

Délibération n° 25_17

**EXTRAIT DU REGISTRE DES DELIBERATIONS DU COMITE SYNDICAL DU SYNDICAT MIXTE
D'AMENAGEMENT DU BASSIN DE L'ITON (SMABI)**

Séance du 16 Mai 2025	Nombre de délégués
Délibération n° 25_17	En exercice : 7
Convocation : 22 avril 2025	Présents ou représentés : 5
Objet : Modification de la délibération n° 24_29 relative à la convention partenariale avec le BRGM – actualisation des montants	Absents : 2

L'An deux-mil-vingt-cinq, le vendredi seize mai, les membres du Comité syndical, légalement convoqués en date du vingt-deux avril deux-mil-vingt-cinq, se sont réunis à la mairie de Conches en Ouche, afin de délibérer. La séance est ouverte à 10h40 sous la présidence de M. Marcel SAPOWICZ.

Etaient présents :

Monsieur Marcel SAPOWICZ
Madame Martine SAINT-LAURENT
Monsieur Christophe ALORY
Monsieur Gérard CHERON
Monsieur Frédéric CHOPIN

Etaient présents sans voix délibérative :

Monsieur Christophe CAPELLE
Monsieur Jean-Marie MAILLARD

Excusés :

ADMINISTRATION GENERALE

MODIFICATION DE LA DELIBERATION N° 24_29 RELATIVE A LA CONVENTION PARTENARIALE
AVEC LE BRGM – ACTUALISATION DES MONTANTS

Le Président expose :

Par délibération n° 24_29 en date du 26 septembre 2024, le comité syndical a autorisé la signature d'une convention partenariale avec le BRGM dans le cadre du programme MORITO, pour un montant total de **911 400 € HT**, réparti à hauteur de 20 % pour le BRGM et 80 % pour le SMABI.

Or, entre la date de la délibération et la signature de ladite convention, les montants du programme ont été révisés d'un commun accord entre les parties, afin de mieux refléter les besoins techniques et scientifiques actualisés du programme.

Il convient dès lors de modifier la délibération n° 24_29 afin d'actualiser les éléments financiers mentionnés et de permettre la signature de la convention mise à jour.

Le nouveau montant global du programme s'élève à **1 003 400 € HT (un million trois mille quatre cent euros HT)**, réparti comme suit :

- Pour le BRGM : **182 280 € HT**
- Pour le SMABI : **821 120 € HT**

Les autres termes de la convention demeurent inchangés.

Après en avoir délibéré, le comité syndical, à l'unanimité :

- **Approuve la modification** de la délibération n° 24_29 en date du 26 septembre 2024 concernant les montants de la convention partenariale avec le BRGM ;
- **Autorise le Président** à signer la convention modifiée, ainsi que tout document y afférent ;
- **Autorise le Président** à solliciter les subventions sur la base du montant actualisé auprès de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie ;
- **Dit que les crédits correspondants sont inscrits** au budget.

Fait et délibéré en séance les jour, mois et an que dessus,
Le registre dûment signé.

Le Président du Syndicat Mixte d'Aménagement du Bassin de l'Iton
Marcel SAPOWICZ

Signé électroniquement par Marcel SAPOWICZ
Date de signature : 19/05/2025
Qualité : Président(e) du SMABl





CONVENTION DE RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT PARTAGÉS RELATIVE AU PROGRAMME MORITO : MODELE MATHEMATIQUE 3D DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU ET ÉVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'ITON

ENTRE

Le **BRGM**, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, établissement public à caractère industriel et commercial, immatriculé au Registre du Commerce et des Sociétés d'Orléans sous le numéro 582 056 149 (SIRET 582 056 149 00120), dont le siège se trouve 3, avenue Claude-Guillemain, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 02, représenté par Madame Catherine LAGNEAU, Présidente Directrice Générale, ayant tous pouvoirs à cet effet,

Ci-après désigné par le « **BRGM** »,

D'une part,

ET

Le **SMABI**, Syndicat Mixte d'Aménagement du Bassin de l'Iton, dont le siège est domicilié Hôtel d'agglomération d'Évreux, 9 rue Voltaire, 27000 Évreux, (SIRET 200 087 252 00017), et représenté par Monsieur Marcel SAPOWICZ, Président, ayant tous pouvoirs à cet effet,

Ci-après désignée par le « **SMABI** »,

D'autre part,

Le BRGM et le SMABI étant ci-après désignés individuellement et/ou collectivement par la (les) « Partie(s) ».

VU,

- le Décret n° 2023-1321 du 27 décembre 2023 portant partie réglementaire du Code de la recherche et notamment ses articles R333-13 à R333-31 ;
- le contrat d'objectifs, de moyens et de performance Etat-BRGM 2023-2027 ;
- les orientations de service public du BRGM pour l'année 2024, adoptées par le « Comité National d'Orientations du Service public » le 11 mai 2023 et approuvées par le Conseil d'Administration du 22 juin 2023.

RAPPEL,

Le BRGM est un établissement public de recherche qui est aussi chargé d'une mission d'appui aux politiques publiques de collecte, de capitalisation et de diffusion des connaissances, dans le domaine des sciences de la Terre et en particulier dans la gestion des ressources en eau souterraine.

Il mène des actions de recherche partenariale avec des filières industrielles et des entreprises de toutes tailles. Il propose des solutions novatrices pour la gestion des sols et du sous-sol, des matières premières, des ressources en eau, de la prévention des risques naturels et environnementaux. Ces actions concernent globalement trois principaux marchés : Energie & Ressources minérales ; Eau et Environnement ; Infrastructures et Aménagement ;

Le SMABI exerce la compétence GEMAPI pour le compte des EPCI adhérents et plus précisément les missions suivantes définies ainsi par l'article L.211-7 du Code de l'environnement :

- L'aménagement des bassins versants
- L'entretien et l'aménagement des cours d'eau, canaux, lacs et plans d'eau,
- La défense contre les inondations et contre la mer,
- La protection et la restauration des zones humides.

Le SMABI est la structure porteuse du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de l'Iton (SAGE ITON).

Le BRGM et le SMABI ont décidé d'un commun accord de mener un programme de recherche et de développements partagés, tel que visé à l'article 4.1 infra, concernant le programme MORITO, ci-après désigné par « le Programme ». L'objet de la présente convention a bien trait à de la recherche fondamentale, de la recherche appliquée ou du développement expérimental, y compris la réalisation de démonstrateurs technologiques et à l'exception de la réalisation et de la qualification de prototypes de préproduction, de l'outillage et de l'ingénierie industrielle, de la conception industrielle et de la fabrication, les démonstrateurs technologiques étant des dispositifs visant à démontrer les performances d'un nouveau concept ou d'une nouvelle technologie dans un environnement pertinent ou représentatif.

Aussi, le BRGM et le SMABI ont décidé par la présente convention, ci-après désignée par la « Convention », de fixer les termes et conditions par lesquels ils s'associent afin de réaliser le Programme.

Les Parties ont établi en commun le Programme qui répond à leurs besoins respectifs. Elles en exploiteront les résultats chacune pour son propre compte.

En outre, compte tenu du fait que (i) les Parties cofinancent le Programme et que (ii) la propriété des résultats issus du Programme, sous quelque forme qu'ils soient, ainsi que tous les droits y afférents, ci-après désignés par « les Résultats », sera partagée entre elles, la Convention est soumise aux dispositions de l'article L2512-5 du Code de la commande publique.

CECI ÉTANT RAPPELÉ, IL EST CONVENU CE QUI SUIIT :

ARTICLE 1. OBJET

La Convention a pour objet de définir les termes, modalités et conditions dans lesquels le BRGM et le SMABI s'engagent à réaliser le Programme.

ARTICLE 2. DURÉE

La Convention entre en vigueur à compter de l'émission d'un ordre de service pris en commun accord des Parties et expirera lors de la réception du dernier paiement tel que prévu à l'article 8 infra.

ARTICLE 3. DOCUMENTS CONTRACTUELS

Sont également considérés comme étant des documents contractuels faisant partie de la Convention, les pièces suivantes, citées par ordre de prééminence :

- le présent document ;
- Annexe A1 : Programme ;
- Annexe A2 : annexe financière.

Les annexes précédentes forment un tout indissociable avec le présent document. En cas de contradiction entre les articles du présent document et les dispositions contenues dans les annexes précédentes, les articles du présent document prévaudront.

Le Programme reste la propriété du BRGM et ne saurait être utilisé en dehors du cadre contractuel pour lequel il a été rédigé.

ARTICLE 4. OBLIGATIONS DU BRGM

4.1. PROGRAMME D'ACTION

Le BRGM s'engage à réaliser, dans le respect des règles de l'art, les tâches prévues pour la réalisation du Programme, conformément aux dispositions des Annexes A1 et A2.

La durée prévisionnelle de réalisation du Programme est de quarante-huit (48) mois à compter de l'entrée en vigueur de la Convention.

4.2. LIVRABLES

Conformément au programme technique visé à l'Annexe A1, le BRGM s'engage à remettre à au SMABI les livrables suivants, en 1 exemplaire numérique transmis par courriel ou sur clé USB ou par lien FTP :

- 1 rapport de synthèse « Modèle Géologique » à l'issu du PT2 ;
- 1 rapport de synthèse « Modèle Hydrogéologique » à l'issu du PT3 ;
- 1 rapport de synthèse générale à l'issu du PT4.

Le SMABI s'engage à valider chaque rapport dans un délai de trois (3) semaines maximum. Au-delà, le rapport sera considéré comme définitif.

4.3. OBLIGATIONS DE MOYENS

Il est rappelé que le contenu des documents visés à l'article 4.2 supra résulte de l'interprétation d'informations objectives ponctuelles et non systématiques (sondages, observations visuelles, analyses, mesures, ...), en fonction de l'état de la science et de la connaissance à un moment donné. Aussi, le BRGM est soumis par convention expresse à une obligation de moyens étant tenu au seul respect du Programme et des règles de l'art.

Le SMABI s'engage à informer de cette limite de responsabilité tous tiers sous-utilisateurs éventuels des informations contenues dans les documents et se portera garant du BRGM en cas de recours exercé par l'un ou plusieurs d'entre eux et fondé sur une inexactitude, erreur ou omission dans le contenu des documents, sous réserve de l'absence de faute prouvée du BRGM.

