coordonné par l'Institution Intercommunale des Wateringues. A noter que la frontière F-B traverse la dépression des Moères. Schéma fourni par l'AGUR.

Fig. 11 – Functional map of watering holes: each section manages its territory; the whole is coordinated by the Intercommunal Institution of Wateringues. Note that the F-B border crosses the Moères depression. Diagram provided by AGUR.

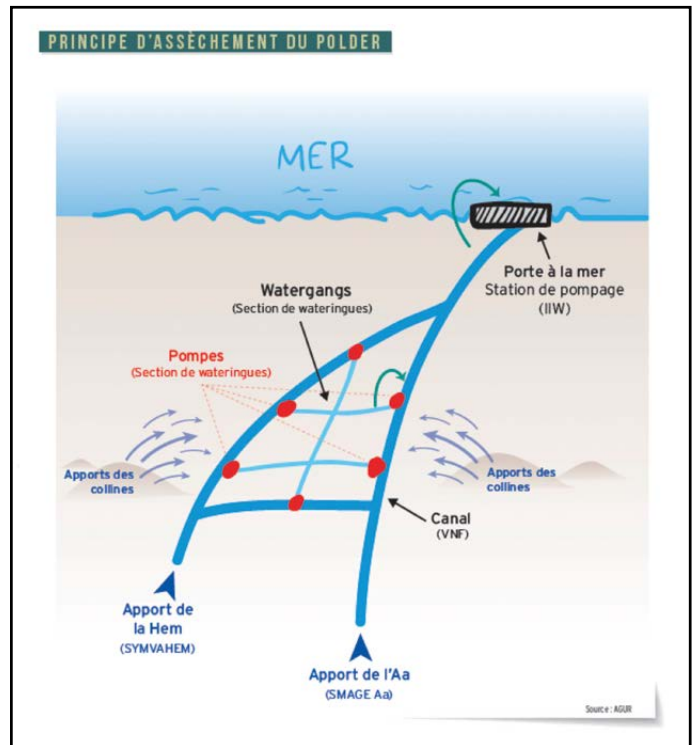


Fig. 12 – Schéma illustrant le principe d'organisation des wateringues (détails explicatifs dans le texte). Schéma fourni par l'AGUR.

Fig. 12 – Diagram illustrating the principle of organizing wateringues (explanatory details in the text). Diagram provided by AGUR.

L'IIW assure les compétences GEMAPI (gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations), pour le compte de ses adhérents, en coordination avec d'autres syndicats intercommunaux (SMAGE-AA, SYMVAHEM). « La coordination des acteurs est assurée par des protocoles de gestion des eaux, par secteur hydraulique, approuvés par arrêtés préfectoraux. L'Institution anime aussi la Commission Locale de l'Eau, en charge de l'élaboration et de la révision du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) du delta de l'Aa » (précisions apportées par Philippe Parent, directeur de l'IIW).

Avec l'appui des services techniques de l'AGUR, l'IIW (2014) a élaboré divers documents expliquant les enjeux, les techniques utilisées et les interlocuteurs nécessaires à cette gestion complexe. En particulier, la page numérique <https://www.institution-wateringues.fr/le-territoire/les-wateringues-comment-ca-marche/> est un outil remarquablement présenté pour expliquer comment ça fonctionne, et rendre compte du difficile équilibre à maintenir en permanence. Le lecteur est invité à s'y référer.

Aujourd'hui, même si l'Institution IW a le contrôle sur l'ensemble du dispositif, l'organisation territoriale témoigne encore de l'Histoire. Dès le début de la poldérisation, les comtes de Flandres ont accordé des droits d'assèchement à des paysans qui ont inventé des procédés, à l'échelle de leur exploitation. Enlever l'eau de chez soi et l'envoyer chez le voisin conduit

inévitablement à des conflits. Il a fallu attendre le XII^e siècle pour que Philippe d'Alsace, comte de Flandre, essaye de mettre en place une organisation hiérarchisée. Les guerres, les vicissitudes météorologiques n'allègent pas les difficultés techniques et de cohabitation. En 1619, Wenceslas Cobergher, ingénieur flamand particulièrement inspiré, met en place pour son compte et celui de la communauté un dispositif rationnel pour assécher la dépression des Moères, dont le fond n'a jamais cessé, historiquement, d'être situé sous le niveau moyen de la mer (Fig. 9c). Peu à peu, en dépit de changements politiques drastiques, les sections de wateringues ont assuré efficacement la gestion du système de leur territoire; elles subsistent et poursuivent leur tâche; l'IIW a simplement apaisé, rationalisé, coordonné les travaux et les relations entre sections. Et c'est certainement l'une des meilleures conditions nécessaires à la pérennité de ce système complexe, car il permet de responsabiliser au plus près les usagers.

Les ouvrages de Dunkerque

Situation héritée de l'histoire et de la géographie, l'exutoire unique de l'ensemble est localisé en arrière de la dune littorale naturelle, dans l'ancienne lagune (Fig. 13a). Le nœud majeur est connu des riverains sous le nom de La Croix des 4 Écluses (Fig. 13b) : quatre canaux y convergent, chacun avec son propre niveau. Un cinquième, le canal exutoire, conduit l'eau à la mer, via l'ouvrage Tixier (Fig. 13c). Chaque canal peut, en cas de besoin, recueillir temporairement le trop-plein d'un autre via une station de pompage (Fig. 13e). Pour ne pas bloquer les pompes, un dégrilleur collecte les embâcles flottant venus de l'amont; il a été récemment automatisé (Fig. 13f). « *Seul le canal des Moères peut se déverser par pompage dans le canal Exutoire. Il n'y a pas de déversement entre les autres canaux du dunkerquois. Tout converge par pompage ou en gravitaire vers le canal exutoire* » [Précisions apportées par Xavier Chelkowski]. A noter qu'en outre, le canal des Moères passe en siphon sous l'écluse du canal de Furnes (Fig. 13e).

L'ouvrage Tixier est une écluse de grande dimension, équipée de vannes. En cas de nécessité, la station de pompage Tixier, située en amont du barrage vanné, peut évacuer le trop-plein d'eau même à marée haute, (voir détails sur la page numérique de l'IIW mentionnée plus haut). Grâce à la digue des Alliés qui protège le canal exutoire, le volume disponible permet un stockage temporaire courant (Fig. 13d). « *Un réensablement massif (1,5 millions de m³ de sable) a été réalisé pour protéger la digue, pour faire en sorte que la mer ne vienne plus jamais frapper l'ouvrage et risquer de le rompre. Des filets brise-vent et des plantations d'Oyats ont été opérées pour éviter les envols et limiter les volumes pour les futurs réensablements* » [Précisions apportées par Xavier Chelkowski].

La dépression des Moères

Cette dépression est le dernier marqueur naturel de la dynamique d'ensablement côtier depuis l'ouverture du détroit du Pas-de-Calais (Fig. 2 et 3), qui a occlus une lagune en arrière du cordon dunaire. Qu'au cours de l'histoire humaine cet espace ait été difficile à assécher n'est guère étonnant, situation qui, dans la dynamique actuelle (Fig. 9c) ne peut que s'aggraver. Mais comme l'espèce humaine n'est elle-même pas très simple, cette dépression est traversée par la frontière franco-belge. Même s'il y a volonté partagée de traiter ensemble un problème d'aménagement frontalier dans le cadre d'Interreg (Projet Mageteaux : webographie), trouver une solution commune aux différents interlocuteurs et à la pugnacité infatigable de la nature ne fera pas que des heureux.

Au début du XVII^e siècle, l'architecte et ingénieur flamand Cobergher ne pouvait pas avoir conscience que le niveau marin arrivait alors à son point le plus bas après 7 siècles de descente progressive, ni que la remontée qui se fait sentir dès le début du XIX^e siècle, aura la malchance d'être amplifiée par l'activité humaine, via l'utilisation en masse des hydrocarbures et le rejet corrélatif de CO₂ dans l'atmosphère. En 3 siècles, la remontée a effacé 7 siècles de baisse. Cet ingénieur avait pourtant eu une excellente idée (Fig. 14) en quadrillant le terrain plat de fossés (*watergands*) qui collectent les eaux douces issues des précipitations et ruissellements, puis en les relevant par des vis d'Archimède activées par des moulins à vent, vers un canal externe (le *Ringslot*). Aujourd'hui, le système n'a changé que la source d'énergie en faveur de l'électricité. C'était donc un bon système, qui a pourtant deux faiblesses. D'une part, il est très facile de percer la digue qui ceinture la dépression; plusieurs conflits armés en ont fait la démonstration. D'autre part, il faut se préserver des venues possibles d'eau salée, soit par submersion marine naturelle ou conflit armé, soit par infiltration souterraine, car les sables sous-jacents sont de plus en plus soumis à la pression *per ascensum* du coin salé corrélatif de la montée du niveau marin.

Si l'on se base sur une évolution naturelle dont l'histoire géologique récente nous indique la tendance (voir 1^{re} partie), la prochaine descente du niveau marin se fera attendre encore quelques siècles, avant d'accompagner une prochaine éventuelle glaciation. Le calendrier de l'espèce humaine ne peut pas s'accommoder de telles perspectives. Deux types de stratégie sont dès lors possibles :

- ✧ soit l'espèce humaine décide de continuer à vouloir dominer la dynamique naturelle, et il faudra investir dans des technologies de protection de plus en plus coûteuses pour faire face aux submersions marines (de plus en plus fréquentes et durables), aux risques de conflits armés (l'actualité montre que leur survenue est toujours possible);



c L'ouvrage Tixier, unique exutoire des wateringues.

d La digue des Alliés protège le canal exutoire ; est elle-même protégée par une dune de sable, reconstituée chaque année.

a Gestion des écoulements

DUNKERQUE

SAINTE-FLORENTINE

COUDEKERQUE-BRANLE

COUDEKERQUE

CAFFELLE LA GRANDE

Le port de Dunkerque-centre et ses ouvrages de régulation.

b La croix des canaux gère les différences de niveau qui permettent un stockage temporaire des eaux, grâce à une station de pompage.

b CANAL DE JONCTION

OUVRAGE DE JONCTION

CANAL EXUTOIRE

STATION DE POMPAGE DES 4 ÉCUSES

DÉGRIILLEUR

ÉCLUSE DE FURNES

CANAL DE FURNES

DÉRIVATION DU CANAL DE BERGUES

CANAL DES MOËRES



e Passage en siphon du canal des Moëres sous l'écluse du canal de Furnes, et sa pompe de relevage.



f Dégriilleur automatisé collectant régulièrement les embâcles venus de l'amont.

Fig. 13 – Les ouvrages dunkerquois : a) extrait de carte de situation des photos suivantes ; b) la Croix des 4 écluses gérant la répartition des eaux de ruissellement venues de l'amont et, éventuellement le trop-plein retenu par l'ouvrage Tixier avant son évacuation à la mer ; c) l'ouvrage Tixier, une écluse complexe ; d) la Digue des Alliés ; e) pompe de relevage de l'eau du canal des Moëres ; f) dégrilleur automatisé. (Crédits photographiques et illustrations de J. Lecomte, C. Maréchal et R. Duchemin).

Fig. 13 – The Dunkirk works: a) extract from the situation map of the following photos; b) the Croix des 4 locks managing the distribution of runoff water from upstream and, possibly, the overflow retained by the Tixier structure before its evacuation to the sea; c) the Tixier structure, a complex lock; d) the Allied Seawall; e) water lifting pump from the Moëres canal; f) automated screen. (Photographic credits and illustrations by J. Lecomte, C. Maréchal and R. Duchemin).



Fig. 14 – Le site des Moères : Carte topographique montrant bien que la Petite Moère est un hameau en bordure d'une lagune en cours de comblement (a) ; que la Grande Moère en constitue la partie la plus profonde, ceinturée par un fossé, le Ringslot (d), en lien avec les canaux extérieurs. Une vis d'Archimède fait passer l'eau de l'un à l'autre (b et c). (Crédits photographiques et illustrations de J. Lecomte, C. Maréchal et F. Meilliez).
 Fig. 14 – The Moères site: Topographic map showing that Petite Moère is a hamlet on the edge of a lagoon currently being filled in (a); that the Grande Moère constitutes the deepest part, surrounded by a ditch, the Ringslot (d), linked to the external canals. An Archimedes screw passes water from one to the other (b and c). (Photographic credits and illustrations by J. Lecomte, C. Maréchal and F. Meilliez).

✧ soit l'espèce humaine décide d'adapter progressivement ses activités selon leur teneur, leurs enjeux, leur accommodation possible (agriculture, industrie, habitat).

Choisir la seconde stratégie est possible, mais alors tous les choix doivent être cohérents. De nombreuses régions du monde démontrent qu'on sait construire et vivre sur une étendue marine, y accueillir de l'habitat, des activités industrielles et même agricoles. En France, les autorités élaborent des plans jalonnés de dates pour les faire évoluer; ce qui ne garantit pas que toutes les parties prenantes soient convaincues par ce calendrier. Belges et Néerlandais choisissent de fixer des seuils de niveau marin comme jalons, et de définir pour chacun les mesures à prendre en conséquence; les investissements pour s'adapter au mieux sont échelonnés selon la vulnérabilité des cibles locales. L'avenir tranchera entre ces deux approches.

Dans tous les cas, il faut aussi assurer la ressource en eau douce pour tous les usagers du territoire. Le soubassement sableux est déjà saumâtre et inutilisable. L'eau douce doit donc venir de l'extérieur. Aujourd'hui elle vient du sous-sol crayeux qui forme le flanc nord de l'anticlinal du Boulonnais, dans lequel la Hem a inscrit son bassin versant (Fig. 16). Une station de pompage, installée à Houille, la renvoie vers un réservoir installé sur la Montagne de Watten : c'est l'un des châteaux d'eau qui alimentent le Dunkerquois. Satisfaisante aujourd'hui, cette solution n'est pas durable. En cas de nécessité, un prélèvement de surface venu de la Lys et

transitant par le canal de Neuffossé apporte un complément appréciable (précision apportée par Xavier Chelkowski). D'autres alternatives sont indispensables. Les eaux de ruissellement actuelles transitent par les watergangs jusqu'à la mer. N'est-il pas possible de réfléchir à un stockage d'au moins une partie de ces eaux de ruissellement pour tous les usages hors alimentation humaine? Où trouver les terrains pour une telle méga-bassine? Les explications données ci-dessus mettent en évidence qu'une méga-bassine existe déjà; qui plus est, elle est naturelle! La dépression des Moères est tout à fait appropriée... à condition d'en imperméabiliser le fond pour éviter une contamination *per ascensum* par l'eau salée.

Une telle transformation ne peut se faire que sur plusieurs années et doit se préparer. Il faut notamment réfléchir à la façon de valoriser cette étendue d'eau douce. Un certain tourisme pourrait y trouver à faire.

