

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).

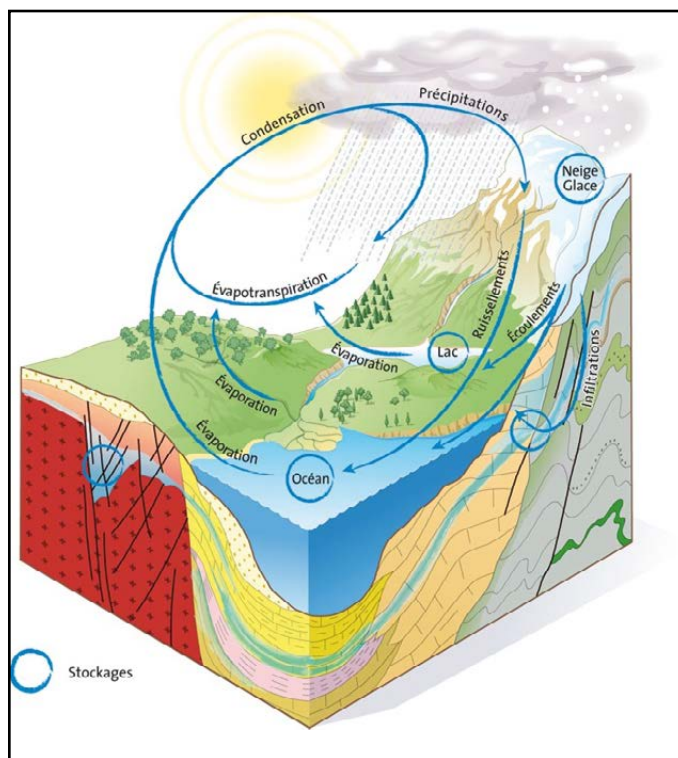


Fig. 1 – Cycle de l'eau et eaux souterraines (Illustration ©BRGM)
Fig. 1 – Water cycle and groundwater (Photo ©BRGM)

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 Mélantois, 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.