4.4. FINANCEMENT

Le BRGM s'engage à participer au financement du Programme pour la part qui lui revient dans les conditions exposées à l'article 7 infra, sur la Subvention pour Charge de Service Public (SCSP) qui lui est attribuée par le Ministère chargé de la Recherche (Programme 172).

ARTICLE 5. OBLIGATIONS DU SMABI

Le SMABI s'engage à communiquer au BRGM toutes les données, informations et études qui sont en sa possession, et qui sont utiles à la réalisation du Programme. Le SMABI garantit le BRGM de toute action relative aux droits de propriété desdites données, informations et études mises à sa disposition.

Le SMABI s'engage à faciliter l'accès du BRGM aux informations détenues par ses soins, relatifs au Programme ou par tous tiers à la Convention.

Le SMABI s'engage à participer au financement du Programme pour la part qui lui revient dans les conditions exposées à l'article 7 infra.

ARTICLE 6. NOTIFICATION ET ÉLECTION DE DOMICILE

Toute notification faite au titre de la Convention est considérée comme valablement faite si elle est effectuée par écrit aux adresses suivantes :

Pour le BRGM : Manuel PARIZOT Directeur Régional Normandie 7 rue Andreï Sakharov 76 130 Mont Saint Aignan E-mail : m.parizot@brgm.fr	Pour le SMABI : Marcel SAPOWICZ Président 9 Rue Voltaire 27000 Evreux E-Mail : info@smabi.fr
--	--

Toute modification aux informations communiquées par une Partie au titre du présent article devra être notifiée à l'autre Partie par écrit, courrier et/ou courriel dans les plus brefs délais.

ARTICLE 7. FINANCEMENT DU PROGRAMME

7.1. MONTANT

Le montant du Programme est fixé à un million trois mille quatre cents Euros Hors Taxes (1 003 400 € HT).

Le montant global de la Convention pourra être actualisé par avenant permettant une nouvelle programmation d'opérations.

7.2. RÉPARTITION

Le montant du Programme fait l'objet de la répartition financière suivante sur les montants définis dans l'Annexe A2 soit un total de 1 003 400 € HT :

- **pour le BRGM, 182 280 € HT ;**
- **pour le SMABI, 821 120 € HT.**

Il est à noter que la prestation *d'acquisition géophysique héliportée* de la tâche TA 1.1 du Programme de Travail PT1 tel que décrit dans l'Annexe 1 sera financée à 100% par le SMABI.

Le montant ci-dessus est indiqué Hors Taxes, la TVA au taux légal en vigueur au moment de la facturation étant en sus du prix.

Le BRGM cofinance le budget du Programme, dans le cadre de ses actions de service public.

ARTICLE 8. FACTURATION ET PAIEMENT

8.1. FACTURATION

Le BRGM étant tenu de réaliser le Programme, la part du montant lui revenant ne donnera lieu à aucune facturation.

Il sera facturé au SMABI la part du montant visé à l'article 7.2 supra.

Les références nécessaires au dépôt de la facture dématérialisée dans le portail Chorus Pro sont :

- Identifiant Chorus du SMABI : 200 087 252 00017 (SIRET)

Les factures seront libellées à l'adresse suivante :

Hôtel d'agglomération d'Évreux
9 rue Voltaire
27000 Évreux

Les versements seront effectués par le SMABI, au nom de l'Agent Comptable du BRGM, sur présentation de factures émises par BRGM et selon le cas accompagnées des documents précisés dans l'échéancier ci-dessous :

- 30 % du montant à la signature de la présente convention, soit 246 336 € HT, soit deux cent quatre-vingt-quinze mille six cent trois Euros et vingt centimes Toutes Taxes Comprises (295 603,20 € TTC) ;
- 30 % du montant à l'issue du COPIL3, soit 246 336 € HT, soit deux cent quatre-vingt-quinze mille six cent trois Euros et vingt centimes Toutes Taxes Comprises (295 603,20 € TTC).

- 20 % du montant à l'issue du COPIL4, soit 164 224 € HT, soit cent quatre-vingt-dix-sept mille soixante-huit Euros et quatre-vingts centimes Toutes Taxes Comprises (197 068,80 € TTC).
- 20 % du montant à la remise du rapport de synthèse générale, soit 164 224 € HT, soit cent quatre-vingt-dix-sept mille soixante-huit Euros et quatre-vingts centimes Toutes Taxes Comprises (197 068,80 € TTC).

Le taux de TVA en vigueur à la signature de la Convention est de 20 %. Toute modification du taux de TVA applicable, intervenant durant la période d'exécution de la Convention, sera répercutée dès la première échéance de facturation suivant la date d'entrée en vigueur du nouveau taux.

8.2. PAIEMENT

Les versements seront effectués par le SMABI, par virement bancaire dans un délai de trente (30) jours calendaires à compter de leur date d'émission augmenté de deux (2) jours ouvrés, à l'ordre de BRGM, sur présentation de factures émises par BRGM, au compte ouvert à :

TRÉSOR PUBLIC, Direction Régionale des Finances Publiques, 4 place du Martroi, Orléans
Code Banque 10071, Code Guichet : 45000, Compte N° 00001000034, Clé : RIB 92
IBAN : FR7610071450000000100003492 BIC : TRPUFRP1

À défaut de paiement intégral à la date prévue pour leur règlement, les sommes restant dues seront majorées de plein droit, sans qu'il soit besoin d'une mise en demeure préalable ou d'un rappel, d'intérêts moratoires dont le taux annuel est fixé au taux directeur de la Banque centrale européenne (BCE) augmenté de huit points. Ces intérêts moratoires s'appliqueront sur le montant toutes taxes comprises de la créance et seront exigibles à compter du jour suivant la date de règlement inscrite sur la facture, jusqu'à la date de mise à disposition des fonds par le SMABI. Les intérêts moratoires sont payés dans un délai de quarante-cinq jours suivant la mise en paiement du principal.

ARTICLE 9. PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

9.1. DROITS ET OBLIGATION DE L'AUTEUR

9.1.1. Droits de l'auteur

Dans l'hypothèse où les Résultats relèvent du droit d'auteur, le BRGM est l'auteur des Résultats, et notamment des livrables visés à l'article 4.2 supra.

Le BRGM est titulaire des droits visés aux articles L. 111-1 et suivants du Code de la propriété intellectuelle, à savoir des droits patrimoniaux et moraux.

9.1.2. Garantie

Le BRGM garantit qu'il est titulaire des droits de propriété intellectuelle nécessaires à l'exécution de la Convention.

9.2. CONCESSION DES DROITS D'AUTEUR

9.2.1. Co-titularité des droits patrimoniaux

Le BRGM concède au SMABI les droits patrimoniaux qu'il détient sur les livrables visés à l'article 4.2 supra et sur tous les résultats relevant du droit d'auteur de sorte qu'à l'issue de

l'exécution de la Convention, les Parties en seront co-titulaires à parts égales et le SMABI pourra notamment, sous sa responsabilité exclusive et sans l'autorisation du BRGM :

- reproduire, ou faire reproduire, les documents sur tous supports connus et inconnus, quel que soit le nombre d'exemplaires ;
- représenter, ou faire représenter, les livrables visés à l'article 4.2 supra pour tout type d'usage ;
- adapter, ou faire adapter, par perfectionnements, corrections, simplifications, adjonctions, intégration à des systèmes préexistants ou à créer, transcrire dans un autre langage informatique ou dans une autre langue et créer des œuvres dérivées pour ses besoins propres.

Cette concession est faite à titre gracieux pour le monde entier et pour une durée égale à la durée des droits du BRGM.

9.2.2. Droits moraux du BRGM

Par application des articles L. 121-1 et suivants du Code de la propriété intellectuelle, le SMABI s'engage à respecter les droits moraux du BRGM sur les livrables visés à l'article 4.2 supra et sur tous les Résultats relevant du droit d'auteur, et notamment à citer le BRGM en qualité d'auteur, sur chacune des reproductions ou représentations.

9.3. COPROPRIÉTÉ DES RÉSULTATS NE RELEVANT PAS DU DROIT D'AUTEUR

Dans l'hypothèse où les Résultats ne relèvent pas du droit d'auteur, ces derniers sont la copropriété des Parties à parts égales.

ARTICLE 10. DIFFUSION DES RÉSULTATS

Les Parties s'engagent à mettre à disposition du public les livrables visés à l'article 4.2 supra et tous les résultats à des fins de réutilisation à titre gratuit. Il est rappelé que le BRGM, qui relève des dispositions du Livre III du Code des relations entre le public et l'administration (CRPA) relatives à l'accès aux documents administratifs et à la réutilisation des informations publiques, soumettra les livrables visés à l'article 4.2 supra et tous les Résultats à la licence Ouverte / Open Licence Etalab Version 2.0. Ainsi, les utilisateurs seront libres d'utiliser les livrables visés à l'article 4.2 supra et tous les Résultats, gratuitement et sans restriction d'usage, à la condition de citer le BRGM comme source et la date de dernière mise à jour. En outre, conformément à l'article L. 322-1 du Code des relations entre le public et l'administration, les livrables visés à l'article 4.2 supra et tous les Résultats ne devront pas être altérés et leur sens ne devra pas être dénaturé.

Le SMABI s'engage en outre à citer le BRGM en qualité d'auteur, sur chacun des documents produits, présentations ou communications faites sur le Programme.

De manière réciproque, le BRGM s'engage à citer le SMABI comme partenaire sur chacun des documents produits, présentations ou communications faites sur le Programme.

Dans le cas d'un intérêt commercial des Résultats au bénéfice de tiers, les Parties conviendront des conditions dans lesquelles cette commercialisation sera assurée.

Si une ou plusieurs inventions apparaissent au cours et/ou à l'occasion de l'exécution de la Convention, le BRGM en informera aussitôt le SMABI et les Parties conviendront de dispositions à prendre pour assurer le dépôt et la défense de toute demande de brevet correspondant, ainsi que la prise en charge des frais associés.

ARTICLE 11. SOUS-TRAITANCE, CESSION, TRANSFERT

Chaque Partie peut sous-traiter, sous sa responsabilité, l'exécution de certaines parties de ses obligations contractuelles, sous réserve de respecter les dispositions du Code de la commande publique, notamment en ce qu'elle concerne la présentation, l'acceptation des sous-traitants, ainsi que l'agrément de leurs conditions de paiement.