Le point de vue de Watten

Le lieu-dit *Montagne* de Watten (Fig. 15) est l'épaule de rive droite que l'Aa a entaillé en travers d'une structure qui a la valeur d'une cuesta, déterminée par la résistance à l'érosion de l'Argile des Flandres. En l'incisant comme une cluse, l'Aa a érodé et évacué les sables thanétiens sous-jacents, que les courants marins (de marées et longitudinaux) ont ensuite étalé sur la plaine maritime. Houthuys (2014) a démontré que les grès ferrugineux qui coiffent les Monts de

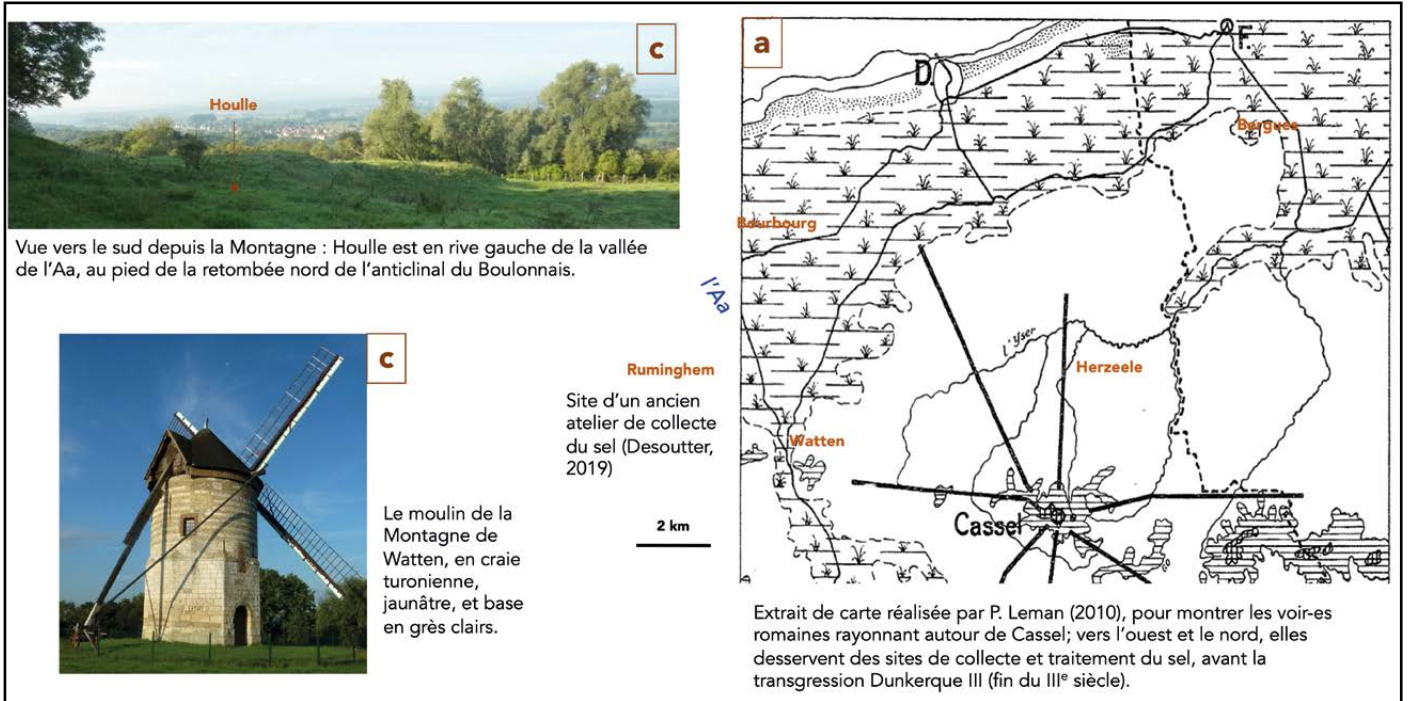


Fig. 15 – La Montagne de Watten.
Fig. 15 – Watten Mountain.

Flandres jalonnent le front progradant de corps sableux dans une mer peu profonde, largement ouverte vers le nord durant le Priabonien (Eocène terminal, entre 37,8 et 33,9 millions d'années). A faible profondeur, ils auraient fixé le fer lessivé sur le continent sous climat tropical (Ramstein, 2015), qui a ainsi précipité dans leur porosité. Cette ligne de paléorivage est oblique sur l'anticlinal du Boulonnais – Weald qu'elle rejoint dans le secteur de Watten (Fig. 16). La surrection de l'anticlinal débutait à cette époque, amenant à l'air libre les dépôts récents thanétiens et yprésiens. Aujourd'hui, la lecture du paysage en surface est rendue difficile car des limons périglaciaires et des instabilités gravitaires ont affecté le flanc de l'anticlinal et empâté une morphologie sans doute plus contrastée (Sommé, 1977).

Avec un superbe panorama vers le nord, l'ouest et le sud, que masquent de plus en plus les arbres, ce site ne pouvait être autre chose qu'un point stratégique au cours de l'Histoire et pas seulement militaire. La *Montagne* accueillit d'abord un prieuré, puis un monastère, dont les occupants ont été témoins de la poldérisation croissante à partir du XI^e siècle. La construction d'un moulin à vent était aussi une évidence. Le XIX^e siècle a vu le développement de carrières exploitant l'Argile des Flandres pour une tuilerie. Une cité ouvrière de Watten témoigne encore de ce passé, arrêté depuis la fin des années 1980. Et la Seconde Guerre Mondiale a fait de ce sommet et du reste du bâtiment abbatial, un observatoire complémentaire du système installé en Forêt d'Eperlecques (sur l'autre rive de l'Aa) et de la base d'Helfaut, site aujourd'hui touristique dit de *La Coupole*.

La Montagne de Watten est un site qui mériterait d'accueillir un véritable observatoire de la plaine maritime.

CONCLUSION

Le territoire qui est aujourd'hui appelé Pays des Wateringues est le fruit d'un delta fluvial, celui de l'Aa, établi au-devant du flanc redressé (nord) de l'anticlinal dissymétrique du Boulonnais (Fig. 16), dont la craie souligne la présence par un crêt en France et en Angleterre.

Durant les épisodes glaciaires durant lesquelles une calotte continue entre les Îles Britanniques et la Scandinavie bloquait l'évacuation vers l'Atlantique nord des eaux fluviales de l'Europe du nord, un lac s'accumulait jusqu'à ce que son niveau atteigne la crête de l'anticlinal du Weald-Boulonnais. L'évacuation qui s'est alors mise en place a incisé une cluse en travers de cet anticlinal. Les travaux nécessaires au Lien TransManche ont donné l'occasion d'étudier les Fosses Dangeard, une structure en bassines creusées dans les terrains du Crétacé supérieur mais emplies de sédiments quaternaires. Un accord est maintenant établi pour y reconnaître des points de chutes d'eau de vidange du lac proglaciaire. Ce mécanisme a fonctionné deux fois, alimentant le Fleuve Manche, vers 450 000 et 160 000 ans. La connexion entre l'Atlantique et la Mer du Nord par la Manche engendre des courants qui reprennent les deltas fluviaux, dont celui de l'Aa. Les plaines côtières de Flandre et du Marquenterre en sont les enregistrements. La dynamique en cours du réchauffement climatique, en interactions fortes avec les activités anthropiques, est accélérée depuis 300 ans. Elle conduit à

un ensablement inéluctable du trait de côte, modulé par les variations météorologiques locales. Il est impossible d'évaluer la durée durant laquelle la montée marine va se poursuivre, et encore moins son intensité.

Fig. 16 – Le delta de l'Aa, vu depuis le nord-ouest. Image fournie par l'AGUR.

Fig. 16 – The Aa delta, seen from the northwest. Image provided by AGUR.



Remerciements : Ce travail est collectif, à la convergence d'actions différentes par leur finalité : recherche pour améliorer la compréhension de la géologie régionale, traduction de ces recherches pour des accès scolaire, pour les gestionnaires territoriaux et tout public. Les auteurs remercient l'UTL, et en particulier François Buguel pour avoir stimulé ce travail (conférence, visite de terrain). Ce qui a permis d'ouvrir une coopération fructueuse avec l'AGUR, en particulier Xavier Chelkowski, et avec l'IIW par l'intermédiaire de son directeur, Philippe Parent. Outre les signataires, de nombreux adhérents SGN – notamment les membres du Groupe Médiation - ont contribué à lire et relire des passages, à apporter des précisions, à suggérer des liens et d'autres sites où développer une approche territoriale intégrée analogue.

COMMENT SURVEILLER LA QUALITÉ DES EAUX SUPERFICIELLES POUR EN CONNAÎTRE LA QUALITÉ ? EXEMPLE DU MARAIS D'ISLE DE SAINT-QUENTIN

How to monitor the quality of superficial waters? Case study of the Saint-Quentin Marais d'Isle

Emilie Prygiel

Direction territoriale Hauts-de-France | Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, SAINT-QUENTIN
emilie.prygiel@cerema.fr

Justin Lecomte

Direction territoriale Hauts-de-France | Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, LILLE
Justin.lecomte@cerema.fr

INTRODUCTION

Le marais d'Isle de Saint-Quentin (Aisne) est situé au cœur d'une Réserve Naturelle Nationale, unique réserve de France située en milieu urbain. Elle abrite de nombreuses espèces végétales et animales et appartient au réseau Natura 2000 au titre de la Directive Oiseaux. Alimenté par la Somme, rivière qui prend sa source à Fonsomme, à

12 km en amont, ce marais de 47 ha est traversé par le cours d'eau et parsemé d'étangs de différentes tailles et de petits chenaux. Mais la qualité de ce milieu aquatique est difficile à connaître et à protéger du fait des nombreuses pressions qui s'exercent, en particulier les pressions anthropiques dues à sa localisation en milieu urbain (Fig. 1). Les eaux du marais sont ainsi soumises à la pollution par les eaux pluviales et par celles issues des réseaux d'assainissement, et subissent une

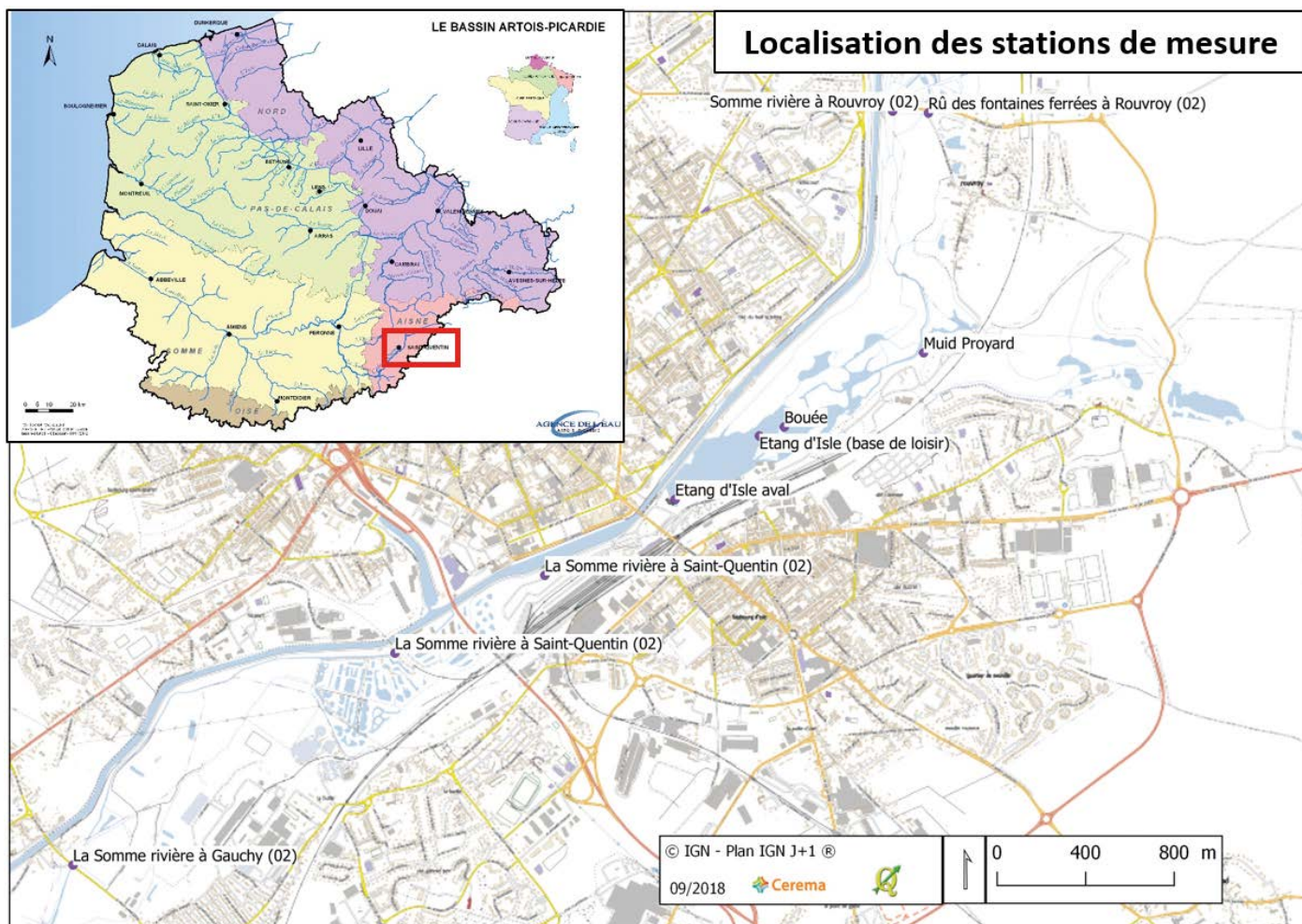


Fig. 1 – Localisation de la Somme rivière et du marais d'Isle de Saint-Quentin, et des points de mesure de la qualité de l'eau.

Fig. 1 – Location of the Somme River and the marais d'Isle de Saint-Quentin, and water quality measurement points.

pression hydraulique occasionnée par un complexe système de régulation, comprenant entre autres une vanne à l'exutoire du marais. Ces pressions se répercutent sur la faune et la flore aquatiques des étangs du marais, et sont par exemple perceptibles au travers de la faible diversité des peuplements piscicoles et de la raréfaction des herbiers de macrophytes.

Co-gérée par la Communauté d'Agglomération de Saint-Quentin (CASQ) et le Conservatoire des Espaces Naturels (CEN), la Réserve bénéficie d'un plan de gestion (Léglise *et al.*, 2018) et a fait l'objet de différentes études depuis 1991 (Quris et Guislain 2018), visant à améliorer la connaissance de la qualité chimique de l'eau et des sédiments, et de son système hydraulique.

L'étude Cerema-Agence de l'Eau Artois-Picardie (AEAP) de 2017 (Prygiel *et al.*, 2019) avait pour objectif, conjointement avec les gestionnaires de la Réserve, d'améliorer la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème Somme comprenant le marais et la Somme rivière, d'amont en aval. Des focus spécifiques ont été dédiés à l'étude de la qualité de l'eau et des sédiments et à leur évolution dans le temps et l'espace, et à l'étude de l'impact du système hydraulique sur la qualité des eaux de surface.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Durant l'année 2017, Cerema, AEAP, CEN et CASQ ont collaboré pour mener une étude de connaissance de la qualité de l'eau dans le marais et la Somme. Un premier suivi a été mis en œuvre durant quelques semaines au printemps 2017 pour évaluer l'impact des ouvrages hydrauliques, déversoirs d'orage (DO) et vanne d'exutoire du marais, par la réalisation de mesures et échantillonnages ponctuels dans les eaux de surface, et par l'installation des stations de mesures automatiques de l'AEAP, en amont et en aval du marais.

Un second suivi a été mis en place pour étudier l'évolution des eaux de surface au cours de l'année 2017. L'AEAP a mis à disposition sa bouée automatique (Anhydre OMC 7006; <http://www.anhydre.eu/bouee.html>, consulté en août 2023), assurant la mesure de plusieurs paramètres physico-chimiques comme l'oxygène dissous, le pH, la conductivité etc., et des paramètres biologiques : des pigments algaux (chlorophylle *a* notamment) permettant le suivi de l'évolution de la biomasse algale. La bouée a ainsi été installée dans le grand étang de la réserve naturelle et a enregistré les données des différents paramètres de février à décembre, à raison d'une mesure toutes les heures (Fig. 2).