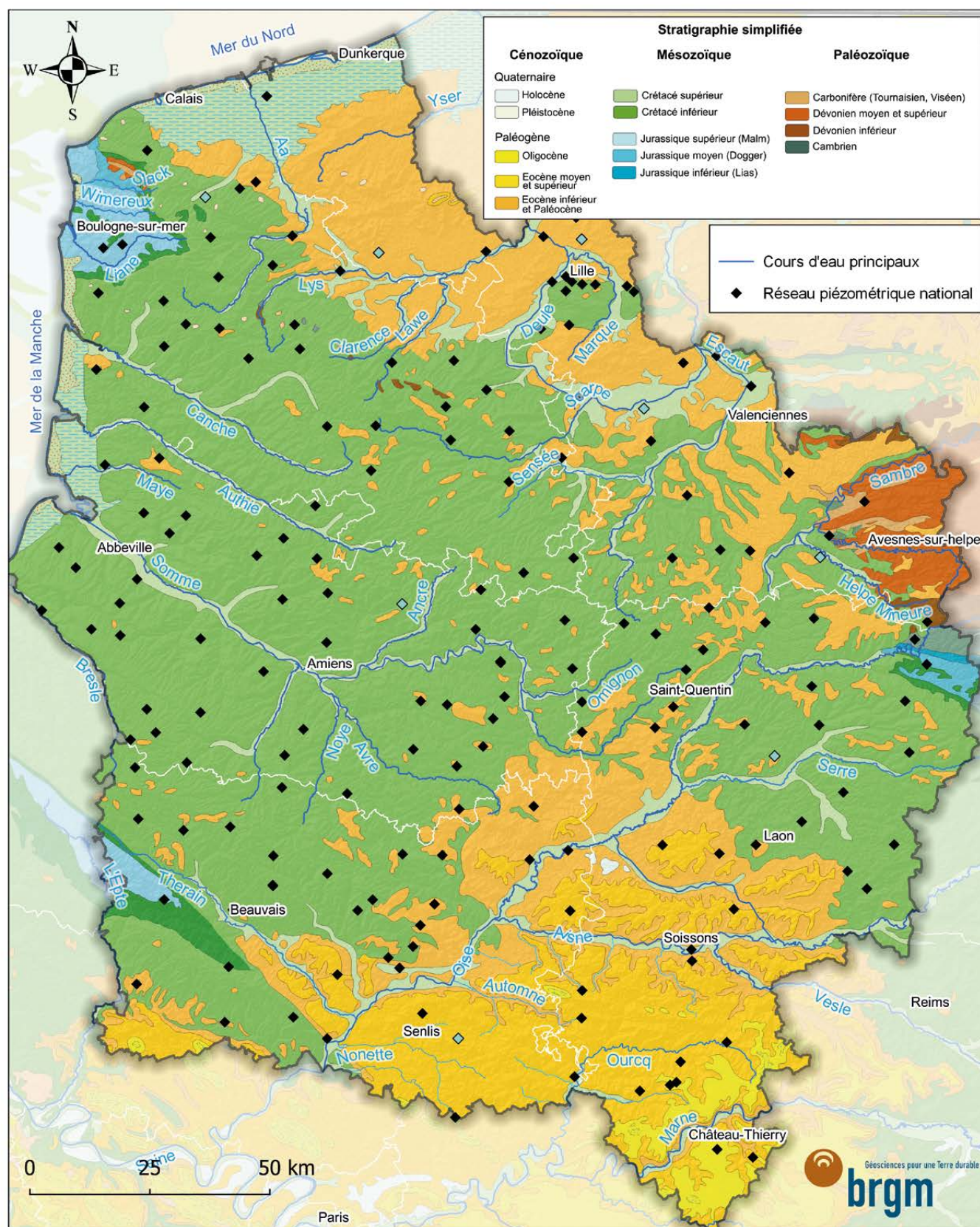


Fig. 2 – Extrait de la carte géologique au 1/1 000 000 (BRGM) sur la région des Hauts-de-France. Les losanges bleu clair montrent les stations sélectionnées pour l'analyse piézométrique.