Aucune des Parties ne peut sans l'accord écrit préalable de l'autre Partie, céder tout ou partie de ses droits ou obligations découlant de la Convention à des tiers.

ARTICLE 12. RESPONSABILITÉ

Chaque Partie est responsable, tant pendant l'exécution de la Convention, des prestations et/ou travaux qu'après leur achèvement et/ou leur réception, de tous dommages, à l'exception d'éventuelles conséquences immatérielles, qu'elle-même, son personnel, son matériel, fournisseurs et/ou prestataires de service, pourraient causer à l'autre Partie dans la limite du montant du financement apporté par chacun et visé à l'article 7.2 supra.

ARTICLE 13. ASSURANCES

Chaque Partie, devra, en tant que de besoin souscrire auprès d'une compagnie notoirement solvable et maintenir en cours de validité les polices d'assurance nécessaires pour garantir les éventuels dommages aux biens ou aux personnes qui pourraient survenir dans le cadre de l'exécution de la Convention.

ARTICLE 14. FORCE MAJEURE

Aucune Partie n'est responsable de la non-exécution totale ou partielle même temporaire de ses obligations provoquées par un événement constitutif de force majeure au sens de l'article 1218 du Code civil et de la jurisprudence.

À titre d'exemple, constituent notamment des événements de force majeure, sans que cette liste soit exhaustive :

- Des phénomènes naturels tels que les tornades, inondations, ouragans, tremblements de terre, éruptions volcaniques ;
- La présence d'un virus qualifié de pandémie par les autorités ;
- La présence d'une épidémie ayant atteint le stade 3 (Plan national de prévention et de lutte « pandémie grippale » n°850/SGDSN/PSE/PSN d'octobre 2011) ;
- Le maintien partiel ou total du confinement ou de l'état d'urgence sanitaire ordonné par les autorités et se prolongeant au-delà d'un délai d'un (1) mois ;
- L'utilisation par un État ou un groupe terroriste d'armes de toute nature perturbant la continuité des relations commerciales ;
- Des mouvements sociaux d'ampleur nationale.

Les événements ci-dessus pouvant avoir lieu sur tout territoire sur lequel l'exécution de la Convention aurait lieu.

La Partie invoquant un événement constitutif de force majeure doit en aviser l'autre Partie dans les sept (7) jours suivant la survenance de cet événement. Elle devra préciser la nature du ou des événements visés, leur impact sur sa capacité à remplir ses obligations telles que prévues à la Convention ainsi que fournir tout document justificatif attestant de la réalité du cas de force majeure.

Sont considérés comme documents justificatifs notamment mais pas exclusivement toute déclaration, attestation, législation, décret, arrêté ou autres mesures prises par une personne morale de droit public au niveau local, national ou international concernant les événements invoqués comme situations de force majeure.

Dans l'hypothèse où la Partie invoquant une situation de force majeure parviendrait à la caractériser, ses obligations seront suspendues pour un délai maximum de quatre (4) semaines. Toute suspension d'exécution de la Convention par application du présent article sera strictement limitée aux engagements dont les circonstances de force majeure auront empêché l'exécution et à la période durant laquelle les circonstances de force majeure auront agi.

En tout état de cause, les Parties s'efforceront de bonne foi de prendre toutes mesures raisonnablement possibles en vue de poursuivre l'exécution des prestations.

Passé le délai de suspension des obligations, si la situation de force majeure se poursuit, la Convention pourra être résiliée par l'une ou l'autre des Parties.

ARTICLE 15. DONNÉES À CARACTÈRE PERSONNEL

Lorsque les Parties sont amenées dans le cadre de l'exécution de la Convention à traiter des données à caractère personnel, elles se conformeront au règlement général sur la protection des données (RGPD – règlement UE 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016). Elles collaboreront de bonne foi à cette fin, dans le cadre de l'exécution de la Convention.

Les Parties n'encourront aucune responsabilité contractuelle au titre de la Convention, dans la mesure où le respect du RGPD les empêcherait d'exécuter l'une de leurs obligations au titre de la Convention.

ARTICLE 16. RÉSILIATION

En cas de non-respect par l'une ou l'autre des Parties d'une obligation inscrite dans la Convention, celle-ci pourra être résiliée de plein droit par la partie victime de ce non-respect à l'expiration d'un délai de trois (3) mois suivant l'envoi d'une lettre recommandée avec accusé de réception valant mise en demeure. La Convention pourra également être résiliée pour un motif d'intérêt général, conformément aux dispositions du 5° de l'article L. 6 du Code de la commande publique ; lorsque l'une ou l'autre des Parties est, au cours de l'exécution du marché, placée dans l'un des cas d'exclusion mentionné aux articles L. 2141-1 à L. 2141-11 du Code de la commande publique ; ou lorsqu'un marché n'aurait pas dû être attribué à un opérateur économique en raison d'un manquement grave aux obligations prévues par le droit de l'Union européenne en matière de marchés qui a été reconnu par la Cour de justice de l'Union européenne dans le cadre de la procédure prévue à l'article 258 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne.

L'exercice de cette faculté de résiliation est non rétroactif, ne produit d'effet que pour l'avenir et ne dispense pas la Partie défaillante de remplir les obligations contractées jusqu'à la date de prise d'effet de la résiliation et ce, sous réserve des dommages éventuellement subis par la Partie plaignante du fait de la résiliation anticipée de la présente Convention.

En cas de résiliation anticipée de la Convention, le BRGM présentera au SMABI un compte rendu détaillé et un bilan financier sur la base desquels le SMABI versera au BRGM les sommes dues au prorata des actions qui auront effectivement été réalisées.

ARTICLE 17. DROIT APPLICABLE ET RÈGLEMENT DES LITIGES

La Convention est régie par la loi française.

Tout différend portant sur la validité, l'interprétation et/ou l'exécution de la Convention fera l'objet d'un règlement amiable entre les Parties dans les conditions fixées par les chapitres Ier et II du titre II du livre IV du Code des relations entre le public et l'administration. En cas d'impossibilité pour les Parties de parvenir à un accord amiable dans un délai de trois (3) semaines suivant sa notification, le différend sera soumis aux tribunaux administratifs compétents.



Pour le BRGM

Catherine LAGNEAU
Présidente Directrice Générale

Fait à Mont Saint Aignan, en deux (2) exemplaires,
Le 20 décembre 2024

Pour le SMABI

Signé électroniquement par : Marcel SAPOWICZ
Date de signature : 19/05/2025
Qualité : Président(e) du SMABI



ANNEXE 1



MORITO

MOdèle mathématique 3D de gestion des **R**essources en eau et
évaluation de l'**I**mpact du changement climatique dans le bassin versant
de l'**i**TO

Version du 29/11/2024

Table des matières de l'Annexe 1

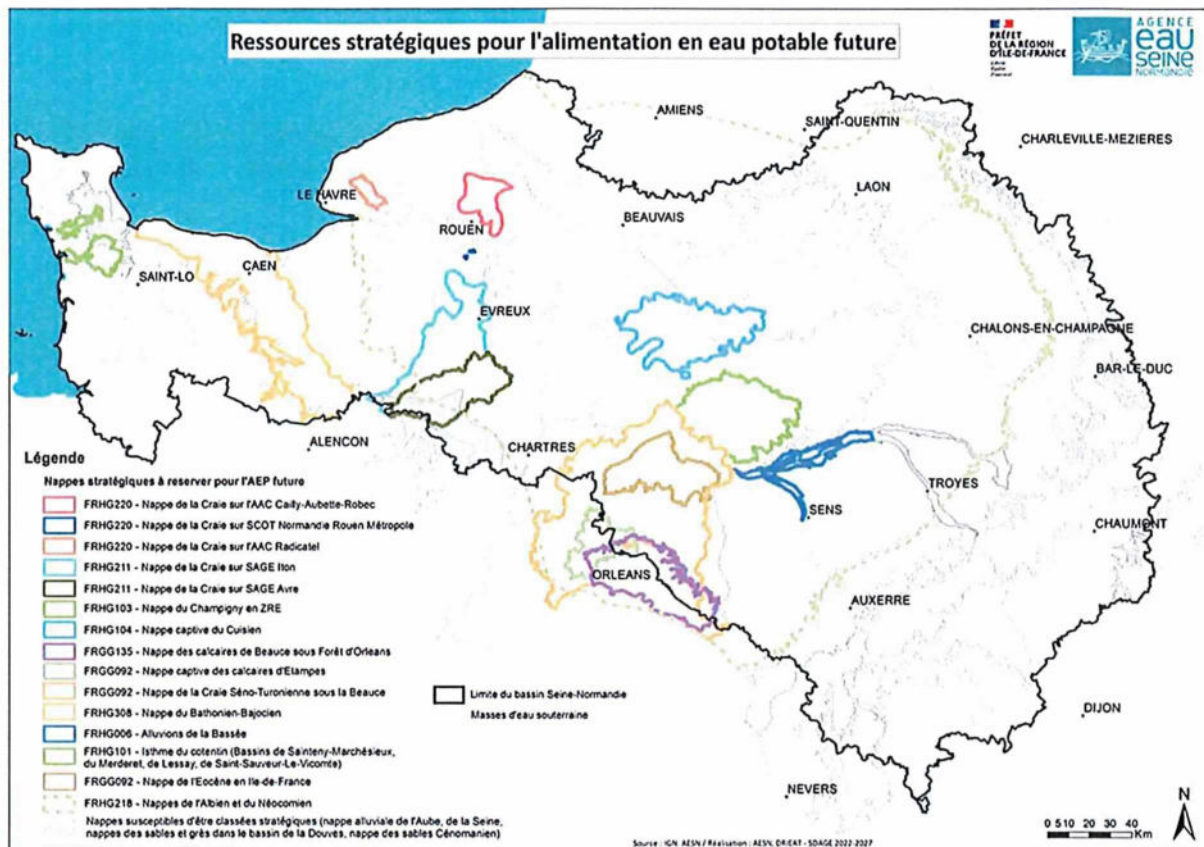
1 CONTEXTE ET OBJECTIF GENERAL DE RECHERCHE	13
1.1 Contexte et enjeu	13
1.2 Objectif général de recherche.....	13
2 POSITIONNEMENT PAR RAPPORT A L'ÉTAT DES CONNAISSANCES ET L'ETAT DE L'ART. QUESTIONNEMENTS SCIENTIFIQUES EN LIEN AVEC LES PROBLEMATIQUES DU TERRITOIRE	14
2.1 Connaissance géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Iton	14
2.2 Changement de schéma conceptuel pour la Craie : abandon d'un schéma d'un aquifère homogène et prise en compte de l'hydrostratification	17
2.3 Modélisation spatialisée de l'aquifère de la craie.....	22
3 OBJECTIFS SPECIFIQUES (OS).....	24
4 PROGRAMME SCIENTIFIQUE (PT).....	25
4.1 Description générale et emprise de la zone d'étude	25
4.2 Description détaillée.....	28
5 ORGANISATION ET REALISATION DU PROJET	43
5.1 Chronogramme	43
5.2 Réunions	46
5.3 Livrables.....	46
6 BIBLIOGRAPHIE.....	46

1 CONTEXTE ET OBJECTIF GENERAL DE RECHERCHE

1.1 Contexte et enjeu

Créé au 1er janvier 2019, le Syndicat Mixte d'Aménagement du Bassin de l'Iton intervient dans le cadre de la compétence Gestion des Milieux aquatiques et de la Prévention des Inondations (GEMAPI) et le portage du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE ITON).