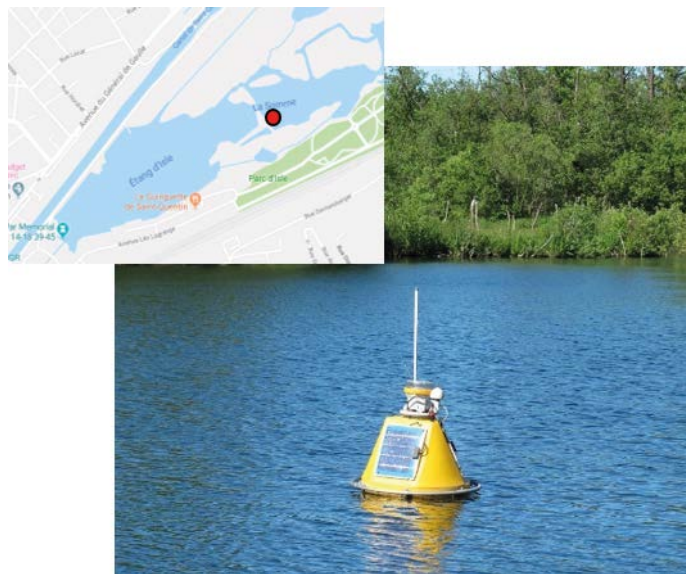


Fig. 2 : Bouée automatique de mesure des paramètres physico-chimique et biologique et localisation dans le marais.

Fig. 2 – Automatic buoy for measuring physico-chemical and biological parameters and location in the marsh.

L'AEAP a également assuré le financement d'analyses chimiques ponctuelles sur les eaux de surface (une fois par mois) et les sédiments (deux fois dans l'année), dans l'étang, dans la Somme en amont et en aval du marais, et dans ses affluents (Fig. 1). Des analyses taxonomiques du phytoplancton (Aquascop 2018) ont également été réalisées dans le grand étang, au niveau de la bouée, mensuellement de mars à octobre.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Impact des ouvrages hydrauliques sur la qualité des eaux de surface

Le suivi saisonnier qui avait pour but d'identifier les impacts des DO et de la vanne d'exutoire sur la qualité des eaux du marais et de la Somme en aval n'a pas été concluant, du fait du dysfonctionnement de la vanne à cette période et de l'absence d'événements pluvieux ayant limité le fonctionnement des DO au cours de l'étude.

Qualité des eaux de la Somme et du marais

Azote et phosphore ont fait l'objet d'un suivi ponctuel et mensuel dans la Somme et le marais. En moyenne sur l'année 2017, on constate que les teneurs en phosphore restent relativement faibles et relèvent du bon voire du très bon état physico-chimique, au regard des seuils de la DCE (soit 0,1 et 0,5 mg.L⁻¹ pour le très bon et le bon état respectivement; MEEM 2016). Rivière et étangs sont plus enrichis en azote (nitrates et ammonium) avec des concentrations qui relèvent de l'état médiocre à bon selon les stations de mesure. En effet,

on constate une forte variabilité des concentrations, notamment dans les affluents de la Somme en amont du marais. Ainsi, le ru du Muid Proyard, bien que présentant un faible débit, contient une forte charge en ammonium ($3,04 \text{ mg.L}^{-1}$ en moyenne), probablement issue d'une pollution urbaine. Au contraire, le ru des Fontaines Ferrées est plus riche en nitrates ($32,1 \text{ mg.L}^{-1}$).

Les variations saisonnières de ces éléments nutritifs peuvent être mis au regard de l'évolution de la biomasse algale, estimée via les concentrations pigmentaires en chlorophylle *a* (Chl *a*). Les concentrations en orthophosphates, en nitrates et en ammonium sont ainsi plus élevées en automne/hiver qu'au printemps/été où ces teneurs diminuent, probablement en raison d'une consommation par la biomasse végétale. Toutefois, le ru des Fontaines Ferrées se distingue par des concentrations en Chl *a* très faibles ($1,7 \mu\text{g.L}^{-1}$). Au regard des fortes concentrations en nitrates de ce ru, proches de celles mesurées dans les eaux souterraines au droit de Saint-Quentin (ades.eaufrance.fr), il semble probable que des résurgences de la nappe alimentent les eaux de surface à cet endroit.

Focus sur la qualité de l'eau du marais

Apport des mesures haute-fréquence

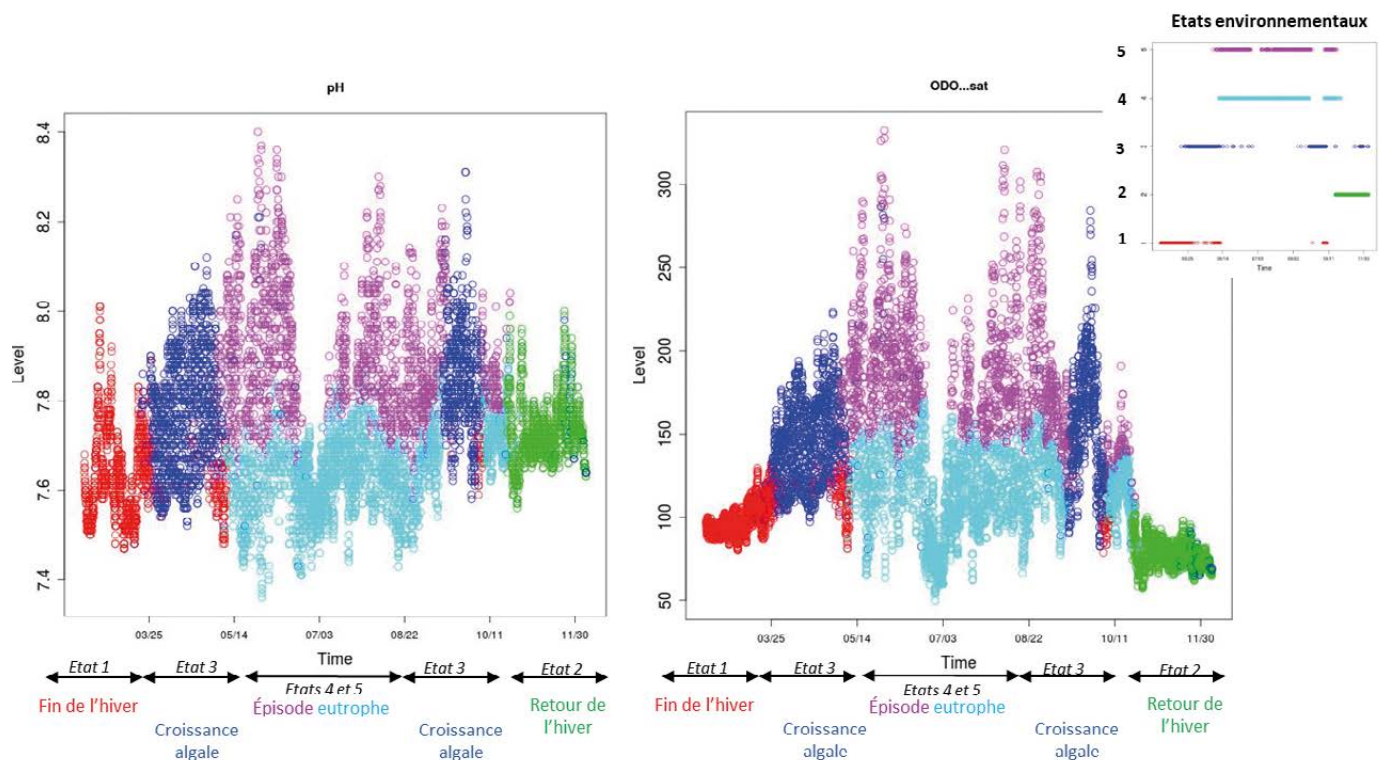
Le déploiement de la bouée automatique pendant un an dans le grand étang du marais a produit de très nombreuses données. Il a donc été fait appel à un modèle numérique uHMM (<https://mawenzi.univ-littoral.fr/uHMM/fr/>), développé par le LISIC (Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale) de l'ULCO, qui a permis de décrire les données en les classant en 5 « états environnementaux ».

L'évolution des paramètres physico-chimiques enregistrés par la bouée, pH et taux de saturation en oxygène dissous, est illustrée (Fig. 3). Chacune des couleurs décrit un état environnemental qui peut être interprété de la façon suivante :

- ✧ L'état 1 (en rouge) marque l'arrivée du printemps, avec l'augmentation de la température de l'eau ($5-13 \text{ }^\circ\text{C}$) et l'augmentation de la durée d'ensoleillement qui conduisent à l'état 3.
- ✧ L'état 3 (en bleu foncé) représente les pics de croissance algale. Ils apparaissent dans le marais au printemps et en automne, et à ces périodes, les populations algales sont souvent dominées par des algues brunes de l'embranchement des diatomées (Chl *a* : $10 - 40 \mu\text{g.L}^{-1}$).
- ✧ Les états 4 (bleu clair) et 5 (violet) interviennent en été et semblent concomitants. Dans les faits, ils se superposent et reflètent les symptômes d'un milieu en situation d'eutrophisation. En journée (état 5 en violet), la biomasse algale produit de l'oxygène dissous, ce qui conduit à des teneurs en oxygène très élevées ($150 - 300 \%$), tandis que la nuit (état 4 en bleu clair), la biomasse végétale respire et produit du dioxyde de carbone, ce qui entraîne la diminution des teneurs en oxygène ($50 - 150 \%$) et du pH, du fait de l'acidification du milieu.

Fig. 3 : Évolution des paramètres physico-chimiques dans le grand étang du marais en 2017 : pH (gauche) et saturation en oxygène dissous (droite), et distinction des états environnementaux mis en évidence par le modèle uHMM.

Fig. 3 - Evolution of physico-chemical parameters in the larger pond of the marsh in 2017: pH (left) and dissolved oxygen saturation (right), and distinction of environmental states highlighted by the uHMM model.



◇ Enfin, l'état 2 (en vert) marque le retour de l'hiver : la température diminue, les teneurs en oxygène dissous se stabilisent et la biomasse algale entre en phase de repos.

Ce suivi haute-fréquence des paramètres physico-chimiques permet de constater que le marais d'Isle est un milieu eutrophe. Bien que les concentrations en azote et phosphore restent globalement limitées, on constate un déséquilibre du rapport azote sur phosphore qui peut contribuer au dysfonctionnement du milieu.

Apport des analyses taxonomiques du phytoplancton

L'eutrophisation se manifeste généralement par une prolifération massive (bloom) de biomasse aquatique, en réponse à un excès de nutriments. Dans le cas du marais d'Isle, un suivi dédié au phytoplancton, qui regroupe l'ensemble des espèces végétales (microalgues, cyanobactéries) vivant en suspension dans la colonne d'eau, a été mis en œuvre dans le marais. En effet, la composition et l'abondance du phytoplancton sont des indicateurs souvent pertinents pour évaluer la qualité de l'eau.

Le suivi mensuel du phytoplancton, réalisé entre mars et octobre 2017, peut ainsi être mis en parallèle des données pigmentaires (Chl *a*) mesurées par la bouée. Il indique une faible présence de cyanobactéries (espèces capables de

produire des toxines) et met en évidence de faibles abondances de microalgues dans le grand étang tout au long de l'année. Ces résultats semblent indiquer que les symptômes d'eutrophisation décrits dans le paragraphe précédent peuvent être attribués aux algues filamenteuses qui peuplent les fonds du marais et aux macrophytes, relevés visuellement dans les étangs.

Les analyses taxonomiques, présentées Fig. 4 en regroupant les principaux embranchements des taxons identifiés en fonction des concentrations algales mensuelles, confirment toutefois la présence dominante des diatomées (*Bacillariophyta*) au printemps dans le grand étang. Certains taxons algaux sont par ailleurs retrouvés toute l'année, comme la diatomée *Stephanodiscus hantzschii* et l'algue verte *Scenedesmus sp.*, qui caractérisent les plans d'eau eutrophes à hypereutrophes (Bellinger et Sigeo 2010). Enfin, le suivi taxonomique a révélé une diversité spécifique algale assez importante (de 36 à 66 taxons selon les prélèvements), ce qui confirme la richesse taxonomique de la Réserve Naturelle.

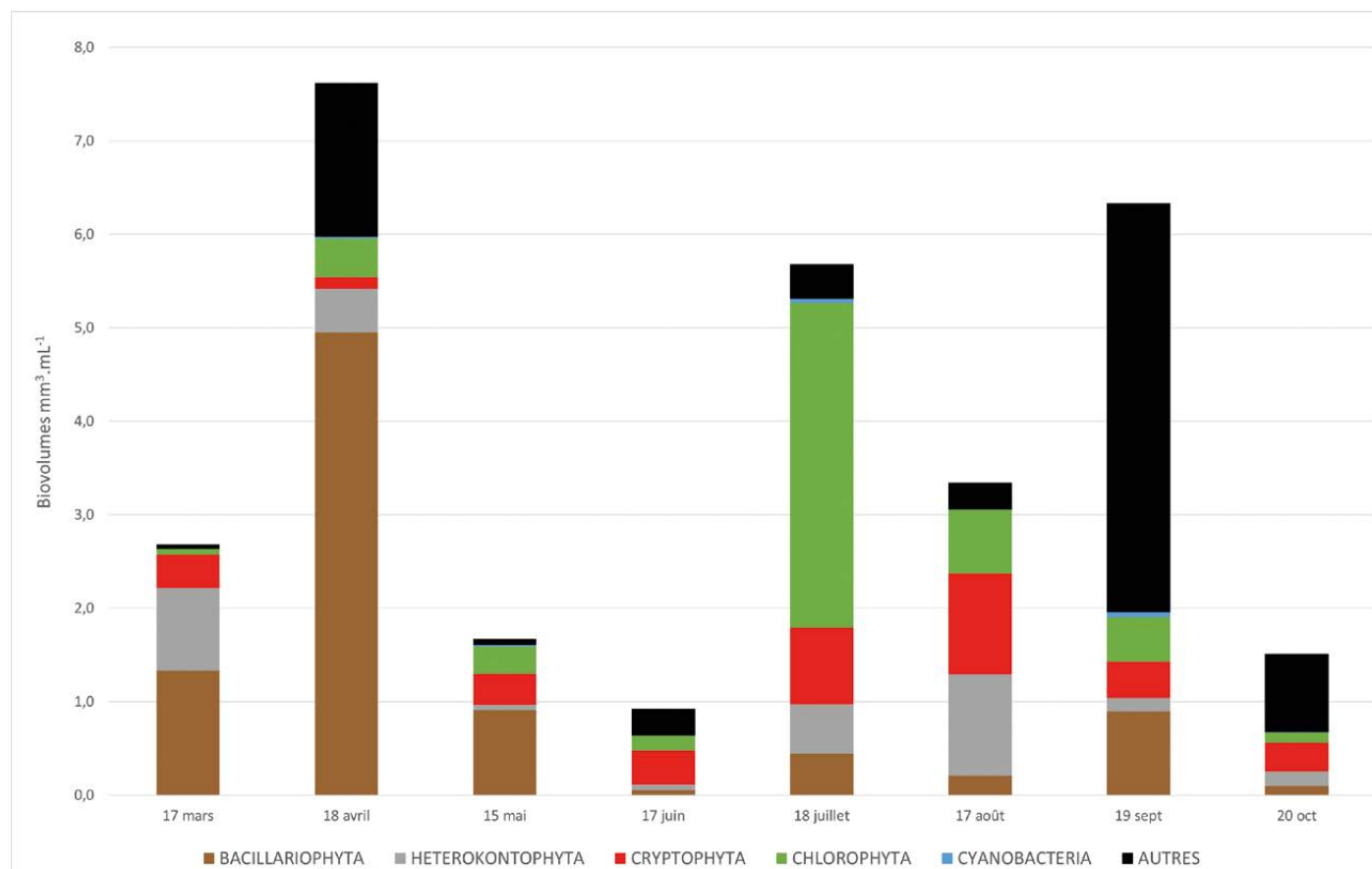


Fig. 4 : Analyses taxonomiques du marais en 2017 (biovolumes en mm³.mL⁻¹ par embranchement)

Fig. 4 - Taxonomic analyzes of the marsh in 2017 (biovolumes in mm³.mL⁻¹ per phyla)



CONCLUSION

La mise en œuvre d'un dispositif de mesure haute-fréquence s'avère pertinente pour le suivi et l'étude de la qualité des eaux de surface, comme le montre cet exemple d'application sur le marais d'Isle, mais nécessite de faire appel à des compétences spécifiques pour exploiter la grande quantité de données collectées.