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>

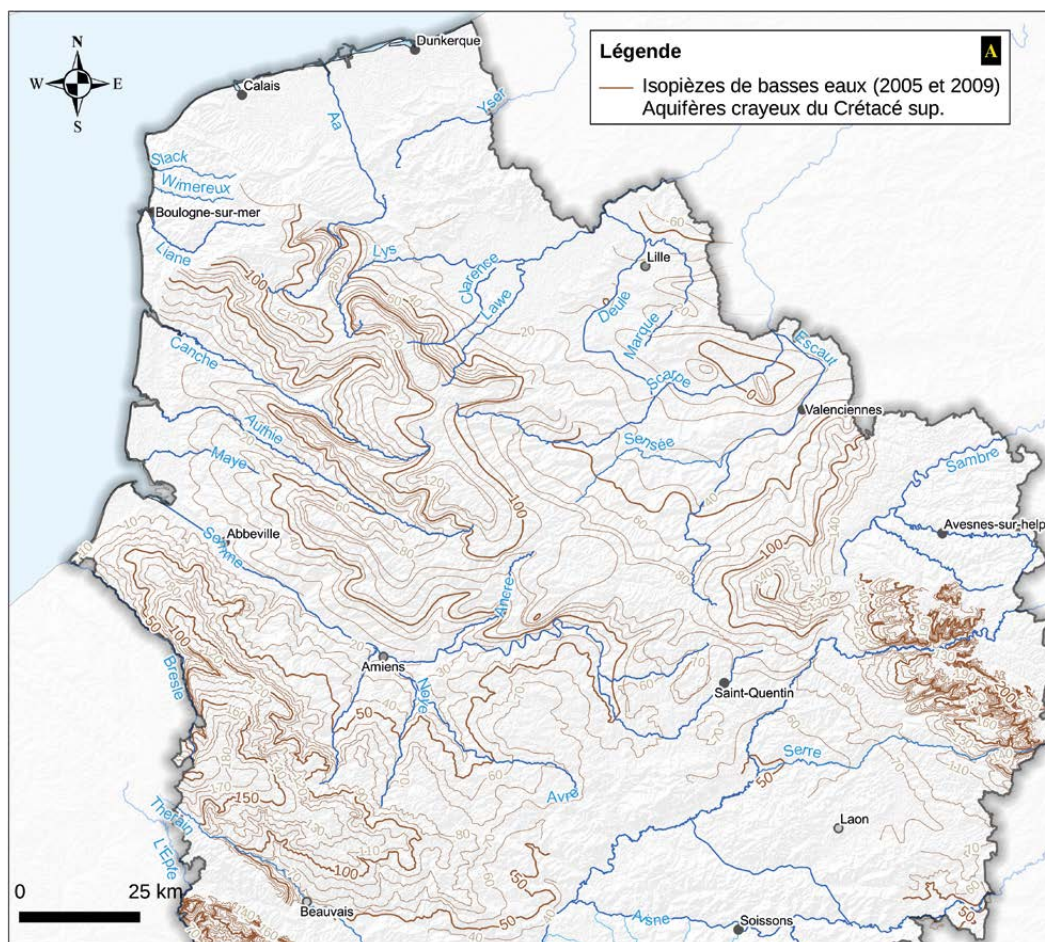
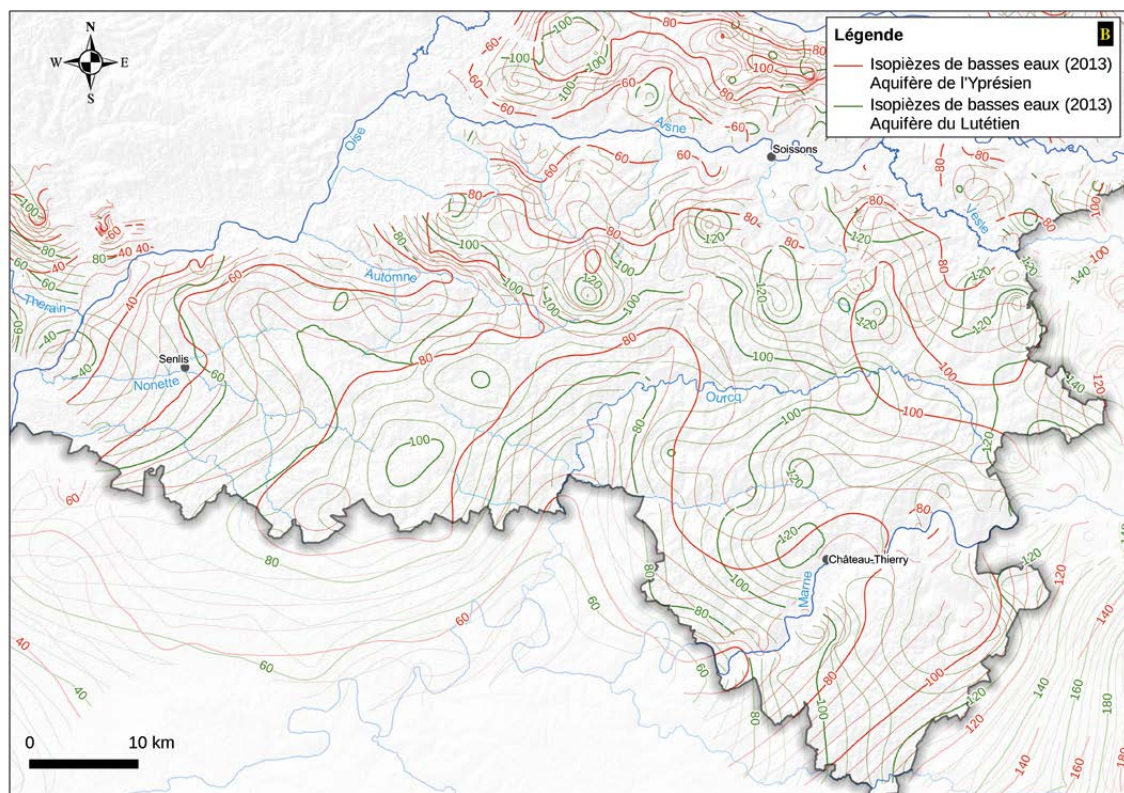


Fig. 3 – Cartes piézométriques (a) des aquifères crayeux en basses eaux (Chrétien *et al.*, 2006 ; Cardin & Dufrenoy, 2009), (b) des aquifères multicouches du Lutétien et de l'Yprésien en basses eaux (Bault *et al.*, 2015).