Le territoire du SAGE de l'Iton a été classé « ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable future » par le SDAGE Seine-Normandie (Figure 1).



Carte 20 - Ressources stratégiques pour l'alimentation en eau potable future

Figure 1 : Ressources stratégiques pour l'alimentation en eau potable future (SDAGE AESN), le SAGE de l'Iton FRHG211 est en bleu clair

Soucieux de pouvoir continuer à satisfaire leurs besoins en eau potable à long terme, et face aux pressions croissantes sur la ressource en eau, le SAGE de l'Iton porté par le SMABI souhaite élaborer et mettre en œuvre un modèle de gestion quantitative des hydrosystèmes incluant la représentation des échanges nappes-rivières, de l'ensemble du bassin versant de l'Iton afin de pouvoir, d'une part, gérer de manière durable les ressources en eau captées et d'autre part, protéger celles-ci face aux pressions de l'activité humaine tout en garantissant le développement socio-économique du territoire.

1.2 Objectif général de recherche

L'objectif général de ce projet de recherche et développement est de mettre en place un **modèle hydrodynamique numérique de l'hydrosystème de l'Iton** afin d'évaluer l'impact du **changement climatique** sur les ressources en eaux et de permettre à terme une **gestion**

active de la ressource respectant des objectifs environnementaux définis par le SAGE. La mise en place de cet outil (modèle hydrogéologique 3D) impose de mieux contraindre le fonctionnement de cet hydrosystème d'un point de vue quantitatif (géométrie et structure du réservoir, quantification et qualification de son fonctionnement) mais aussi d'évaluer des potentiels effets de la pression de prélèvements en termes de qualité des eaux notamment. L'originalité du projet réside donc dans la prise en compte d'un volet qualité qui ne peut être dissocié des aspects quantitatifs. Au préalable seront mises en œuvre des investigations de terrains minimum pointées par l'étude de synthèse de 2016 (BRGM/RP-65618-FR) (cf. §0) et indispensables à la caractérisation du fonctionnement de l'hydrosystème de l'Iton (géométrie et structure du réservoir, quantification et qualification de son fonctionnement).

2 POSITIONNEMENT PAR RAPPORT A L'ÉTAT DES CONNAISSANCES ET L'ÉTAT DE L'ART. QUESTIONNEMENTS SCIENTIFIQUES EN LIEN AVEC LES PROBLÉMATIQUES DU TERRITOIRE

2.1 Connaissance géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Iton

L'étude de synthèse de ce bassin versant réalisée en 2016 (BRGM/RP-65618-FR) a établi un état des lieux des connaissances, en a pointé les limites et a recommandé des compléments d'études nécessaires à la compréhension de son fonctionnement et à l'établissement d'un schéma conceptuel préalable à sa modélisation.

Contexte structural : cette synthèse a mis en évidence (1) que les failles représentées sur les cartes géologiques au 1/50 000 ne sont pas ou peu caractérisées en termes de rejet notamment et (2) que beaucoup d'autres failles sont supposées existantes mais que peu ont été reconnues à l'affleurement et représentées par les géologues. L'étude conclut que des investigations complémentaires sont nécessaires pour comprendre la structure générale du réservoir aquifère du bassin versant.

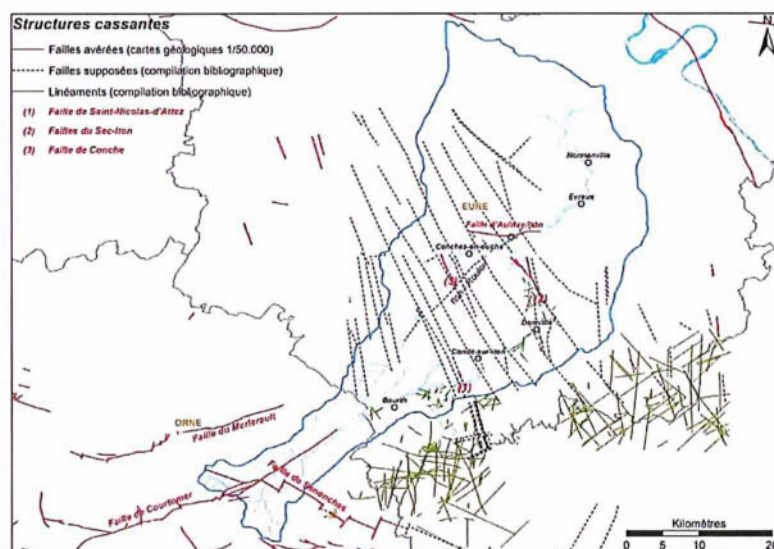


Figure 2 : Contexte structural du BV de l'Iton (BRGM/RP-65618-FR)

Contexte hydrogéologique : l'étude a identifié les différents aquifères en présence (nappe des sables du perche, nappe de la craie) et a réalisé un bilan des paramètres hydrodynamiques connus. Un travail de synthèse a également été réalisé sur les sources classées en 4 groupes géographiques (1- amont du bassin ; 2- secteur de Gaudreville / La-

bonneville ; 3- sources du Rouloir ; 4- secteur de Brosville / Hondouville) et a pointé une connaissance lacunaire de leur fonctionnement et de leur aire d'alimentation notamment. Aucune de ces sources ne fait l'objet d'un suivi des débits en continu, ce qui limite la connaissance du fonctionnement de ces systèmes karstiques. Certaines de ces sources sont les résurgences de systèmes karstiques encore non investiguées (en termes de traçages notamment). On peut noter en particulier : les sources du Rouloir (dont la connexion avec la rivière du Lème située plus à l'amont dans le même talweg, n'a jamais été testée par traçage), les résurgences du système karstique du sec-Iton (sources de la fosse aux dames et de la forge), les résurgences du système karstique à Brosville et enfin la résurgence du système karstique développé sous le Roumois dont la source d'Hondouville (débit moyen de 1m³/s environ) serait l'un des exutoires. Ce dernier système karstique est très peu connu. Des traçages seraient nécessaires pour mieux le définir.

Limite du bassin versant hydrogéologique de l'Iton : l'étude a montré que le BV hydrogéologique était encore mal défini dans plusieurs secteurs, notamment du fait (1) de l'imprécision au niveau des cartes piézométriques existantes (établies à une échelle régionale) et (2) des connexions karstiques interbassins à confirmer.

Des incertitudes fortes ont notamment été mises à jour parmi lesquelles on peut citer :

- l'existence ou non d'un dôme piézométrique jouant le rôle de limite entre le bassin versant de l'Iton et de l'Eure (secteur de Normanville) ;
- l'existence ou non d'un dôme piézométrique jouant le rôle de limite entre le bassin versant de l'Iton et de l'Avre (secteur de Breteuil-Verneuil).

Ces incertitudes doivent être levées avant la mise en place d'un modèle hydrodynamique. Concernant la limite hydrogéologique entre l'Iton et l'Avre à l'amont, des premières investigations ont montré que ce dôme serait présent en hautes eaux et absent en basses eaux. La mise en place d'un suivi en continu en forage des niveaux d'eau est toutefois nécessaire.

La synthèse hydrologique a établi le fonctionnement hydraulique très particulier et complexe de cette rivière et de son affluent Lème/Rouloir, découpée en différents tronçons avec des relations nappe/ri vière qui s'inversent d'un tronçon à l'autre. Les spécificités des cours d'eau de ce bassin versant ont été synthétisées et notamment un focus a été mené sur le fonctionnement du bras forcé de Verneuil qui dérive une partie du débit de l'Iton vers l'Avre (Figure 3). Le fonctionnement de ce bras forcé est très mal connu car il n'existe pas, à l'heure actuelle, de suivi en continu de son débit. De même le débit de l'Iton à l'aval du bassin versant avec la confluence avec l'Eure n'est aujourd'hui pas connu. La mise en place d'un suivi en continu (Iton à l'aval et l'export de débit de la rivière en dehors du bassin versant (bras forcé) est un prérequis indispensable à la mise en place d'une gestion quantitative de la ressource.