Pour cette étude de cas, le suivi initié depuis 1991 par les gestionnaires de la Réserve Naturelle Nationale des Marais d'Isle montre que la qualité de l'eau tend à s'améliorer lentement, bien que les étangs restent fortement touchés par le phénomène d'eutrophisation en 2017. Des apports trop importants en azote sont probablement à l'origine de ce déséquilibre, comme dans le reste du bassin Artois-Picardie, confronté à une forte pression agricole pourvoyeuse de nitrates aux milieux aquatiques (MTECT 2023).

Situé en centre-ville, le marais est probablement soumis à la pression urbaine de l'assainissement, qui contribue aussi

à enrichir les eaux en azote. Cette hypothèse n'a pas pu être confirmée via le suivi des déversoirs d'orage en raison du manque de pluie pendant le suivi, mais a pu se vérifier via les importantes teneurs en nutriments des affluents de la Somme proches du marais. Des résurgences d'eaux issues de la nappe souterraine, plus chargée en nitrates que les eaux de surface, sont aussi susceptibles d'enrichir les eaux du marais et de contribuer à son eutrophisation. Pour étayer cette hypothèse, une analyse hydrogéologique, visant à mieux établir les relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines au niveau du marais a été réalisée en 2022 ; les résultats en sont publiés dans un autre article de ce volume.

Enfin, l'exemple du marais d'Isle met en évidence la complexité des interactions entre petit cycle et grand cycle de l'eau, et illustre les difficultés à interpréter les effets des pressions chimiques et/ou hydrauliques sur le fonctionnement naturel des écosystèmes.

LES RESSOURCES EN EAU POUR UNE MISE EN BOUTEILLES

Water resources to bottle

Thierry Vinay

Directeur qualité et environnement, Groupe Roxane, Sources ALMA
t.vinay@sources-alma.com

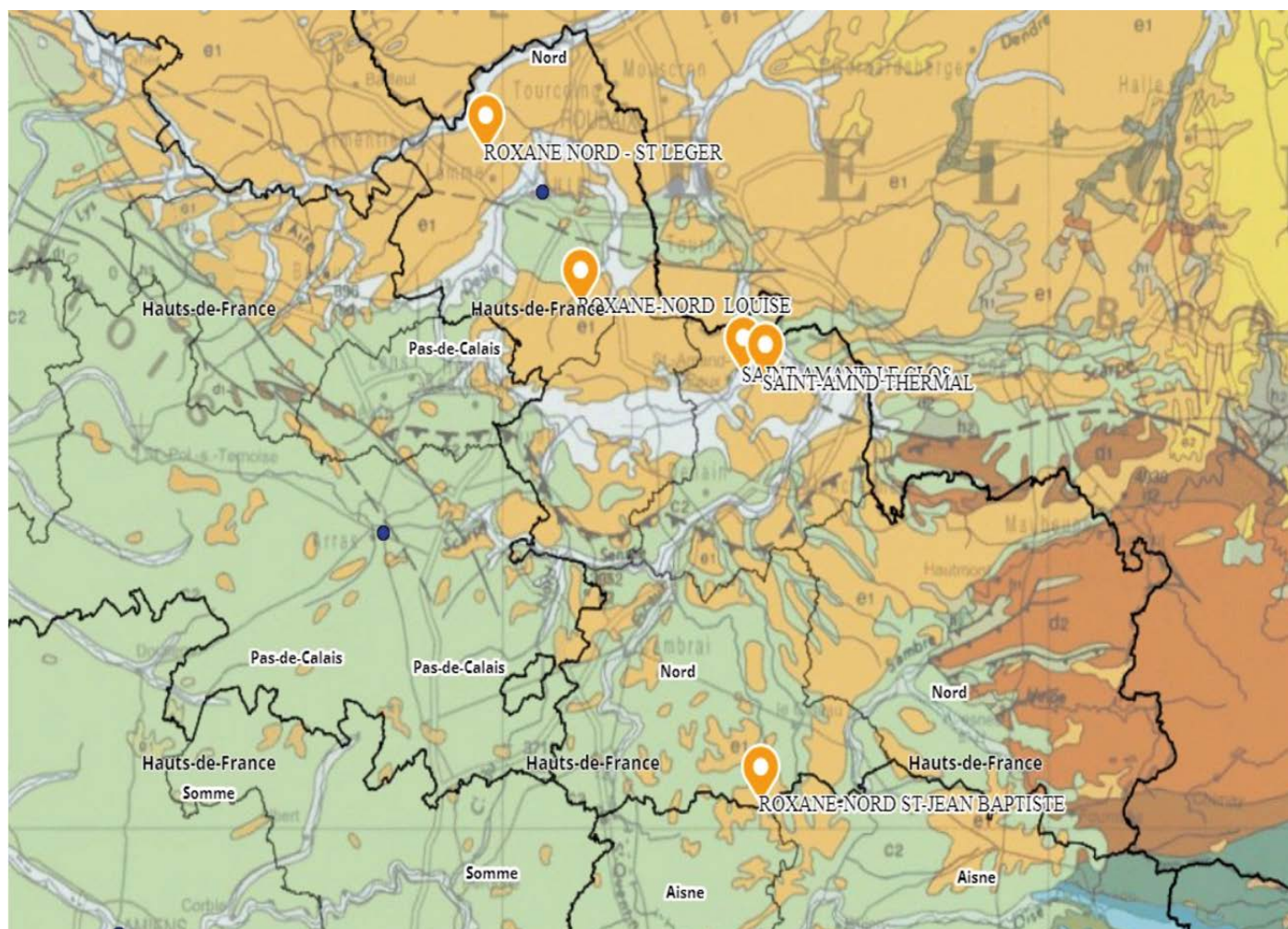
UNE ACTIVITÉ FAMILIALE DEVENUE UN GROUPE INDUSTRIEL

La population française est très friande d'eau en bouteille. Et la géologie de la France métropolitaine, très diversifiée, offre une variété de gisements, tant en composition qu'en proportions. Certaines sources sont exploitées depuis des siècles.

Les Sources ALMA sont une société d'origine familiale (Papillaud), créée dans l'Orne en 1954 et qui, comme d'autres groupes, s'est développée en rachetant dans d'autres régions les droits à exploiter diverses sources locales (une trentaine

dont : St-Yorre, Vichy-Célestins, Courmayeur, Montcalm, Vals, Rozana, Cristaline...). En Hauts-de-France, les Sources ALMA sont représentées par le groupe Roxane-Nord qui exploite l'aquifère de la craie (Fig. 1) à Pérenchies, Mérignies (source Louise), Busigny. En outre deux sites de prélèvements sont localisés à Saint-Amand-les-Eaux qui ont la particularité d'exploiter une nappe captive dans le Calcaire Carbonifère, sous une couverture de marnes turoniennes.

Fig. 1 – Extrait de la carte géologique au millionième, avec la localisation des sources exploitées par le Groupe Roxane en Nord – Pas-de-Calais.
Fig. 1 – Extract from the millionth-scale geological map, showing the location of springs exploited by Groupe Roxane in Nord-Pas-de-Calais.



CONTEXTES GÉOLOGIQUES DES GISEMENTS

La craie abrite le principal aquifère régional, dont le plancher est constitué des marnes d'âge Turonien moyen, connues sous le nom de *Dièves*. Les gisements de Pérenchies, Busigny et Mérignies sont dans cette conformation. Dans les trois sites, le gisement est protégé naturellement par une couche d'argiles et sables tertiaires (Thanétien et base de l'Yprésien).

Le site de la Source Louise, à Pont-à-Marcq produit à partir d'un forage représenté en Fig. 2. Une fine couche de limons recouvre la base de l'unité connue sous le nom d'Argile d'Orchies, traversée sur une dizaine de mètres. Elle recouvre elle-même, en continuité, une quarantaine de mètres de sables, de plus en plus argileux en descendant et redevenant franchement sableux à la base. C'est l'unité connue comme Sables d'Ostricourt, d'âge Thanétien. Ces dépôts recouvrent directement la surface d'érosion de la craie. C'est une craie blanche, qui passe vers le bas à une craie à silex et contient quelques passées marneuses. Le contact entre le Coniacien et le Turonien supérieur n'est aucunement singularisé, comme partout dans la région. On peut constater (Fig. 2) que la nappe captive dans la craie est faiblement artésienne dans la série tertiaire puisque le niveau d'eau est naturellement stabilisé vers 17 m de profondeur, soit une bonne vingtaine de mètres au-dessus du toit de la craie.

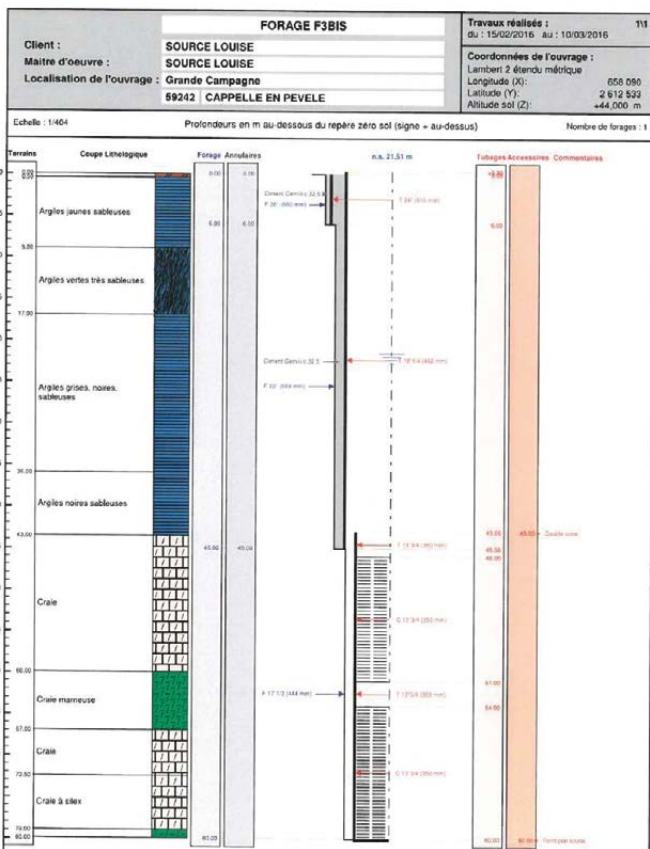


Fig. 2 – Log du forage exploitant la source Louise; extrait du rapport de l'hydrogéologue agréée : Barbara Louche.

Fig. 2 – Log of the Louise spring borehole; extract from the report by the certified hydrogeologist: Barbara Louche.

A Saint-Amand-les-Eaux, le contexte est différent. Le site productif est connu sous le nom de Source du Clos de l'Abbaye (BSS000CGCV). La coupe, réalisée en 1975, démarre dans la plaine alluviale de la Scarpe qu'elle traverse sur un peu plus de 1 m. Puis elle traverse les Sables d'Ostricourt sur plus de 30 m pour entrer dans la craie vers la cote -17. La partie aquifère n'est traversée que sur une dizaine de mètres, et n'est pas exploitée. Une quarantaine de mètres de Dièves isole l'aquifère de la craie de celui du Calcaire Carbonifère, sous une discordance traversée vers la cote -70. C'est ce dernier qui produit une eau certes carbonatée, mais aussi sulfatée car le Calcaire Carbonifère renferme des niveaux à évaporites. La recharge de cet aquifère profond s'effectue à partir des affleurements qui longent la frontière franco-belge, entre Basècles et Tournai. Le niveau statique de la nappe du Calcaire Carbonifère se stabilise presque au même niveau que celui de la craie.

On pourrait croire que les Dièves constituent donc une barrière d'étanchéité entre les terrains du socle paléozoïque et la couverture méso-cénozoïque. Mais alors, comment comprendre que dès -50 avant JC, les Romains avaient reconnu une source thermique analogue à ce qu'ils connaissaient en Italie ? Sauf si un séisme d'une intensité suffisante pour faire émerger une faille ($M \geq 6$), comme il s'en produit environ 2 par millénaire, ait permis à l'eau de sourdre par un couloir hautement fissuré, quelques temps avant l'arrivée des Romains dans la région. A tout le moins, il faudrait localiser une telle faille, inconnue de la carte géologique à 1/50000 à ce jour.

QUALITÉ DES PRODUCTIONS

Avant d'être mise sur le marché, une eau en bouteille doit satisfaire à un certain nombre de critères qui sont régulièrement évalués, notamment par l'Agence Régionale de Santé.

La production brute distingue l'eau de source et l'eau minérale naturelle, toutes deux d'origine souterraine, naturellement protégées. L'eau de source doit répondre aux normes des eaux destinées à la consommation humaine. La composition de l'eau minérale naturelle doit être stable dans le temps, et sa composition doit aussi respecter des normes spécifiques propres aux eaux minérales. Ces eaux peuvent être naturellement gazeuses; elles sont commercialisées sous l'appellation eau minérale naturelle gazeuse. Ce dernier type est absent de la région des Hauts-de-France; certaines eaux sont gazéifiées parce que le consommateur le souhaite. Les sites de Busigny, Pérenchies et Merignies produisent une eau de source. Le site de Saint-Amand-les-Eaux produit des eaux minérales naturelles, naturellement sulfatées, pour la plupart magnésiennes (Fig. 3). Ceci est dû à la présence d'évaporites dans le Calcaire Carbonifère, dont la dissolution libère des anions sulfatés et du magnésium.

SOURCE	Sainte-Sophie	Inès	Louise	Oiselle
Commune	Pérenchies	Avelin	Capelle en Pevèle	St Amand les eaux
Type d'eau	Eau de source	Eau de source	Eau de source	Eau minérale
Calcium	75	140	66	136
Magnésium	26	10	26	60
Sodium	84	18	50	59
Potassium	19	5	18	18
Bicarbonates	473	350	432	345
Chlorures	33	37	15	90
Sulfates	63	75	34	350
Fluor	1	0,28	0,9	1,2

Source	Source du clos de l'abbaye
Commune	Saint-Amand-les eaux
Type d'eau	Eau minérale naturelle
Calcium	176
Magnésium	46
Sodium	28
Potassium	5
Bicarbonates	312
Chlorures	372
Sulfates	63
Fluor	2

Fig. 3 – Tableau comparatif de la composition minéralogique des sources exploitées par le Groupe Roxane.

Fig. 3 – Comparative table of the mineralogical composition of the sources exploited by the Roxane Group.

Les traitements et contrôles de qualité répondent à des protocoles très stricts (Fig. 4).

Les forages permettant le prélèvement de la ressource en eau sont protégés par des abris sous alarme anti-intrusion, ceints d'une clôture délimitant le périmètre immédiat de protection, placé sous vidéo-protection. Par exemple, la tête du forage F (Fig. 4A) est fermée par une plaque inox boulonnée pour éviter l'introduction de toute substance pouvant polluer la nappe; la présence d'un filtre évent pour filtrer l'air pouvant pénétrer dans le forage lors de la mise en route de la pompe. La tête de puits est également équipée d'une sonde de niveau permettant d'enregistrer en permanence le niveau de la nappe. Un clapet anti-retour évite que l'eau contenue dans la conduite d'exhaure puisse retourner dans la nappe aquifère

Les eaux de sources de Pérenchies, Mérignies et les eaux minérales de Saint-Amand contiennent naturellement du fer dissous. Un traitement spécifique permet de s'en affranchir (Fig. 4B) : A Mérignies, une salle permet le traitement des trois ressources exploitées. Un deferriseur est constitué de deux cuves inox. Dans la première cuve, remplie de pouzzolane, l'eau circule du bas vers le haut, une injection d'air à l'entrée de la cuve complète le dispositif. Le fer dissout présent dans l'eau s'oxyde et les hydroxydes de fer sont retenus dans la cuve suivante. La deuxième cuve est rempli de sable siliceux; l'eau y circule de haut en bas, les hydroxydes de fer sont retenus par le sable, l'eau ainsi deferrisée peut être conditionnée

L'eau minérale de saint-Amand étant fluorée, une partie du fluor est éliminé par adsorption sur alumine activée. Tous ces traitements sont dûment autorisés par arrêté préfectoral et régulièrement contrôlé par les laboratoires des sites,, et suivis par l'Agence régionale de Santé.