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

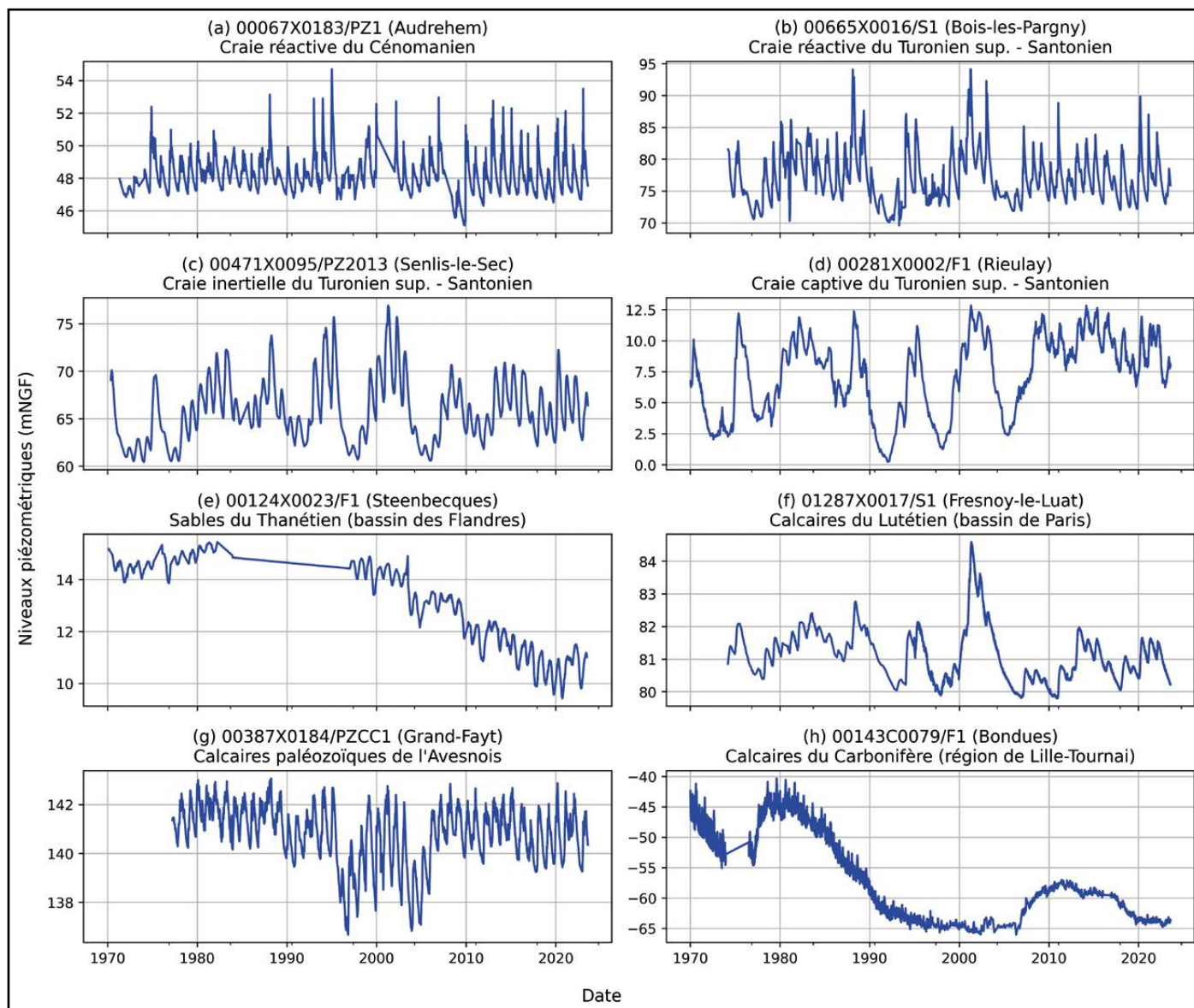


Fig. 4 – Exemple de variations piézométriques dans différents contextes hydrogéologiques des Hauts-de-France (Données BRGM). Données disponibles sur le portail ADES.

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>