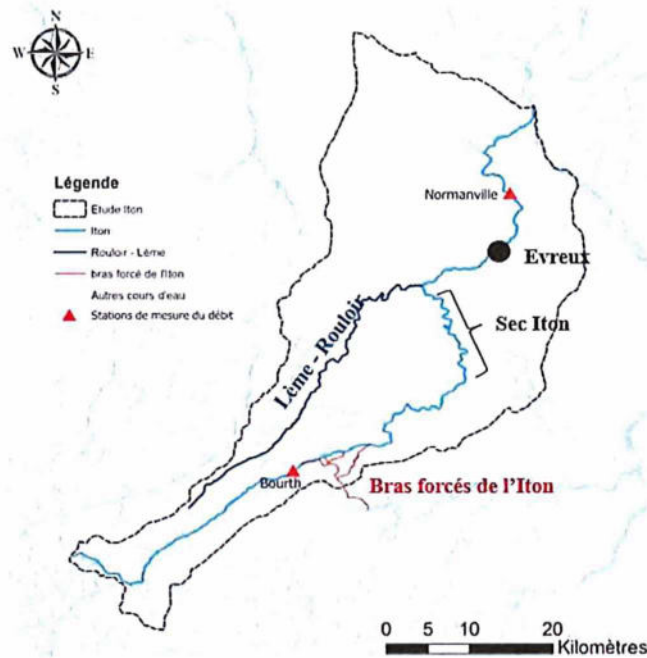


Figure 3 : Présentation du réseau hydrographique du bassin versant de l'Iton

La synthèse des données sur le karst a montré que le bassin versant de l'Iton était karstifié sur l'ensemble du bassin versant mais que certains secteurs l'étaient plus intensément (secteur du sec-Iton, Lème, aval d'Évreux-Brosville, ...). Le fonctionnement du karst semble notamment contrôler le régime hydrologique de la rivière. Une étude du rôle du karst sur les crues de l'Iton est notamment en cours de réalisation par le BRGM dans le cadre d'un partenariat avec la DDTM27 (date de fin prévue 2025-2026).

La synthèse a montré qu'aucun schéma explicatif de karstogénèse n'a été établi pour ce bassin versant et les écoulements préférentiels au sein de l'aquifère ne sont aujourd'hui pas encore connus (cf. § 0)

Un diagnostic hydrogéochimique du bassin versant a été réalisé avec un zoom sur la question des Nitrates. Ce diagnostic a montré que la nappe était très vulnérable aux pollutions de surface, en particulier à celles causées par l'activité agricole. Les eaux souterraines présentent généralement à l'échelle du bassin des teneurs plus élevées que les eaux de surface, en particulier en nitrates et pesticides, et sont devenues, en raison de la grande vulnérabilité aux pollutions de surface, liée au contexte géologique karstique, un réservoir de polluants (dont des pesticides qui n'ont plus d'usages autorisés). En conséquence, l'alimentation de l'Iton par les eaux souterraines, en particulier en étiage, entraîne la pollution des eaux de surface par les eaux souterraines.

Toutefois, de faibles teneurs en nitrates dans les eaux souterraines dans certains secteurs à l'amont du bassin versant de l'Iton sont observées. Le premier diagnostic réalisé à partir des données existantes suggère l'existence de probables **processus d'autoépuration par dénitrification** qui pourraient être un facteur expliquant ces plus faibles teneurs. Ces processus doivent être confirmés par des investigations de terrain afin d'une part de confirmer leur existence et d'autre part de voir quelles sont les situations favorables. **Dans un contexte de mise en place d'une gestion quantitative de la ressource, ces processus de dénitrification naturelle pourraient être considérés à terme comme un objectif environnemental à préserver (du fait des potentiels impacts sur la qualité des masses d'eau, sur les écosystèmes associés voire la production d'eau potable).**

2.2 Changement de schéma conceptuel pour la Craie : abandon d'un schéma d'un aquifère homogène et prise en compte de l'hydrostratification

« The chalk Revolution » (Révolution de la Craie) en Angleterre

« The chalk Revolution » (Révolution de la Craie) est le terme utilisé par Andrew R. Farrant du British Geological Survey (BGS) lors du colloque de l'hydrogéologie de la craie en 2018 au Havre pour parler de l'adoption d'une nouvelle stratigraphie unifiée de la craie pour le sud de l'Angleterre (Bristow et al., 1997). Cette dernière se base sur la subdivision de la craie en neuf formations (Rawson et al., 2001 ; Hopson 2005) (Figure 4) et ne considère plus la craie comme un ensemble homogène et isotrope uniquement distingué par des âges biostratigraphiques (étages géologiques). Chacune de ces formations a des propriétés hydrogéologiques et géomécaniques distinctes. En Angleterre, ces neuf formations sont subdivisées en unités, nommées « membres » et « lits ». Ces « lits » (aussi nommés « niveaux repères ») sont des discontinuités lithologiques principalement constituées des niveaux marneux, des hardgrounds et des lits de silex (Figure 4). Ils constituent des hétérogénéités à l'intérieur des sédiments crayeux, en termes de texture, de porosité et de densité (Saiag et al., 2019). Ces niveaux repères sont connus pour affecter l'écoulement des eaux souterraines, à la fois dans les zones saturées et non saturées (Price 1987 ; Buckley et al. 1989 ; Lowe 1992 ; Mortimore 1993 ; Bloomfield et al. 2003 ; Gallagher et al. 2012). En effet :

- Nombre de niveaux repères constituent des niveaux d'« inception » du karst et constituent donc des horizons d'écoulement préférentiels des eaux souterraines dans les zones saturées et non saturées (Downing et al., 1993 ; Catt, 2010 ; Gallagher et al., 2012 ; Gaillard et al. 2018, Gaillard et al. 2023) ;
- D'autres niveaux peu perméables (banc marneux et hardgrounds) (Howden et al. 2004 ; Butler et al. 2012) peuvent représenter à l'inverse des niveaux de blocage des écoulements pouvant ainsi compartimenter l'aquifère et délimiter des unités hydrogéologiques distinctes (Karapanos, 2021).

Stage Southern England stratigraphy

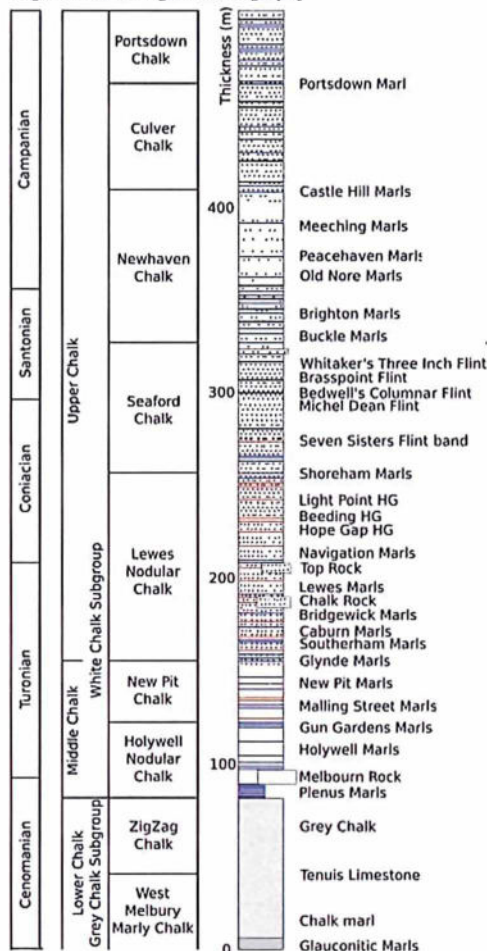


Figure 4 : Découpage lithostratigraphique de la craie du Sud de l'Angleterre : (à gauche) les différentes formations de craie ; (à droite) les principaux niveaux repères (discontinuités lithologiques : hardgrounds, niveaux marneux et principaux bancs de silex) identifiés. Ces niveaux-repères sont des horizons potentiel d'inception du karst. De nombreuses autres discontinuités plus petites et non nommées ne sont pas représentées (Farrant et al., 2023)

En Angleterre, ces niveaux repères sont dorénavant recensés dans le cadre du référentiel géologique de la craie. Dans le cadre d'études locales, les nouveaux forages réalisés sont aujourd'hui caractérisés par une combinaison de diagraphies géophysiques afin de déterminer les niveaux repères en présence et leur profondeur, de tenter une corrélation de ces niveaux repère par bassin versant et ainsi caractériser l'hétérogénéité de l'aquifère (Maurice et al. 2012).

Importance de ce changement de paradigme sur la gestion de la ressource en eau et la mise en place des volumes prélevables

L'identification de ces niveaux d'inception (horizons de karstogénèse) et des niveaux peu perméables compartimentant l'aquifère (hydrostratification) (Figure 5) revêt une importance particulière pour la connaissance du fonctionnement de l'aquifère et donc pour sa gestion (Karapanos et al., 2021 ; Marsili et al., 2022).

En effet il peut exister différentes unités aquifères au sein de l'aquifère de la craie (Karapanos et al., 2021; Marsili et al., 2022). Leurs identifications et caractérisation revêt une importance majeure pour la gestion quantitative (évaluation des impacts des prélèvements en eaux souterraines sur le débit des rivières notamment) de la ressource en eau craie (Karapanos et al., 2021).

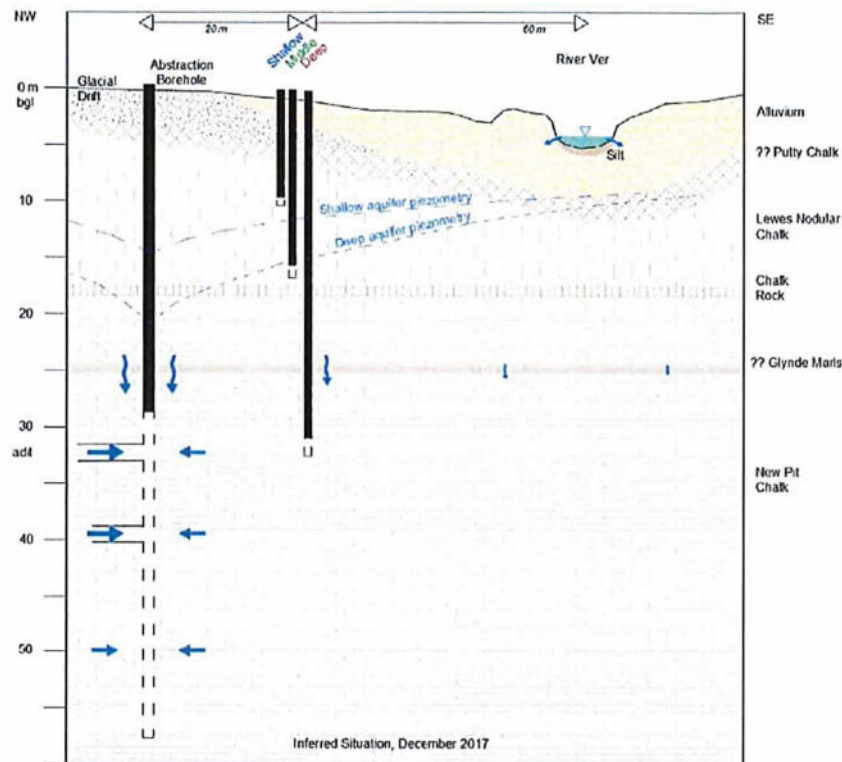


Fig. 3. Schematic diagram for case study 1.