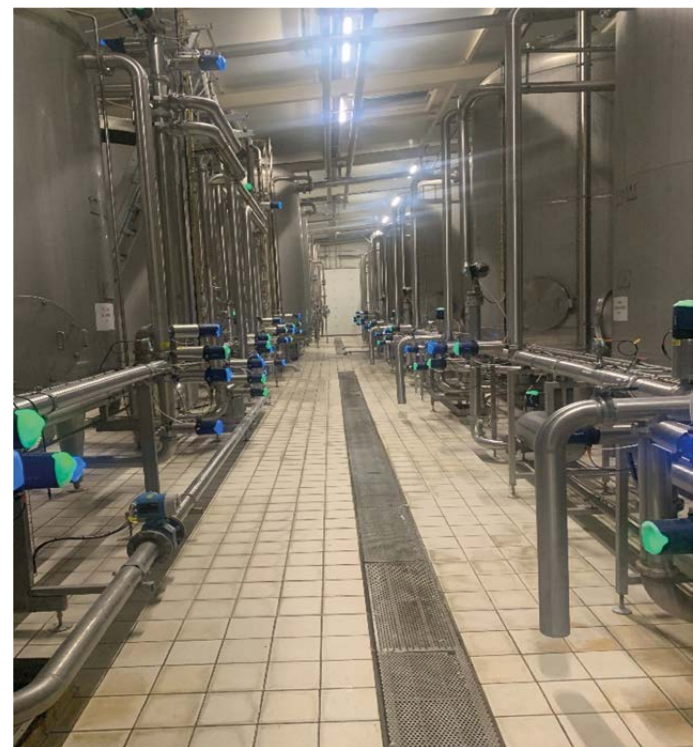


Fig. 4 – Trois vues sur sites : A – Tête de forage F à la source Léa à Mérignies; B - Vue sur la salle de deferrisation à Mérignies;

Fig. 4 – Three site views: A - Borehole head F at the Léa spring in Mérignies; B - View of the Mérignies deferrization room; C - Catchment site and part of its protection.

Sur les sites de captage (Fig. 4C), le forage est protégé dans un abri sous alarme anti-intrusion. Cet abri est lui-même ceint d'une clôture surmontée de barbelé de type concertina. Cette espace clos constitue le périmètre immédiat de protection. Ce périmètre est-lui même sous vidéoprotection.

CONCLUSION

En conclusion, la diversité géologique et hydrogéologique permet sur le département du Nord d'exploiter des eaux de source et des eaux minérales naturelles de qualité différentes permettant de répondre aux attentes des consommateurs. Cette exploitation raisonnée de la ressource naturelle participe également au développement économique de la région.



Fig. 4 – C – site de captage et une partie de ses protections.
 Fig. 4 – C - Catchment site and part of its protection.

STRATEAU – UNE APPROCHE NOVATRICE ET UN OUTIL INNOVANT DE GESTION PROSPECTIVE DES TENSIONS SUR L'EAU

STRATEAU – an innovative approach and an innovative foresight management tool on water tensions

Justin Lecomte

Direction territoriale Hauts-de-France | Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, 44 Ter rue Jean-Bart CS 20275 59019 LILLE CEDEX
justin.lecomte@cerema.fr

Catherine Neel

Direction territoriale Centre-Est | Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, 8-10 rue Bernard Palissy 63017 CLERMONT-FERRAND CEDEX
catherine.neel@cerema.fr

Pascal Maugis

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Centre de Saclay, Orme des Merisiers, Bat. 701 91191 GIF-SUR-YVETTE CEDEX
pascal.maugis@lsce.ipsl.fr

Le présent document repose sur plusieurs des publications de P. Maugis (P. Maugis 2012, 2015)

Face aux tensions sur l'eau, il devient crucial d'avoir une vision globale, à l'échelle d'un territoire, et prospective à l'horizon 2030 ou 2070, de l'évolution de l'offre et de la demande en eau. STRATEAU est un outil numérique et une plateforme destinée à aider les territoires à concevoir leur stratégie d'économie et de partage de l'eau. STRATEAU offre une évaluation prospective de la demande en eau, en fonction de scénarios climatiques et d'hypothèses d'évolution du territoire ; indépendamment des données factuelles de prélèvements d'eau.

PASSER D'UNE LOGIQUE D'OFFRE A UNE LOGIQUE D'USAGE

Aujourd'hui, lorsqu'une pénurie d'eau apparaît, la collectivité ou la sphère privée répond souvent en cherchant à augmenter l'offre en eau disponible. Par exemple, Noréade a construit sur une trentaine d'années la dorsale de l'eau¹ : un réseau interconnecté sur plus de 200 km qui fournit en eau potable la majorité du département du Nord de l'Avesnois à la plaine de Flandres. Ceci est une logique d'offre ; autrement dit une logique de gestion de l'eau par l'adaptation de l'offre d'eau.

L'objectif de la démarche STRATEAU est de passer à une gestion prospective de l'eau par l'adaptation de la demande en eau, soit une logique d'usage. Le plan « Eau »² lancé par le gouvernement au printemps 2023 a pour objectif de coordonner les actions de gestion de l'eau pour réduire les pressions sur la ressource. Il s'articule autour de l'objectif prioritaire de sobriété des usages de l'eau, fixé à -10 % sur les prélèvements d'ici à 2030. Ceci ne peut se faire qu'en optimisant l'usage de l'eau et en organisant un partage de l'eau. Il

s'agit notamment de réduire les fuites, d'appeler à la sobriété (réduire la quantité d'eau utilisée) et de valoriser les eaux non conventionnelles là où cela a du sens (réutilisation des eaux usées traitées, eaux de pluie, eaux grises, eaux d'exhaure...). Aujourd'hui, ces objectifs sont difficiles à réaliser faute d'une vision rapide et prospective de la demande en eau sur un territoire. La question se pose aussi de la contradiction de l'objectif de sobriété des usages de l'eau dans un contexte politique demandant la relocalisation des productions agricoles ou la réindustrialisation de la France. Les territoires vont être confrontés aux défis suivants : Comment prévoir les impacts des évolutions agricoles, industrielles et urbaines sur la demande en eau ? Quels besoins pourront être satisfaits à horizon 2030 ou 2070 ?

UNE VISUALISATION MULTI-ÉCHELLE DE LA DEMANDE EN EAU

Les prélèvements d'eau sont capitalisés actuellement par les Agences de l'Eau, à partir des données de redevance, dans la Banque Nationale des Prélèvements d'Eau (BNPE³). Ces données sont par essence incomplètes car elles reposent sur des déclarations qui ne sont obligatoires qu'au-delà du seuil de 10 000 m³ prélevé par an (P. Maugis et al. 2015). Elles ne concernent pas tous les usages comme les eaux d'exhaure⁴, les travaux souterrains, le drainage, les petits prélèvements et ceux non déclarés. De plus, ces données sont disponibles à l'échelle annuelle alors que les tensions sur l'eau sont plus fortes en périodes saisonnières de basses-eaux. Cette approche « Top-down » et annualisée ne permet pas de mener une analyse territoriale de la demande en eau sur la

1. <https://www.lobserveur.fr/communique-noreade-investit-lauto-route-de-leau/>

2. <https://www.ecologie.gouv.fr/plan-action-gestion-resiliente-et-concertee-eau>

3. <https://bnpe.eaufrance.fr/>

4. Les eaux d'exhaure sont les eaux évacuées par un moyen technique adéquat afin de permettre l'exploitation à sec d'une carrière ou d'une mine (définition du Code de l'Eau).

période temporelle des tensions saisonnières en eau. Comme elle repose sur des prélèvements actuels, elle ne permet ni analyse prospective de la demande en eau du territoire, ni investigation des effets de politiques spécifiques.

La première originalité de STRATEAU réside dans le fait que l'outil offre un calcul de la demande en eau indépendant des données de prélèvement d'eau. Une autre originalité est que STRATEAU donne à voir simultanément ces calculs à plusieurs niveaux d'imbrications d'échelles de temps et d'espace (P. Maugis et al. 2015) :

- ✧ une échelle spatiale, agrégeant la maille élémentaire communale à plusieurs niveaux emboîtés comme les EPCI (Établissements Publics de Coopération Intercommunale) ;
- ✧ une échelle temporelle, évaluant la demande en eau mensuelle. Ceci permet d'accéder aux dynamiques saisonnières indispensables pour capturer les périodes de tension comme l'été ;
- ✧ une échelle d'activité par secteurs d'activités emboîtés. Par exemple, il est possible d'afficher la consommation en eau de l'ensemble du secteur de l'industrie agro-alimentaire sur un périmètre choisi ou de ne ressortir que ce qui relève d'une filière industrielle précise.

Il est possible d'agréger et de désagréger à façon selon ces 3 échelles. Cette imbrication simultanée d'échelles demande une interface ad hoc pour les rendus cartographiques. Pouvoir afficher les données de façon simple et intelligible à l'échelle de son choix est une plus-value importante de STRATEAU.

UNE RECONSTITUTION DES BESOINS EN EAU EN « BOTTOM-UP »

La deuxième originalité de STRATEAU réside dans le mode de calcul de la demande en eau, détaillé au paragraphe suivant, qui s'adapte à chaque activité et aux bases de données disponibles. Pour une application nationale, des bases de données publiques, comme la nomenclature NAF (Nomenclature des Activités Françaises) et le recensement de l'INSEE, sont utilisées pour calculer la demande en eau. Cependant, pour une application locale, il est possible d'intégrer des données locales de consommations mesurées, fournies par les acteurs locaux.

La troisième originalité de STRATEAU réside dans l'approche de prise en compte de la ressource via des flux. Il n'y a pas de gestion de stock pour les ressources naturelles. Cette absence de gestion de stock demande de définir un prélèvement maximum acceptable correspond au débit prélevable sur une ressource sans la tarir ou sans impact délétère sur les écosystèmes, notamment au sens de la Loi sur l'Eau. Un usage est défini comme un flux d'une ressource vers une autre ressource. Celle-ci peut être réelle comme un rejet en cours d'eau ou virtuelle avec une REUT (Réutilisation des Eaux Usées Traitées). Sur la figure 1, le rejet résidentiel pourrait abonder une ressource virtuelle pour les usages agricoles et industriels, par exemple, de sorte à traduire un scénario de réutilisation des eaux usées traitées. L'avantage de ce mode de calcul est qu'il incite à construire des stratégies visant à équilibrer les flux de demande sur ceux de l'offre d'eau, pour une période donnée.

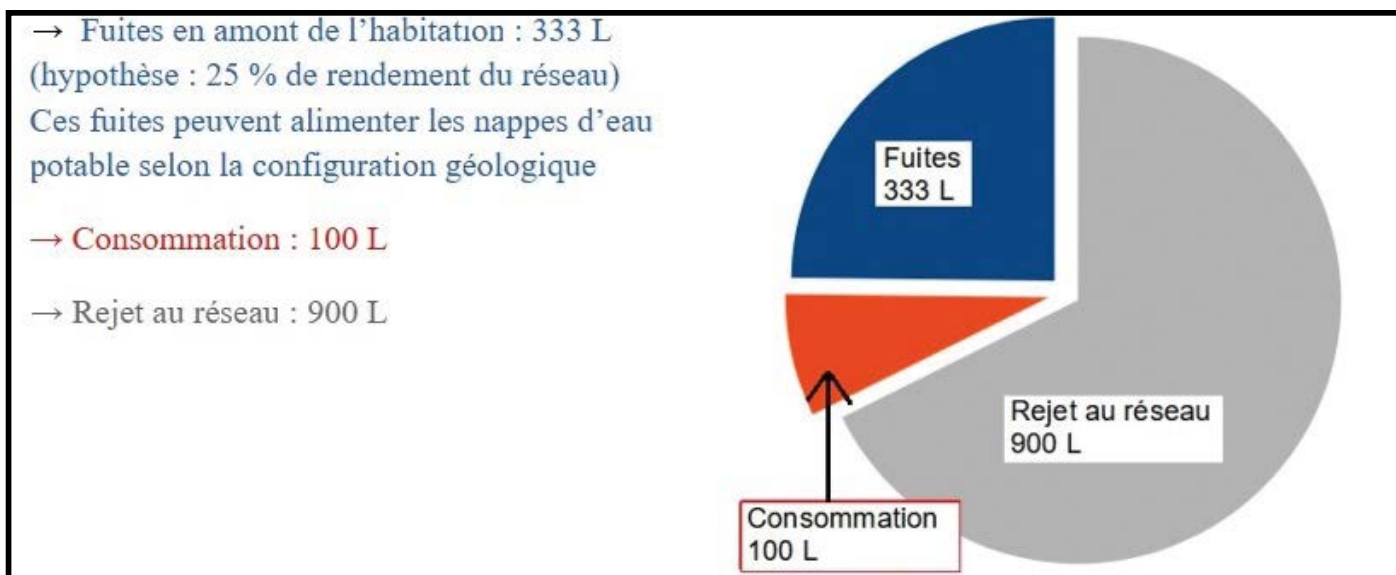


Fig. 1 Que devient un flux de 1 m³ (1000 l) par jour d'eau utilisé dans une habitation ?
Fig. 1 What happens to a flow of 1 m³ (1 000 l) per day used in a home?



DIFFÉRENTES APPROCHES DU CALCUL DE LA DEMANDE EN EAU POUR DIFFÉRENTES ACTIVITÉS

Pour chaque secteur d'activité (code NAF), la demande en eau est calculée selon un déterminant spécifique à l'activité et la consommation unitaire pour ce déterminant.

Pour le secteur résidentiel, par exemple, le déterminant est le nombre d'habitants du logement. La consommation unitaire dépend des équipements présents dans le logement et diminue lorsque la latitude augmente en France. Cela permet d'intégrer le fait que la consommation moyenne en eau d'un individu vivant dans le Nord-Pas-Calais est de 109 litres par jour contre 228 litres par jour pour un individu vivant en Provence-Alpes-Cote d'Azur.⁵ Les fuites sur le réseau d'eau potable sont également prises en compte. Ensuite, il est possible d'ajouter deux taux : le taux d'activité, par exemple, pour prendre en compte un exode estival et le taux d'équipement pour moduler la consommation en fonction du niveau de vie ou du groupe socio-culturel des habitants d'une commune déterminée. A titre d'illustration, la Figure 1 montre le devenir d'un flux de $1 \text{ m}^3/\text{jour}$ utilisé dans plusieurs habitations correspondant à $1,333 \text{ m}^3/\text{jour}$ de flux prélevé en raison des fuites (hypothèse 25 %).

Le flux lié aux prélèvements dans la ressource s'élève à $1,333 \text{ m}^3/\text{j}$ pour une consommation nette de $0,1 \text{ m}^3/\text{j}$. Dans certains cas, le flux lié aux fuites sur le réseau d'eau potable bénéficie à la ressource en eau ; dans d'autres non. Cela dépend de la configuration géologique locale. Par exemple, dans la plaine maritime des Flandres, lorsque l'argile des Flandres est présente à proximité de la surface, l'eau issue des fuites ne peut pas s'infiltrer jusqu'à une ressource souterraine mais abonde une ressource superficielle.

Le rejet est de $0,9 \text{ m}^3/\text{j}$ et correspond au flux potentiel pour d'autres usages anthropiques comme la REUT (Réutilisation des Eaux Usées Traitées) ou naturels (contribuer au débit des cours d'eau, notamment à l'étiage).