Figure 5 : Hydrostratification de l'aquifère de la craie dans le bassin versant de la rivière Colne, Angleterre ; Cas d'étude n°1 (Karapanos, 2021)

Karapanos et al. (2021) indiquent que l'hypothèse d'une approche uniforme d'un aquifère monocouche est susceptible de conduire à une simplification excessive des propriétés hydrogéologiques de la craie. Cette hypothèse augmente l'incertitude des résultats du modèle hydrodynamique et réduit la confiance dans l'utilisation de cet outil pour l'aide à la décision (Karapanos et al. 2021). Il est donc nécessaire de mieux comprendre la relation entre l'écoulement des eaux souterraines et l'hétérogénéité lithologique de l'aquifère (délimitation des **unités hydrostratigraphiques distinctes au sein de la craie**). Cela permet d'améliorer le modèle conceptuel du système hydrogéologique, ce qui conduit à une meilleure délimitation des bassins versants hydrogéologiques (Ballestros et al., 2020) et à une prise de décision plus efficace et durable permettant de mieux évaluer les bénéfices des réductions des prélèvements (Karapanos et al., 2021).

Le réseau piézométrique national anglais a d'ailleurs évolué dans ce sens puisqu'il intègre désormais sur certains sites, la mise en place de piézomètres en flûte de pans (évolution d'un suivi piézométrique 2D vers un suivi 3D) (Farrell et al., 2023).

Vers un changement de paradigme en France également ?

En France, le déploiement de cette approche lithostratigraphique de la craie est également ancienne en géologie mais demeure encore très limité voire embryonnaire en hydrogéologie. En effet, côté géologie, le découpage en différentes formations de la craie normande a été finalisé par E. Lasseur dès 2007 (Lasseur E., 2007) (Figure 6).

Toutefois, contrairement à l'Angleterre, les cartes géologiques de la craie en France n'ont pas encore été reprises selon ce nouveau découpage.

Des avancées importantes ont été menées par le BRGM ces dernières années concernant la reconnaissance de ces formations de craie par méthodes géophysiques et ont notamment

abouti à une clé d'interprétation robuste définissant la signature électrique des principales formations de craie de Normandie (Portal et al., 2020 ; Meire et al., 2019). Un modèle géologique 3D dans le secteur de la Métropole de Rouen Normandie / SBVCAR a même permis de distinguer six formations de craie (Meire et al., 2022).

Ces formations de craie restent toutefois encore insuffisamment caractérisées du point de vue des propriétés matricielles, géomécanique (fracturation) et de distribution de la karstification et *in fine* hydrogéologique (paramètres hydrodynamiques, hydrostratification, ...).

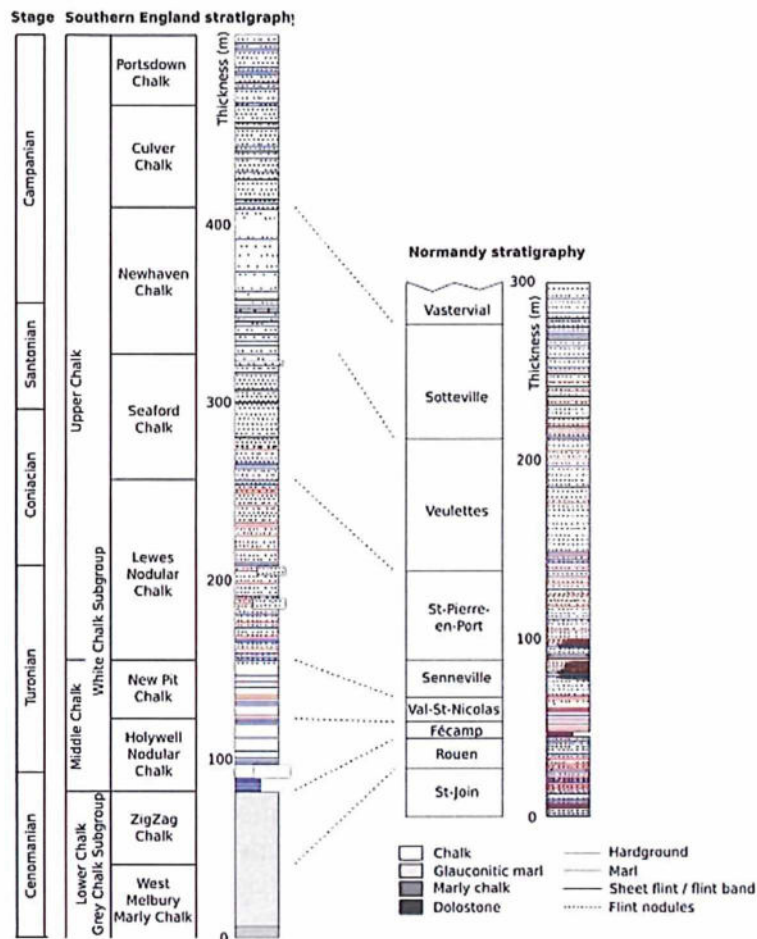


Figure 6 : Découpage lithostratigraphique de la craie : comparaison du découpage dans le Sud de l'Angleterre (à gauche) et en Normandie (à droite) (Farrant et al., 2023 modifié)

Toutefois, comme en Angleterre, à notre connaissance un exemple d'hydrostratification de l'aquifère de la craie est observé en Normandie : des forages en flûtes de pans installés sur le champ captant de Fumeçons dans l'Eure ont mis en évidence une compartimentation hydrostratigraphique de l'aquifère de la craie avec des niveaux piézométriques et une qualité des eaux distincts au sein de ces unités notamment en condition de pompage (Baran et al., 2023). La compréhension et la délimitation des différentes unités hydrostratigraphiques est donc un enjeu fort et une bonne connaissance des niveaux repères en est la clé.

S'il est vrai qu'en Angleterre ces niveaux repères sont bien identifiés et caractérisés au sein d'un référentiel géologique et hydrogéologique (Hopson, 2005), il n'en reste pas moins que la mise en place d'un tel référentiel est complexe car même si certains niveaux repères sont reconnaissables sur de grandes distances (Bromley et Gale, 1982), la majorité d'entre eux n'ont qu'une étendue très locale, et nécessitent une connaissance fine secteur par secteur.

En France, il n'existe pas de référentiel de ces horizons d'inception. Toutefois, quelques études locales ont commencé à les recenser et concernent essentiellement la pointe de Caux et la vallée de la Seine (e.g. Lasseur 2007 ; Hoyez, 2008 ; Ballesteros et al., 2020 ; Farrant et al., 2022 ; Gaillard et al., 2018) secteurs où les falaises donnent accès au massif rocheux. David (2023) a compilé ces différentes publications pour dresser un premier état des lieux des horizons d'inception connus en Normandie (Figure 7). La grande difficulté de la mise en place d'un tel référentiel est que, du fait des géométries sédimentaires, beaucoup de ces horizons n'ont qu'une emprise locale et ne peuvent pas être corrélés sur de longues distances. Cette compilation montre (1) à quel point l'existence de discontinuités favorise la localisation des conduits karstiques (2) qu'il existe de très nombreuses hétérogénéités lithologiques dans la craie du Pays de Caux et donc beaucoup de niveaux d'inception potentiels.



Figure 7 : Synthèse des horizons d'inception identifiés en Normandie (David, 2024)

Par ailleurs, la présence de ces hétérogénéités n'est toujours pas prise en compte dans les études hydrogéologiques de la craie en France qui considèrent encore la craie comme un milieu homogène et isotrope.

Une seule étude hydrogéologique ayant pris en compte ces niveaux-repères pour définir les différents unités aquifères (lithostratification) peut être citée pour la Normandie (Gaillard et al. 2023). Cette étude a été rendue possible du fait de la présence des Falaises littorales dans ce secteur, facilitant les observations de terrain.

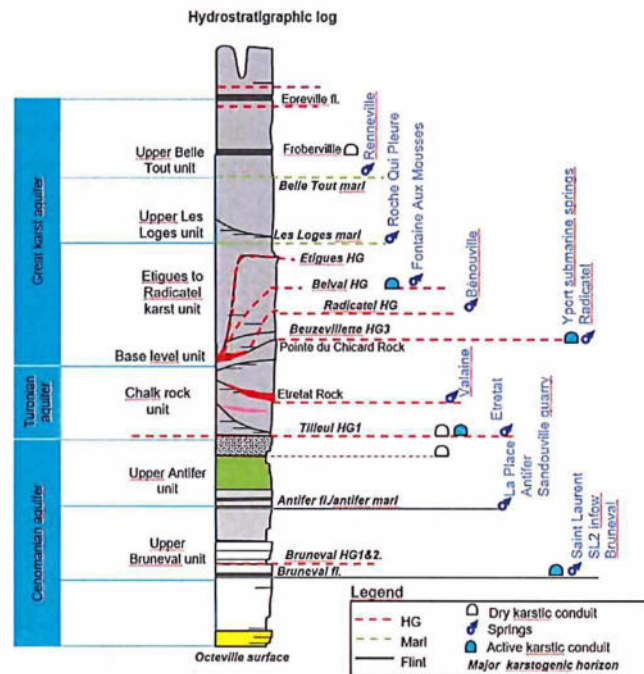


Figure 8 : Nouveau modèle d'unités hydrostratigraphiques de la craie de la Pointe de Caux (Gaillard et al. 2023)

2.3 Modélisation spatialisée de l'aquifère de la craie

Différents travaux de modélisation spatialisée de la nappe de la craie, à l'échelle régionale, sont entrepris depuis plusieurs années par le BRGM :

- Le modèle du bassin de la Somme, initialement développé dans le cadre du projet de recherche franco-britannique FLOOD-1, **visant à estimer la contribution des eaux souterraines aux crues de la Somme** (Amraoui et al., 2002). Ce modèle, actualisé et consolidé au fil des années (Amraoui et al., 2004 ; Amraoui et al., 2012, Arnaud, 2015 ; Arnaud, 2017a ; Arnaud et al., 2019), a été repris à partir de 2014 pour s'intéresser à la **gestion des étiages et à l'estimation des volumes prélevables** dans le cadre de deux conventions de R&D partagés (Amraoui et al., 2014b ; Arnaud, 2017b) ;
- Le modèle de la nappe de la craie du Nord-Pas-de-Calais, développé avec le concours de la Métropole Européenne de Lille (MEL), de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et de la DREAL dans le cadre d'une convention de R&D partagés (Buscarlet et al., 2011). L'objectif était de mettre à disposition des différents organismes en charge de l'alimentation en eau potable un **outil d'aide à la décision dans l'élaboration d'une stratégie de gestion de la ressource en eau des six masses d'eau** sollicitées. Ce modèle a été affiné au niveau des champs captants alimentant en eau potable la métropole lilloise (Bessière et al., 2015) ;
- Le modèle du bassin de l'Avre (Eure), élaboré en partenariat avec l'Agence de l'Eau Seine Normandie, la DREAL de Haute-Normandie et Eau de Paris, toujours dans le cadre d'une convention de R&D partagée. L'objectif était d'élaborer des **règles de gestion volumique de la ressource en eau prenant en compte l'analyse des usages et l'impact sur les milieux naturels** (David et al, 2012 ; David et al., 2014). Il est important de souligner que ce modèle se juxtaposera au futur modèle de l'Eure-et-

Loir. Le BRGM pourra ainsi s'appuyer sur certains résultats (modèle géologique, flux d'eau échangés en limite de bassin versant).

En complément, il faut noter que plusieurs projets de modélisation de la nappe de la craie sont en cours en Normandie et région Centre : modèle de la Métropole Rouen Normandie et du SAGE Cailly-Aubette-Robec, modèle du SAGE du Commerce, modèle de la nappe de la craie entre Perche et Beauce.

Nous pouvons également citer les nombreux travaux de Mines ParisTech sur la modélisation des écoulements souterrains et des relations nappe-rivières à l'échelle régionale, dans le Bassin parisien (Saleh et al., 2010 ; Ledoux et al., 1989 ; Gallois et al., 2021).

Il ressort de ces différents travaux la nécessité de mobiliser des codes de calcul permettant (1) la modélisation explicite du réseau hydrographique, (2) l'intégration du calcul des pluies efficaces et d'estimer la partition ruissellement / infiltration et (3) de tendre vers l'intégration à terme des hétérogénéités au sein du massif crayeux guidant les écoulements préférentiels afin d'être en mesure de simuler également les sources karstiques (cf. §2.2 précédant).

- (1) La modélisation explicite du réseau hydrographique, associée au calcul des pluies efficaces par le modèle, avec partition entre ruissellement et infiltration, constitue en effet la meilleure approche pour modéliser les systèmes aquifères connectés à des cours d'eau tel que celui de la craie. Elle offre en outre l'avantage de permettre un double calage hydrodynamique, sur les chroniques piézométriques et sur les débits enregistrés aux stations hydrométriques ;
- (2) La recharge est l'un des paramètres clés du bilan hydrologique et, elle peut représenter un guide précieux dans l'estimation des ressources mobilisables, en particulier pour les aquifères à nappe libre. L'estimation de la recharge est un problème complexe dépendant de nombreux facteurs : météorologie, pédologie, couverture végétale, géomorphologie (pente, rugosité, ...) et propriétés hydrodynamiques des formations géologiques en jeu. Aussi, un travail en amont de la modélisation hydrogéologique est nécessaire pour contraindre et répondre à la nécessité de spatialiser le calcul de la recharge. Dans la continuité des nombreux travaux récemment conduits par le BRGM sur le sujet (Seguin, 2016 ; Caballero et al., 2016 ; Arnaud et al., 2017c ; Le Cointe et al., 2019 ; Lanini, 2020 ; David, 2024), l'étude de la recharge doit être poursuivie en croisant différentes méthodes. L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR), développé par le BRGM (Pinson et al., à paraître) doit notamment être valorisé pour déterminer des zones de recharge homogène, zones qui seront ensuite intégrées dans le modèle hydrodynamique.

Par ailleurs, dans le cas d'un système aquifère multicouche et fortement faillé comme c'est le cas de l'hydrosystème étudié, situé à la transition entre le domaine crayeux et sables du Perche, il est indispensable d'utiliser un modeleur géologique 3D afin de définir la géométrie des différents aquifères et aquitards du domaine modélisé. Ce travail préalable permet de disposer d'une représentation numérique fidèle et cohérente de la structure géologique : empilement de formations plus ou moins perméables, d'extensions variables et souvent recoupées par des accidents structuraux, générateurs de discontinuités dans les écoulements. Le modèle géologique est ensuite exporté vers le modèle d'écoulement pour en constituer l'ossature.

3 OBJECTIFS SPECIFIQUES (OS)

Au vu de l'état de l'art et des connaissances et des questions scientifiques dressés précédemment (§0) et pour atteindre l'objectif général (§1.2), les objectifs spécifiques de « MORITO », concernent :

1. La compréhension du rôle de la géologie dans le contrôle des écoulements au sein de l'aquifère de la craie.

- **OS1.1** : Améliorer la connaissance des hétérogénéités géologiques, lithologiques et structurales du réservoir aquifère qui conditionnent les écoulements des eaux souterraines
- **OS1.2** Améliorer la compréhension du développement du karst au sein du réservoir aquifère et notamment de comprendre le rôle des niveaux-repères (=hétérogénéités lithologiques - hardground, niveau marneux, lits de silex) sur les écoulements (niveaux d'inception générant des écoulements préférentiels des eaux souterraines dans le BV, compartimentant l'aquifère -hydrostratification-).

2. La Caractérisation hydrogéologique et hydrogéochimique de l'hydrosystème

Elle implique de :

- **OS2.1** Définir les limites du bassin versant hydrogéologique de l'Iton dans l'espace et dans le temps :
 - Caractérisation des échanges karstiques interbassins,
 - Caractérisation des crêtes piézométrique entre l'Iton et l'Eure et L'Iton et l'Avre
- **OS2.2** Définir certaines relations ESU/ESOU encore non déterminées (exemple : devenir des pertes du Lème ?)
- **OS2.3** Caractériser les processus naturels de dénitrification pré-identifiés dans l'étude de 2016 et évaluer leur vulnérabilité vis-à-vis des impacts éventuels liés aux prélèvements
- **OS 2.4** Acquérir des premières connaissances sur la karstogénèse du BV de l'Iton avec l'étude de 2 sites de référence (Sec-Iton et Brosville)
- **OS2.5** Acquérir les données quantitatives nécessaires au calage d'un modèle hydrodynamique maillé et notamment les données de prélèvements et de rejets. Plus la connaissance des données de prélèvements en eau de surface et en eau souterraine sera précise, plus la fiabilité du futur modèle de gestion et la pertinence des résultats des scénarios prospectifs sera importante. Il est donc primordial de tendre vers un inventaire exhaustif des volumes prélevés et des volumes restitués pour aboutir à une gestion fine des ressources en eau.
- **OS2.6** Acquérir des données complémentaires indispensables au calage du modèle maillé (suivi piézométrique et débitmétrique)

3. De mettre en place un modèle géologique 3D pérenne qui servira de socle pour l'amélioration future des connaissances du réservoir aquifère de l'Iton

- **OS3.1** Un modèle géologique calé sur le nouveau découpage lithostratigraphique de la craie normande (Lasseur, 2007)
- **OS3.2** Un modèle géologique qui intègre la complexité structurale du bassin de l'Iton

4. De mettre en place un modèle hydrogéologique 3D pérenne capable de reproduire la complexité des écoulements de ce bassin versant :

- **OS 4.1** Intégrant les géométries des formations de craie définies par le modèle géologique 3D
 - **OS 4.2** Intégrant une réflexion sur la caractérisation et la cartographie des conditions d'infiltration afin d'optimiser au mieux la spatialisation de la recharge,
5. De réaliser une première exploitation de ce modèle hydrodynamique afin :
- D'évaluer la pression des prélèvements sur les milieux aquatiques
 - D'évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de ce bassin versant

4 PROGRAMME SCIENTIFIQUE (PT)

4.1 Description générale et emprise de la zone d'étude

Le projet MORITO est organisé en 4 programmes de travail (PT 1 à 4) qui doivent permettre sur une durée de quatre années d'atteindre les objectifs de recherche :

PT1 : Collecte et acquisition des données nécessaires

PT2 : Construction du modèle géologique 3D

PT3 : Construction du modèle hydrogéologique 3D

PT4 : Exploitation du modèle.

L'organisation de ces 4 programmes de travail est présentée sur le synoptique (Figure 9) qui distingue les tâches qui seraient confiées :

- à des bureaux d'études /entreprises via des marchés publics portés par la collectivité avec l'appui technique et scientifique du BRGM, par souci d'optimisation financière et des délais de production ;
- au BRGM sous contrôle de la collectivité.