Pour le secteur tertiaire et industriel, le déterminant est le nombre d'emplois. Le besoin en eau unitaire appliqué dépend alors du secteur d'activité. Dans certaines branches, telles les brasseries, le besoin en eau est directement proportionnel à la production. A ce déterminant, plusieurs taux d'équipement peuvent être associés pour calculer plus précisément la demande en eau de ce secteur « brasserie ». A titre d'illustration, dans les Hauts-de-France, plusieurs brasseries ont réalisé des efforts conséquents en termes de process pour réduire leur besoin en eau. Par exemple, les brasseries Goudale et Saint-Omer affichent⁶ une réduction importante de leur consommation d'eau pour produire un litre de bière : 3 L contre 9 L auparavant.

Pour le secteur de l'énergie, le déterminant est la production effective des réacteurs nucléaires ou des centrales thermiques disponibles publiquement. La consommation unitaire dépend du type de circuit de refroidissement : ouvert ou fermé.

Pour le secteur agricole, l'approche est plus complexe (P. Maugis *et al.* 2015) dans la mesure où pour l'élevage, la demande en eau est déterminée par le nombre de têtes de bétail mais varie selon les saisons et la température. Pour les cultures de plein champ ou le maraîchage, l'essentiel de la demande en eau correspond à l'évapotranspiration. Il est donc nécessaire d'utiliser un modèle (ici, CropWat de la FAO) pour estimer une évapo-transpiration journalière maximale des cultures à l'aide de la loi classique de Penman-Monteith. Cela nécessite des coefficients culturaux pour chaque culture et les données pluviométriques spatialisées fournies par Météo France (maille SAFRAN). La demande non satisfaite par la pluviométrie se reporte sur l'irrigation si la parcelle agricole en est équipée. L'irrigation est fonction de l'optimum d'irrigation choisie ; satisfaire 80 % des besoins théoriques des plantes peut suffire. L'irrigation comporte un coefficient d'efficacité qui varie entre 50 % et 85 %. Plus précisément, elle est de 50 % pour un modèle gravitaire avec canaux et rigoles, de 75 % pour de l'aspersion, et de 85 % pour du goutte-à-goutte. Cette perte a lieu par évaporation et par infiltration vers une ressource superficielle ou souterraine. L'intérêt de cette approche est de pouvoir évaluer la demande chaque mois, notamment pendant la période de tension estivale.

Cette approche sous forme de consommation unitaire par déterminant et taux d'équipement est à caler avec des données locales mais permet en même temps une précision de calcul et une incitation des différents secteurs d'activité à s'équiper et à aller vers la sobriété de leur usage, autant que possible. C'est pour cette raison qu'une implémentation sur un territoire d'étude demande un travail de recueil de données d'autant plus lourd que l'on souhaite être le plus réaliste possible. Cette démarche est analogue aux études de volume prélevable qui sont réalisées sur les bassins-versants.

UN VISUALISEUR INTERACTIF POUR ANIMER UNE RÉFLEXION TERRITORIALE

La finalité de STRATEAU ne réside pas seulement dans le calcul de la demande en eau, comme peut déjà le faire une étude de volumes prélevables. STRATEAU permet d'identifier les enjeux liés à l'eau sur un territoire et de proposer des scénarios à façon pour les collectivités locales. STRATEAU est un outil permettant une prospective territoriale. Cela passe par un visualiseur de données moderne, convivial et interactif auprès des élus. Deux extraits d'une préfiguration de la plateforme STRATEAU réalisées dans le cadre d'un Proof of Concept (POC) sont présentées sur les Figures 2 et 3 ci-dessous pour une commune anonyme du département du

5. <https://selectra.info/energie/eau/consommation>

6. <https://brasserie-goudale.com/environnement/>

Puy-de-Dôme. Cette commune anonyme a la particularité d'avoir une surface agricole irriguée.

L'élément frappant sur cette commune est la demande en eau agricole qui représente : 2/3 de la demande totale annuelle en eau de la commune mais qui se concentre les mois de juin, juillet et août du fait du besoin des plantes cultivées (voir figure 3). Le type de cultures est précisé sur la figure 2.

La réflexion territoriale peut alors s'engager autour de plusieurs sujets :

- ✧ Identifier les usages qui ne nécessitent pas de l'eau potable afin d'évaluer l'opportunité d'organiser une REUT (Réutilisation des Eaux Usées Traitées) pour satisfaire le pic de demande estival, en substitution au prélèvement d'eau potable. STRATEAU est capable de prendre en compte cette REUT pour les usages grâce au fléchage entre les usages et les ressources naturelles ou virtuelles.

Modifier les types de culture en choisissant des variétés susceptibles de réduire la demande en eau en période critique. Ceci est déjà en cours en Picardie où la culture de la silphie

se développe.⁷ Cette plante a une bonne résistance au stress hydrique et permet d'alimenter efficacement des méthaniseurs.

- ✧ Inciter à la sobriété en demandant un effort de réduction de 10 % des prélèvements de tous les secteurs, sur plusieurs années, de sorte à soutenir la demande agricole locale.

Le logiciel STRATEAU permet un affichage pertinent des conséquences de divers scénarios. Il permet par exemple de :

- ✧ Scénariser l'augmentation des tensions sur l'eau à l'aide d'un jeu d'hypothèses sur l'évolution physique du territoire : augmentation de la population ou augmentation de la surface irriguée.
- ✧ Scénariser les conséquences du changement climatique avec l'augmentation des besoins en eau des plantes liée au réchauffement, et par suite à l'augmentation de l'évapotranspiration.

En cela, STRATEAU est un outil d'aide à l'élaboration et à la concertation d'une stratégie durable de la gestion de l'eau pour les territoires.

7. <https://www.action-agricole-picarde.com/silphie>

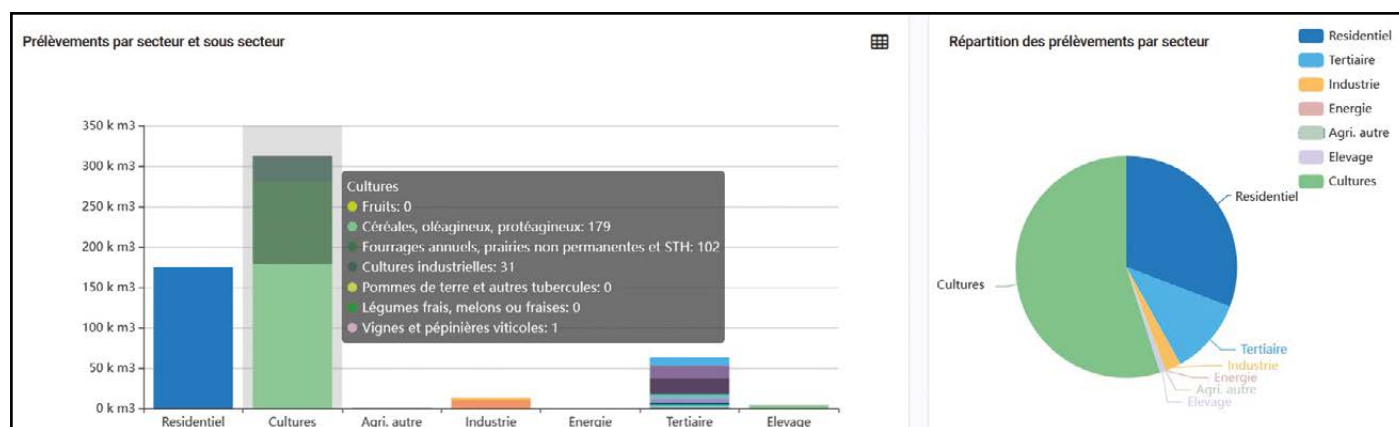


Fig. 2 Répartition des prélèvements par secteur d'activité pour une commune anonyme
Fig. 2 Distribution of water samples by sectors for an anonymous municipality

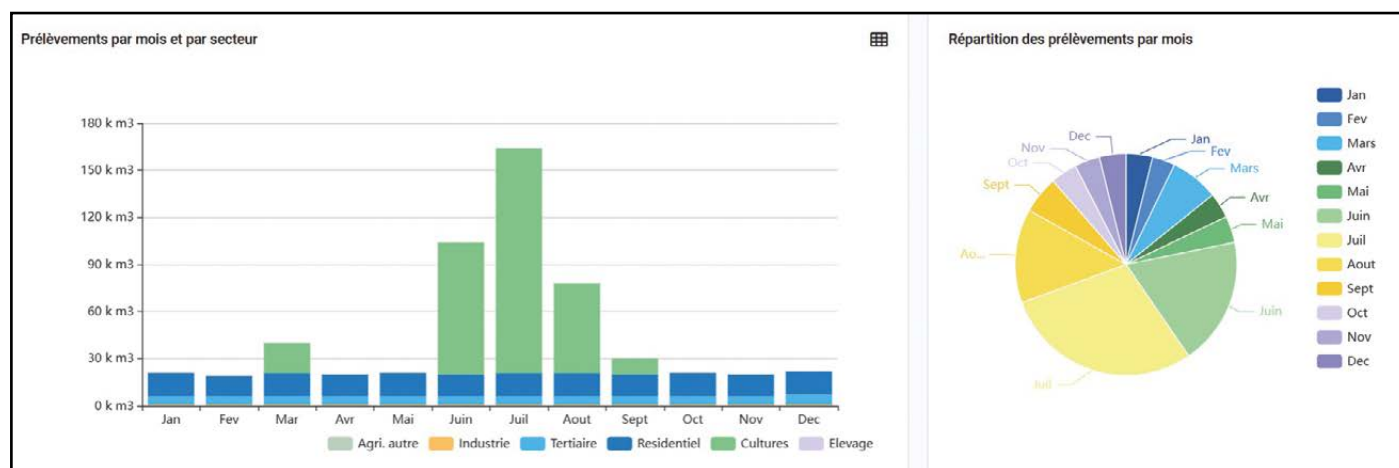


Fig. 3 Répartition des prélèvements par mois pour une commune anonyme
Fig. 3 Distribution of water samples per months for an anonymous municipality

DES TERRITOIRES EN ÉTAT D'URGENCE... D'EAU

Anne Le Strat

*Ancienne adjointe au maire de Paris et présidente d'Eau De Paris,
Co-fondatrice d'Aqua Publica Europea, Research fellow à NYU*

L'été 2022, sur l'ensemble des territoires de la France métropolitaine, ce sont des terres dévastées par la sécheresse, la végétation brûlée par le soleil et le manque d'eau, les cours d'eau à sec, les coupures d'eau au robinet, sans parler des feux de forêt et des maisons qui craquent à cause de l'assèchement des sols. Plus d'un millier de communes ont dû mettre en place des mesures de gestion exceptionnelles pour approvisionner leurs habitants. Des hécatombes de poissons et des destructions d'habitats naturels, potentiellement irréversibles, ont été observées.

L'expérience sensible, vécue, d'un assèchement morbide de nos paysages a marqué les esprits et les corps, accentuant le sentiment de grande vulnérabilité du vivant. La France a traversé en 2022 la sécheresse la plus longue et la plus étendue jamais enregistrée par Météo-France depuis 1959, année de sa création. Marquée par plusieurs épisodes caniculaires hors normes, elle s'est accompagnée d'une baisse des précipitations avec des records de déficit pluviométrique, jusqu'à -85 % en juillet.

Depuis, la situation ne s'est pas améliorée, les périodes de sécheresse se succédant. La crise climatique est là, et nous sommes entrés dans une crise de l'eau. Elle se manifeste par un déficit structurel de la ressource en eau qui n'ira que croissant avec le changement climatique, la perte de la biodiversité, l'artificialisation et la dénaturation des sols. Les enjeux quantitatifs et qualitatifs s'entremêlant étroitement, l'augmentation de la température provoque également des conséquences très importantes sur les milieux (eutrophisation, développement des cyanobactéries...), avec une dégradation de la qualité des eaux qui va peser plus fortement sur l'alimentation en eau potable.

Mais de quelle sécheresse parlons-nous ? La sécheresse météorologique, qui correspond au déficit pluviométrique ? La sécheresse hydrologique, qui résulte du retrait des glaciers, du déficit de débit des rivières, de la baisse conséquente du niveau des nappes souterraines ? La sécheresse agronomique qui constate le déficit du bilan hydrique (précipitation, évaporation, évapotranspiration de la végétation) des sols ? Avec les risques accrus de sécheresse, une petite musique se fait entendre sur les volumes d'eau importants qui vont se perdre dans la mer. Ce genre de propos traduit une méconnaissance totale des cycles hydrologiques.

Cette méconnaissance, expliquant en partie le manque d'intérêt hors temps de crise, entretient une approche utilitariste et extractiviste de la ressource. L'eau est seulement

considérée comme un élément naturel à exploiter, une matière première comme une autre, un capital au service d'usages économiques dans un système marchand. Dans cette perspective, la question de l'eau devient une simple question technique. On lui retire ses caractéristiques intrinsèques, celle qui en fait une composante fondamentale de tous les écosystèmes, celle d'un milieu de vie en interaction étroite avec les roches, les sols, la faune et la flore, sur terre comme dans les océans.



Fig.1 : Fontaine de Trevi, réalisée entre 1732 et 1762 à Rome. Ce monument a été conçu à la demande du pape Clément XII qui organise en 1730 un concours pour célébrer, avec une fontaine, l'aqueduc de l'Aqua Virgo construit en 19 av. J.-C. Photo Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International.

Fig. 1: Trevi Fountain, built between 1732 and 1762 in Rome. This monument was designed at the request of Pope Clement XII, who in 1730 organized a competition to celebrate, with a fountain, the Aqua Virgo aqueduct built in 19 BC.

Parce que l'idée de l'abondance de l'eau était communément admise, nous continuons d'accroître ses usages dans tous les secteurs. Alors que beaucoup de forages agricoles qui ne sont pas déclarés et comptabilisés, c'est néanmoins près de 58 % de la consommation en eau qui part pour l'agriculture. Le secteur nucléaire consomme relativement peu – toutefois trois fois plus que les autres usages industriels – mais prélève énormément et rejette dans les milieux aquatiques des eaux chauffées qui ont des impacts non négligeables sur la biodiversité. La France affiche un chiffre record de plus de 2,5 millions de bassins privés, le deuxième au niveau mondial derrière les Etats-Unis. Partout la demande en eau augmente alors même que les problèmes de quantité et de qualité s'accroissent, amplifiant les tensions sur l'eau.

La vraie question stratégique, hautement inflammable, est relative aux priorités que le pays se donne en termes de répartition des usages de l'eau entre les différents acteurs.

Les conflits sur le choix des consommations prioritaires vont aller grandissant et vont concerner tous les secteurs, de l'agriculture au tourisme, des activités de loisirs aux industries. Les exemples de luttes et de conflits sont déjà là. Dans la vallée de l'Isère, une confrontation autour du partage de l'eau se joue autour de la production électronique des semi-conducteurs, qui, en plus d'être énergivore, est très gourmande en eau.

Le contexte hydroclimatique aggrave aussi un conflit qui remonte aux années 1990 : celui des retenues d'eau à usages multiples (agriculture, industrie, pisciculture, loisir, soutien d'étiage). Aujourd'hui ce serait près de 800 000 retenues observées par satellites. Parmi elles, les mégabassines, une centaine actuellement mais avec de nombreux projets en cours, suscitent tout particulièrement des tensions fortes entre différents acteurs territoriaux. Présentées comme des retenues de substitution, elles pompent en réalité l'eau souterraine ou le fil des rivières, perturbant les cycles de l'eau et les écosystèmes, bénéficiant d'un statut dérogatoire donné par la préfecture sur les restrictions de prélèvements en cas de sécheresse. La question à la fois de la légalité et de la légitimité de ces ouvrages est posée avec force, dans la mesure où ils profitent à une petite minorité d'agriculteurs et qu'ils impactent la quantité et la qualité des eaux disponibles pour le plus grand nombre.

Il faut politiser et démocratiser l'eau. Le monde de l'eau est particulièrement complexe et inconnu pour la majorité de la population même s'il regorge en théorie d'acteurs et de structures consultatives et décisionnelles. Face au constat d'échec de plus en plus patent quant à la capacité du système actuel de faire face aux défis et aux enjeux que nous avons devant nous, de nouveaux processus de participation publique, de co-élaboration et de co-décision des politiques publiques sont à repenser dans le cadre d'une gouvernance de l'eau, adaptée aux différentes échelles territoriales. Il faut réaffirmer le primat d'une gouvernance publique dicté selon l'intérêt général, d'une gestion publique de l'eau débarrassée des logiques financières de profit et de politique de l'eau pensée sur le long-terme au bénéfice des populations, de l'eau et des milieux aquatiques. Un changement de paradigme s'impose qui demande de partir des milieux naturels et de la disponibilité des ressources, et non de continuer ce mode de développement fondé sur la croissance des volumes prélevés-consommés exigeant toujours plus de ressources additionnelles. Pourquoi ne pas repenser notre système démocratique malade en partant de la gestion et du partage des ressources naturelles, au premier rang desquelles l'eau ?

Références bibliographiques du dossier

- AMRAOUI, N., GOLAZ, C., MARDHEL, V., NÉGREL, P., PETIT, V., PINAULT, J., & POINTET, T. (2002). – Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme. *Rapp. tech. No BRGM/RP-51827-FR*. BRGM. Orléans.
- ANTHONY E. (2000). – Marine sand supply and Holocene coastal sedimentation in northern France between the Somme estuary and Belgium. In PYE, K. & ALLEN, J. R. L. (eds). *Coastal and Estuarine Environments. " sedimentology, geomorphology and geoarchaeology*. Geological Society, London, Special Publications, 175: 87-97.
- 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 | 2019, 257-270.
- ANTOINE P., LIMOONDIN LOZOUET N., CHAUSSÉ C., LAUTRIDOU J.-P., PASTRE J.-F., AUGUSTE P., BAHAIN J.-J., FALGUÈRES C. & GALEHB B. (2007). — Pleistocene fluvial terraces from northern France (Seine, Yonne, Somme) : synthesis, and new results from interglacial deposits. *Quat. Sc. Rev.*, 26 : 2701-2723.
- ANTOINE P., GOVAL E., JAMET G., COUTARD S., MOINE O., HÉRISON D., AUGUSTE P., GUÉRIN G., LACROIX F., SCHMIDT E., ROBERT V., DEBENHAM N., MESZNER S. & BAHAIN J.-J. (2014). — Les séquences loessiques Pléistocène supérieur d'Havrincourt (Pas-de-Calais, France) : stratigraphie, paléoenvironnements, géochronologie et occupations paléolithiques. *Quaternaire*, 25 : 321-368.
- ARNAUD, L., & ROUSSEAU, M. (2019). – Appui au SCHAPI 2018 - Module 2 : Extension du modèle maillé des hautes eaux de la Somme au bassin versant de l'Authie. Rapport final. *Rapp. tech. No BRGM/RP-67360-FR*. Orléans, BRGM.
- AZI-ATLAS des zones inondables. Site de la DREAL Hauts-de-France. *Vallée de l'Authie (2006), vallée de la Canche (1997), vallée de la Liane (1996), vallée de la Lys supérieure (2001), vallée de la Sambre (2001)*. <https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/?Consulter-l-atlas>
- BAETMAN C., 2016 – Modifications du paysage et possibilité d'activités humaines pendant l'Holocène dans la plaine maritime belge. In I. Leroy et L. Verslype (éds.), *Les cultures des littoraux au Haut Moyen Âge. Cadres et modes de vie dans l'espace maritime Manche-mer du Nord du IIIe au Xe siècle*. *Revue du nord*, Hors série. Collection Art et Archéologie, v. 24, pp. 15-28.
- BAKALOWICZ, M. (2018). De l'évolution historique du concept d'aquifère de la craie. *Géologues*, 199 : 4-6.
- BAULT, V., BOURGINE, B., LOISELET, C., & ANQUETIL, E. (2015). – Cartes piézométriques basses eaux 2013 et hautes eaux 2014 des nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur dans le Bassin parisien. *Rapp. tech. No BRGM/RP-64887-FR*. BRGM. Orléans.
- BAULT, V., BOURGINE, B., CARY, L., GOURCY, L., KOROTCHANSKY, A., & WINCKEL, A. (2018). – Etude du fonctionnement global de l'hydrosystème du Marquenterre, en lien avec les marais arrière-littoraux. *Rapp. tech. No BRGM/RP-67430-FR*. BRGM. Orléans.
- BAULT, V., GOURCY, L., CARY, L., WINCKEL, A., & BOURGINE, B. (2023). – Characteristics of the chalk groundwater along the Picardy coast and its relationship with wetlands [Publisher : The Geological Society of London]. *Geological Society, London, Special Publications*, 517(1), SP517–2020-129. <https://doi.org/10.1144/SP517-2020-129>
- BECKELYNCK, J. (1981). Traitement régionalisé des paramètres contribuant à la gestion des nappes : application à la modélisation de la nappe de la craie dans le bassin de l'Aa et de la Moyenne Lys (région Nord Pas-de-Calais) [*Thèse de doctorat*]. Université de Lille 1 - Sciences et Technologies.
- BELIN J.J., MAITTE B., La cathédrale d'Amiens, ses matériaux, sa construction, *Ann. Soc. Géol. Nord*, T. 26 (2^e série), Déc. 2019, p. 47 - 57.
- BRACQ, P. (1992). L'effet d'échelle sur comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux, apports de l'analyse morphostructurale. [*Thèse de doctorat*]. Université Lille 1 - Sciences et technologies. Villeneuve-d'Ascq, France ; 262 p.
- BRACQ, P., & BRUNIN, A.-S. (1999). Approche des relations tectonique-karst-hydrodynamisme par l'analyse de traçages réalisés dans l'aquifère crayeux du Boulonnais (Escalles, Nord de la France). *Geodinamica Acta*, 12 : 359-370. <https://doi.org/10.1080/09853111.1999.11105355>
- BRAVARD J.P., PETIT F. (1997) - *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Coll. U, Armand Colin éd., Paris, 222 p.
- BRUGERON, A., MALCUIT, E., GOURCY, L., PINSON, S., & BOURGINE, B. (2020). – Identification des lieux d'échanges potentiels « Eau de surface / Eau souterraine » à l'échelle du bassin Artois-Picardie. *Rapp. tech. No BRGM/RP-69440-FR*. BRGM. Orléans.
- BESSIÈRE, H., PICOT, J., PICOT-COLBEAUX, G., & PARMENTIER, M. (2015). Affinement du modèle hydrogéologique de la Craie du Nord-Pas-de-Calais autour des champs captants de la métropole Lilloise. *Rapp. tech. No BRGM/RP-63689-FR*, BRGM, Orléans.
- BUSCARLET, E., PICKAERT, L., STOLLSTEINER, P., KLINKA, T., WUILLEUMIER, A., & ASFIRANE, F. (2011). – Modélisation de la nappe de la craie – Schéma conceptuel et calage du modèle hydrodynamique en régime permanent *Rapp. tech. No BRGM/RP-59720-FR*. BRGM. Orléans.
- CAOUS, J.-Y., & GABENS, O. (1993). – Synthèse hydrogéologique de la nappe du landenien des Flandres. *Rapp. tech. No BRGM/RR-37550-FR*. BRGM. Orléans.

- CAOUS, J.-Y., LAMOTTE, C., LEPRÊTRE, J.-P., & NICOLAS, J. (1997). – Contrôle quantitatif et qualitatif de l'aquifère landénien des Flandres *Rapport No BRGM/RR-39678-FR*. BRGM. Orléans.
- CARDIN, C., & DUFRENOY, R. (2009). – Nord-Pas-de-Calais - Nappe de la craie, campagne et carte piézométrique "Hautes et basses eaux" 2009 *Rapp. tech. No BRGM/RP-58542-FR*. BRGM. Orléans.
- CAULIER, P. (1974). Etude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord [*Thèse de doctorat*]. Université Lille1 - Sciences et Technologies. Lille.
- CAUDRON, M. (2006). Bassin de Paris - Picardie et Champagne éocènes [Chapitre III - Bassin de Paris, 4.]. In J.-C. Roux (Éd.), *Aquifères et Eaux Souterraines en France* (p. 263-271, T. 1). IAH-BRGM Editions.
- CAUDRON, M., & ROUX, J.-C. (2006). – Bassin de Paris - Picardie crayeuse [Chapitre III - Bassin de Paris, 14.]. In J.-C. Roux (Éd.), *Aquifères et Eaux Souterraines en France* (p. 187-190, T. 1). IAH-BRGM Editions.
- CHRÉTIEN, P., FERET, M., GUIONIE, P., IZAC, J., JEGOU, J., JOUBLIN, F., KIEFFER, C., NAIL, C., & ROBÉLIN, C. (2006). Picardie. Nappe libre de la Craie. Campagne et carte piézométriques "basses eaux" 2005. *Rapp. tech. No BRGM/RP-54285-FR*. BRGM. Orléans.
- COLBEAUX J.P., SOMMÉ J., TUFFREAU A. (1981) - Tectonique quaternaire dans le Nord de la France : l'apport du gisement paléolithique de Biache-Saint-Vaast. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, 18 (3), 183-192.
- COMITÉ DE BASSIN ARTOIS-PICARDIE (décembre 2019). – L'état des milieux des districts hydrographiques Escaut, Somme & cours d'eau côtiers Manche, mer du Nord, Meuse (partie Sambre), parties françaises : https://www.artois-picardie.eaufrance.fr/IMG/pdf/edl_district_hydro_bd.pdf
- COMITÉ DE BASSIN ARTOIS-PICARDIE (mars 2022). – Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux 2022-2027 du bassin Artois-Picardie : https://www.artois-picardie.eaufrance.fr/IMG/pdf/sdage_2022-2027_livrets_1_a_4.pdf
- CRAMPON, N., MANIA, J. & CAOUS, J., (2006). – Aquifères et ressources en eau souterraine du Nord-Pas-de-Calais. *Ann. Soc. Géol. Nord*, 10(3), 219-232.
- CRAMPON, N., CAOUS, J., LEPLAT, J., & MANIA, J. (2006). – Flandres, Artois - Ardennes [Chapitre IV]. In J.-C. Roux (Éd.), *Aquifères et Eaux Souterraines en France* (p. 330-397, T. 1). IAH-IAH-BRGM Editions.
- CZERNICHOWSKI-LAURIOL, I. (1996). – Les Aquifères Littoraux De La Région Picardie. *Rapp. tech. No BRGM/RR38981-FR*. BRGM.
- DACHARRY M. (2015) - *L'abondance et le régime des cours d'eau*. In L'Atlas du bassin Artois-Picardie, Agence de l'Eau Artois-Picardie, 52 p.
- DELAINE G. (1969). – Les waterings du Nord de la France. *Imp. Landais*, Dunkerque. 331 p.
- DELIGNE C. (1998). - La vallée de la Scarpe inférieure aux XXe et XIIIe siècles, Douai, Arkeos/service archéologique de Douai, 1998 (Archaeologia Duacensis 13).
- DELMARE B. (1985). - L'histoire-polyptyque de l'abbaye de Marchiennes (1116/1121). *Étude critique et édition*, Louvain-la-Neuve, (Centre belge d'histoire rurale/Belgisch Centrum voor landelijke geschiedenis, publication/publikatie n° 84).
- DEMOLON P., HALBOUT H., LOUIS E., LOUIS-VANBAUCE M. (1990) - Douai Cité médiévale Bilan d'archéologie et d'histoire, *Archaeologica duacensis*, n°3, Douai, 70 p., ill.
- DERRUAU M. (1974) - *Précis de géomorphologie*. 6^e éd., Masson, 453 p.
- DERVILLE A. (1990) - Rivières et canaux du Nord/Pas-de-Calais aux époques médiévale et moderne. *Revue du Nord*, tome LXXII, 284, 5-22.
- DESCHODT L. (2014). – Chronostratigraphie et paléoenvironnements des fonds de vallée du bassin français de l'Escaut. *Thèse Dr., Université Paris-I – Panthéon-Sorbonne*, Paris, 632 p.
- DESCHODT L. (2015) - La plaine de la Scarpe : héritages morpho-stratigraphiques pléistocènes. *Guide de l'excursion de la Société Géologique du Nord du 25 mars 2015*. <https://hal.science/hal-01397092.pdf>
- DESCHODT L. (2021) - Stratigraphie, dynamique fluvio-éolienne et héritages du pléniglaciaire supérieur weichselien dans les basses plaines du bassin français de l'Escaut (nord de la France), *Quaternaire* [En ligne], vol. 30/4 | 2019, mis en ligne le 01 janvier 2021, consulté le 13 avril 2021. URL : <https://doi.org/10.4000/quaternaire.12444>
- DESCHODT L., LANÇON M., DESOUTTER S., HULIN G., SIMON F.-X., VANWALSCELLE B., CRÉTEUR Y., BROES F., DEVRED V., FAVIER D. & LE BAYON A.-L. (2021). – Exploration archéologique de 170 hectares de plaine maritime (Bourbourg, Saint-Georges-sur-l'Aa, Craywick, Nord de la France) : restitution d'un estuaire au Moyen Âge et mise en évidence de mares endiguées. *BSGF, Earth Sciences Bulletin*, 192 : 12 ; Published by EDP Sciences 2021, <https://doi.org/10.1051/bsgf/2021004>
- DESOUTTER S. (2019). – Une occupation antique liée à la production de sel sur la commune de Ruminghem. *Rapp. INRAP-HdF*, 140p.
- DEUDON L. coord. (2018). - Géohistoire des zones humides des vallées de la Scarpe et de l'Escaut – *Rapport de synthèse du Groupe de Travail « Histoire et Patrimoine liés aux zones humides »*. Étude historique réalisée dans le cadre de la candidature Ramsar des vallées de la Scarpe et de l'Escaut, Parc naturel régional Scarpe-Escaut. <http://www.pnr-scarpe-escaut.com/publications>
- DION R. (1988). - Les grandes étapes de l'aménagement des plaines de la Scarpe et du Bas-Escaut français. In : *Hommes et Terres du Nord*, numéro hors-série 1988. Campagnes et littoraux d'Europe. Mélanges offerts à Pierre Flatrès. p. 226-237.
- DOWNING, R., PRICE, M., & JONES, G. (1993). – The Hydrogeology of the Chalk of North-west Europe. *Clarendon Press*.

- DREAL 59/62 (2013). – Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord – Pas-de-Calais. *Rapport SR/DRNHM*, décembre 2013, 75 p.
- EL-OUAFI M. (1993). – Tarsissement et vidange des réservoirs de la Liane (Nord de la France). *Hydrogeol. Continentale*, 8 : 103-112.
- FOURDRINIER M. (1983). – Les portions ménagères de marais dans le nord de la France. Les exemples d'Ennevelin et Annappes. *Revue du Nord*, tome 65, n°258, Juillet-septembre 1983, p. 555-566.
- FOURRIER H. (1989). – La Plaine de la Scarpe et ses bordures (Nord de la France) : analyse séquentielle des formations superficielles ; aspects sur les sols. *Thèse Dr. Univ. Sc. Tech. Lille*, 304 p.
- GANDOUIN E., VAN VLIET-LANOË B., FRANQUET E., ANDRIEU-PONEL V., KEEN D.H., PONEL P., MEURISSE M., BRULHET J. & BROCANDEL M. (2007). – Analyse en haute résolution de la transgression holocène dans un secteur subsident du littoral français : le bassin marais de Saint-Omer (Pas-de-Calais, France). *Géol. Fr.*, I : 11-32.
- GOSSELET J. (1893). – Géographie physique du Nord de la France et de la Belgique : II – La plaine maritime. *Ann. Soc. Géol. Nord*, T21 : 119-137.
- GUERZAGET J.-P. (2022) - L'abbaye de Marchiennes, milieu VIII – début XIII^e siècle. *Du monastère familial à l'abbaye bénédictine d'hommes : histoire et chartes*, Turnout, Brepols (ARTEM 32).
- GUPTA, S., COLLIER, J.S., PALMER-FELGATE, A., POTTER, G., (2007). – Catastrophic flooding origin of shelf valley systems in the English Channel. *Nature* 448, 342–345.
- 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.
- HYDRATEC (2013) - *Hydrologie du bassin de l'Oise*, rapport de phase 1. Entente Oise-Aisne, 29 p.
- INSTITUTION INTERCOMMUNALE DES WATERINGUES (IIW). (2014). – Les wateringues, hier, aujourd'hui et demain. *AGUR*, Dunkerque.
- IIW-Institution Intercommunale des Wateringues (2023). <https://www.institution-wateringues.fr/institution/competences/> Site consulté le 14/08/2023.
- LADRIÈRE J. (1888). – L'ancien lit de la Scarpe. *Ann. Soc. Géol. Nord*, XV : 217-238.
- LANÇON M & BOULEN M. (2019). – Les occupations humaines de la plaine maritime flamande à l'Holocène supérieur. Un changement de paradigme ? *Quaternaire*, 30 : 311-334. doi :311-334, 10.4000/quaternaire.12445.
- LARUE J.P. (2000) - Morphodynamique fluviale et néotectonique dans la vallée de l'Oise (Bassin parisien, France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 171(5), 577-585.
- LEADATA, NEEL C., MAUGIS P., POC (STRATEAU) STRATEAU sur le département63, 2021 (POC STRATEAU)
- LEMAN P. (2010). – À la recherche des voies romaines dans le Nord – Pas-de-Calais. *Les Editions Nord-Avril*, Bouvignies, 142 p.
- LOUIS É. (1990). – Alimentation de Douai en eau, au Moyen Âge. In Douai, cité médiévale, Demolon P., Halbout H, Louis E. et Louis-Vanbauce M. (coord.), *Archaeologica Duacensis*, n°3, Soc. archéologique Douai, p. I-5 à I-39
- LOUIS É (2009). - Douai et les détournements de la Scarpe, IX^e - XI^e s., in : *Lit mineur, lit majeur, lit voyageur : mémoires et cours d'eau : 11e Rencontres internationales de Liessies*, [24-25 septembre 2008]. - Villeneuve-d'Ascq : Revue du Nord, 2009, p. 81-100.
- LOUIS É. (2021a). - Géohistoire des « Prés de Râches » : Analyse historique et topographique d'un ensemble parcellaire d'origine médiévale : 15^e - 20^e s., in : SÉVERIN C. dir. - Râches (59) « Parc archéologique Arkéos », fouilles archéologiques préventives (novembre-décembre 2018), *rapport final d'opération*. Douai, Douaisis Agglo, direction de l'archéologie préventive.
- LOUIS É. (2021b). - Le site des Argailles, le fief de Waziers-Flandre et les seigneuries de Waziers. Étude documentaire, in : Carpentier F. dir. - Waziers, Rue des Argailles, *rapport de diagnostic d'archéologie préventive*, Douai, Douaisis Agglo, direction de l'archéologie préventive.
- MAMETZ, D. (2022). – « La Dorsale de l'Eau » : un projet d'intérêt général. *LEA#8*, Assoc. L'Esprit d'Archimède, Villeneuve d'Ascq, 31-33.
- MANIA, J. (1972). – Hydrogéologie des sables landéniens en Flandres franco-belges. *Ann. Soc. Géol. Nord*, 92 : 55-66.
- MANIA J. & RICOUR J. (1974). – Hydrogéologie et alimentation artificielle de la nappe du Séquanien dans la région de Saint-Léonard (Pas-de-Calais). *Ann. Soc. Géol. Nord*, 94 : 133-147.
- MAQSOUUD, A. (1996). Approche hydrologique et hydrochimique du caractère karstique éventuel d'hydrosystèmes souterrains de la craie du bassin de Paris [*These de doctorat*]. Université de Lille 1 – Sciences & Technologies, 324 p.
- (DE) MARSILY G. (2009). – L'eau, un trésor en partage. Dunod, 258 p.
- MASSON E. (2021). – Comprendre l'importance du concept de « bassin versant » pour la gestion de l'eau et l'aménagement du territoire. *LEA*, Ass. L'Esprit d'Archimède, #6 : 40-42.
- MAUGIS P., VALADIER F., & PIQUERAS U., STRATEAU, un nouvel outil de prospective sur les tensions sur l'eau - Application à la reconstitution des usages de l'eau en France métropolitaine. 2015. hal-02936740
- MÉGNIEN, C. (1979). *Hydrogéologie du centre du bassin de Paris : contribution à l'étude de quelques aquifères principaux*. Éditions du B.R.G.M.
- MEILLIEZ F. & MANSY J.L. (1990). – Structures de déformation pelliculaire dans une série lithologique différenciée : le Dévonno-Carbonifère de l'Ardenne. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, Paris (8), VI, pp. 177-188.

- MEILLIEZ F. & STYZA A. (2023). – Herzelee, un jalon important dans l'histoire quaternaire européenne. *Bull. Comité Flamand France*, n°129 : 5 - 10.
- PINCHEMEL P. (1954) - *Les plaines du Nord-Ouest du Bassin parisien et du Sud-Est du bassin de Londres et leurs bordures*. Paris, 502 p., 49 fig., 22 pl
- PICOT-COLBEAUX, G., ROUSSEAU, M., PARMENTIER, M., GUILLAUME, M., & GODERNIAUX, P. – (2020).– Actualisation du modèle maillé des écoulements souterrains de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (France – Belgique). Rapp. tech. N° BRGM/RP-68738-FR.
- PINSON, S., & SEGUIN, J. J. (2007). – Nappe transfrontalière du Calcaire Carbonifère (Synclinal de Tournai) – Etat des lieux des connaissances en vue d'une modélisation de son fonctionnement pour une gestion intégrée. Rapp. tech. N° BRGM/RP-55117-FR.
- PIQUERAS U., VALADIER F., & MAUGIS P., COMPARAISON DES RÉSULTATS DE L'OUTIL STRATEAU AUX DONNÉES DE PRÉLÈVEMENTS POUR REDEVANCES DES AGENCES DE L'EAU, RAPPORT ENERGIES DEMAIN-ONEMA, 2012. HAL-02936928 RAMSTEIN G. (2015). – Voyage à travers les climats de la Terre. *Odile Jacob, édi.*, 351 p.
- ROBAUT F. (1834). - Carte de la Vallée de la Scarpe indiquant le report des terres imposées sur les plans cadastraux, opéré conformément à l'Ordonnance du 16 Décembre 1834, Douai. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148>
- SOGREAH, 1998 - *Essai de synthèse des données sur les ressources en eaux du bassin de la Lys*. Rapport final. SAGE Lys, Communauté Artois-Lys, 85 p + annexes.
- SOMMÉ J. (1977). – Les plaines du nord de la France et leur bordure : étude géomorphologique *Thèse d'Etat* (1975, Paris-1), Atelier de reproduction des thèses, Lille III, D 2 tomes, 810 pages, 184 figures et cartes.
- SOMMÉ J., 2013 – Unités lithostratigraphiques quaternaires du Nord de la France : un inventaire. *Quaternaire*, v. 24, n°1, pp. 3-12, doi : 10.4000/quaternaire.6441.
- SOMMÉ J., ANTOINE P., CUNAT-BOGE N., LEFEVRE D. & MUNAUT A.-V. (1999). – Le Pléistocène moyen marin de la mer du Nord en France : falaise de Sangatte et formation d'Herzelee; *Quaternaire*, v. 10, n°2-3, pp. 151-160. <https://doi.org/10.3406/quate.1999.1638>
- SRAVE (2012) - *Schéma régional d'aménagement de la voie d'eau, horizon 2025. Les enjeux hydrauliques*. Voies Navigables de France, 57 p.
- THIÉRY, D., AMRAOUI, N., & NOYER, M.-L. (2018). – Modelling flow and heat transfer through unsaturated chalk – Validation with experimental data from the ground surface to the aquifer. *Journal of Hydrology*, 556: 660-673. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.041>
- TOUCANNE S., ZARAGOSI S., BOURILLET J-F., CREMER M., EYNAUD F., VAN VLIET-LANOË B., PENAUD A., FONTANIER C. TURON J-L., CORTIJO E. & GIBBARD P-L. (2009a). – Timing of massive « Fleuve Manche » discharges over the last 350 kyr : insights into the European ice-sheet oscillations and the European drainage network from MIS 10 to 2. *Quat. Sc. Rev.*, 28:1238-1256.
- TOUCANNE S., ZARAGOSI S., BOURILLET J-F., GIBBARD P-L., EYNAUD F., GIRAUDEAU J., TURON J-L., CREMER M., CORTIJO E., MARTINEZ P. & ROSSIGNOL L. (2009b). – A 1.2 Ma record of glaciation and fluvial discharge from the West European Atlantic margin. *Quat. Sc. Rev.*, 2974-2981.
- TRENTESAUX A. (1993). – Structure et dynamique sédimentaire du Middelkerke Bank, Mer du Nord méridionale. <https://pepite.univ-lille.fr/ori-oai-search/notice/view/univ-lille-25663?lightbox=true>
- TRENTESAUX A. (2005). – Enregistrement de processus sédimentaires pléistocènes Exemples de plates-formes détritiques et de bassins profonds Mer du Nord et mers de Chine. <https://pepite.univ-lille.fr/ori-oai-search/notice/view/univ-lille-14205>
- VATIN T. & EUVERTE C. (2021). – Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux 2022-2027 : un document à la conjonction des politiques publiques diversifiées et d'enjeux actuels. *LEA, Ass. L'Esprit d'Archimède*, #6 : 37-39.
- WEST, L. J., FARRELL, R. P., FOLEY, A. E., HOWLETT, P. R., & MASSEI, N. (2023).– An introduction to the chalk aquifers of northern Europe. *Geological Society, London, Special Publications*, 517: SP517–2023-3. <https://doi.org/10.1144/SP517-2023-3>
- 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.

GLOSSAIRE ET LIENS NUMÉRIQUES

ADES : Portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines : <https://ades.eaufrance.fr/>

ADEME : Agence de la transition écologique : <https://www.ademe.fr/>

ADOPTA : Association Douaisienne pour la Promotion des Techniques Alternatives dans la gestion des eaux pluviales : <https://adopta.fr/>

AEAP : Agence de l'Eau Artois-Picardie : <https://www.eau-artois-picardie.fr>

AGUR (Agence d'Urbanisme Flandre Dunkerque) : <https://www.agur-dunkerque.org>

ALMA (Sources : <https://www.sources-alma.com/>

ARS : Agence Régionale de Santé : <https://www.hauts-de-france.ars.sante.fr/>

BNPE : Banque Nationale des Prélèvements en Eau : <https://bnpe.eaufrance.fr>

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières : <https://www.brgm.fr/fr>

CASQ : Communauté d'Agglomération de Saint-Quentin : <https://www.agglo-saintquentinois.fr/>

CAUE : Conseil, Architecture, Urbanisme, Environnement : <https://www.caue-nord.com/fr>

CEN : Conservatoire des Espaces Naturels des Hauts-de-France <https://www.cen-hautsdefrance.org> : nouvel acronyme : Géodéo.

CEREMA : Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement : <https://www.cerema.fr/fr>

CMR : Substances chimique Cancérogènes, Mutagènes, toxiques pour la Reproduction

COP : Conférence des Parties

CSNE : Canal Seine Nord Europe : <https://www.canal-seine-nord-europe.fr/>

DCE : Directive Cadre de l'Eau :

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunale : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/>

GEMAPI (Gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations) : <https://www.ecologie.gouv.fr>

IIW (Institution intercommunale des wateringues) : <https://www.institution-wateringues.fr/>

Infoterre : Système d'Information du BRGM : <http://infoterre.brgm.fr/>

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques : <https://www.insee.fr/fr/accueil>

LISIC : Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale (<https://mawenzi.univ-littoral.fr/uHMM/fr/>),

NOREADE : Syndicat interdépartemental des eaux du Nord de la France : <https://agenceenligne.noreade.fr/>

Projet Mageteaux : <http://www.mageteaux.eu/fr>

SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article788>

SAGE : Schéma d'aménagement et de gestion de l'eau : <https://www.gesteau.fr/presentation/sage>

SDAGE : Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux

SIDEN-SIAN : cf. NOREADE

SIGES : Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines : <https://sigesnpc.brgm.fr/-Hydrogeologie-.html>

SMAGE AA (Syndicat mixte pour l'aménagement et la gestion des eaux de l'Aa : <https://www.smageaa.fr/>

SOGREAH (Société Grenobloise d'Etudes et Applications Hydrauliques) : <https://www.arteliagroup.com/fr>

S-PASS Territoires/Ruminghem : <https://cdn.s-pass.org/fr/observatoire/61881/les-salines-antiques-de-ruminghem.html>

SRADDET : Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires

STRATEAU : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cerema-mobilise-plan-eau-etudier-developpement-reutilisation>

SYMVAHEM (Syndicat mixte de la vallée de la Hem) : <https://symvahem.fr/>

ULCO : Université du Littoral et de la Côte d'Opale : <https://www.univ-littoral.fr/>

USAN : Union syndicale d'aménagement hydraulique du Nord : <https://www.usan.fr/>

UTL (Université du Temps Libre, Lille) : <https://utlille.fr/premiere.php?f=P2o8o>

VNF : Voies Navigables de France : <https://www.vnf.fr/vnf/>

ZNIEFF : Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique : <https://inpn.mnhn.fr/programme/inventaire-znieff/presentation>

La Société Géologique du Nord, une maison d'édition



Anticlinal de la Crèche dans les dépôts du Jurassique supérieur au nord de Boulogne-sur-Mer

© Alain Trentesaux, 2006

La Société Géologique du Nord publie:

- des *Annales* : 157 tomes de 1870 à 2023, dont de nombreux fascicules thématiques : géologie du Nord de la France (générale et thématique), tectonique (rupture des roches et massifs rocheux, tectonique cassante), Paléozoïque, géologie du Gondwana (générale et thématique : Dévonien de l'Ougarta au Sahara, Paléozoïque moyen du Gondwana du Nord, Paléozoïque de l'Iran, Paléozoïque inférieur de la Montagne Noire), géologie de l'Europe, énergie et matières premières, géologie de l'Ardenne ... ; certains de ces fascicules sont des fascicules jubilaires (Centenaire de la SGN, Centenaire du Musée Gosselet) ;
- des *Publications* spéciales : 33 tomes depuis 1977 : Dinarides, arc égéen, Hellénides, Atlantique Sud, Afghanistan, Rocheuses canadiennes, Chaîne caraïbe du Vénézuéla, Pyrénées, Massif ardennais, Océan Indien Nord, fosse vocontienne, Maroc et Espagne, Oural méridional (Russie), Massif du Cantal, bassins de Paris et du sud-est de la France ... Plusieurs *Publications* relèvent de la paléontologie : paléobotanique du Carbonifère, radiolaires du Trias-Lias, foraminifères, récifs dévoniens, vertébrés paléozoïques ; d'autres traitent d'objets ou événements géologiques : minéraux argileux, aquifère crayeux, événement anoxique cénomaniens, modélisation hydrodynamique des eaux souterraines ...
- des *Mémoires* : 25 mémoires de 1876 à 1983 ; cette série est reprise avec le tome XVII sur l'histoire de la SGN et des sciences de la Terre dans le nord de la France (paru en décembre 2014) ;
- des *Tables Générales* : cinq ont été publiées ; la 6^e a été mise en ligne en janvier 2013 et imprimée dans le tome 20 des *Annales* en décembre 2013.

Catalogue et bon de commande téléchargeables à l'adresse suivante : <http://sgn.univ-lille.fr>