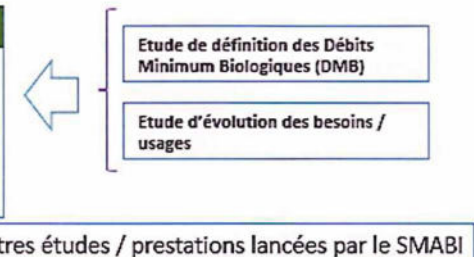
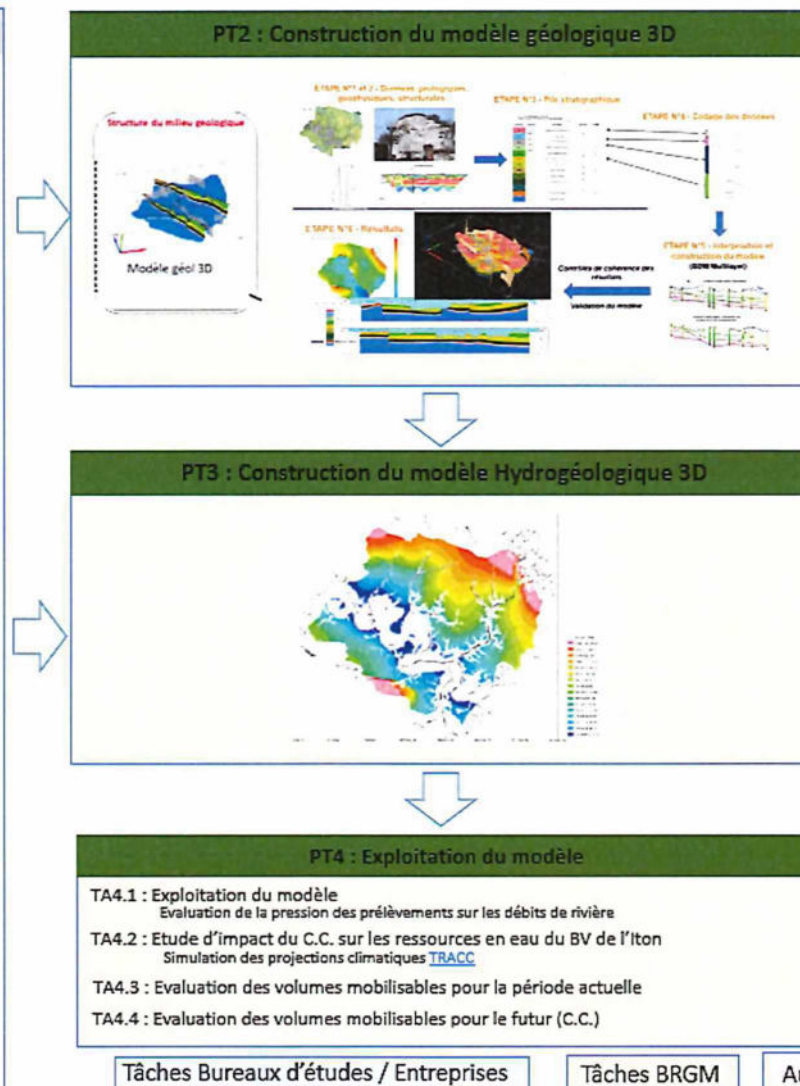
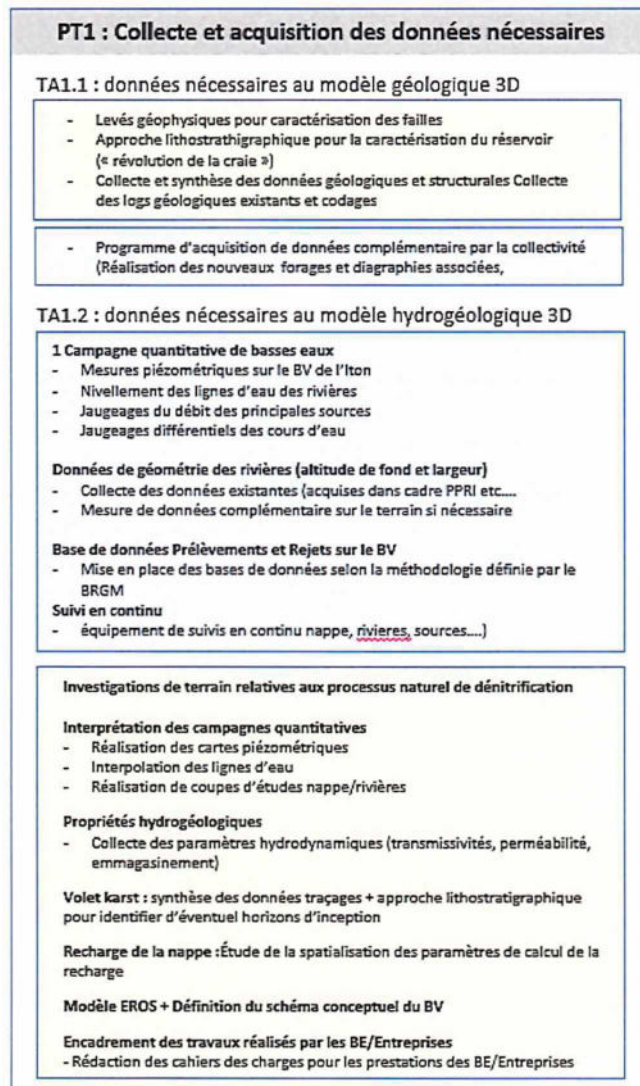


Figure 9 : Synoptique du programme de travail proposé

4.2 Description détaillée

Les programmes de travaux sont divisés en tâches (TA) comme suit :

PT1 - Collecte et acquisition des données nécessaires

TA1.1 : Collecte et acquisition des données nécessaires au modèle géologique 3D

Cette tâche 1 du PT1 vise à collecter les données existantes et acquérir les données manquantes nécessaires à la construction d'un modèle géologique en 3D du BV de l'Iton.

Parmi les nouvelles données géologiques à acquérir afin de combler les lacunes de connaissance, sont proposées en première approche :

- **Géophysique aéroportée (EM) (option privilégiée pour la géophysique) : sur la base de 200km d'acquisition** (en lien avec OS1.1)

La résistivité d'une roche dépend de sa nature, de son degré d'altération, de sa porosité et de la quantité de fluide qu'elle contient, et de la nature de ce fluide. Ainsi, les contrastes de résistivité imagés par la géophysique peuvent être interprétés en termes de localisation des réservoirs, d'altération et de variations de faciès ; les couches conductrices étant classiquement plus argileuses et les formations résistantes plus sableuses ou calcaires.

Les méthodes électriques ont déjà fait leurs preuves sur la craie normande (cf. Annexe2). L'expérience acquise par le BRGM ces 10 dernières années sur les méthodes électriques a notamment conduit à l'élaboration d'une clé d'interprétation des contrastes de résistivité permettant d'identifier les différents faciès de craie (Portal et al. 2020)

La méthode électromagnétique héliportée permet de couvrir de manière homogène de vastes territoires grâce à l'acquisition rapide de coupes de résistivité du sous-sol au droit des lignes de vol. L'imagerie obtenue renseigne classiquement les 200 à 400 premiers mètres du sous-sol. Par rapport à une acquisition de résistivité au sol, la résolution en EM héliporté est plus faible ; la résolution verticale est de l'ordre de 3-5 m en surface et diminue avec la profondeur et la résolution latérale est de l'ordre de 30 m environ le long d'une ligne de vol. Elle reste cependant pertinente pour caractériser les hydrosystèmes sur un territoire important, dans la mesure où sa mise en œuvre est rapide, sans contraintes de terrain et avec un coût environ 25 fois moindre.

Dans le cas du BV de l'Iton, l'électromagnétisme héliporté paraît tout à fait pertinent. En effet, la synthèse géologique de 2016 (David et al., 2016) a mis en évidence un nombre important de failles connues et /ou supposées sur la partie centrale du BV avec notamment un nœud structural dans le secteur de la confluence Rouloir-Sec-Iton-La Bonneville. Pour lever ces incertitudes et comprendre le schéma structural d'ensemble, un grand nombre de profils sont nécessaires et la géophysique terrestre devient alors trop coûteuse. La géophysique aéroportée permettra i) d'apporter des contraintes sur les géométries des horizons, et notamment les niveaux de craie (données utilisables ensuite pour caler le modèle géologique 3D, ii) de valider ou non les failles supposées iii) de caractériser le jeu et la géométrie des failles connues et supposées.

Le levé, totalisant 200 km linéaires, permettra de couvrir une zone telle que présentée ci-après :

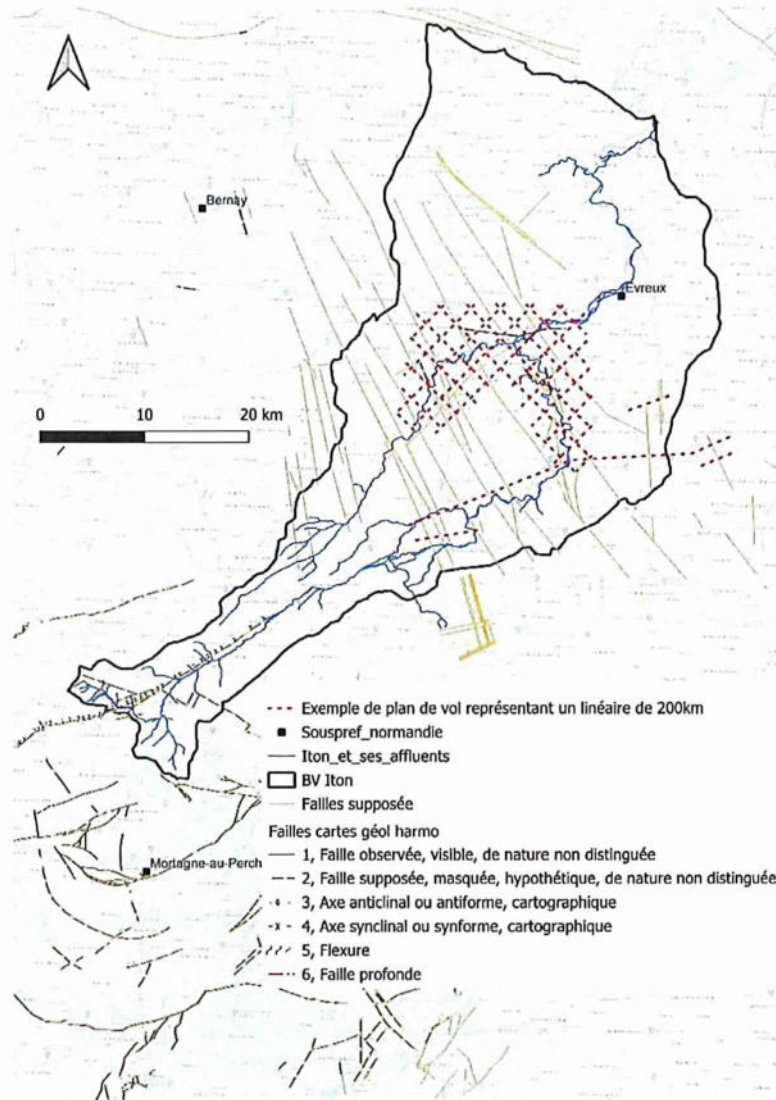


Figure 10 : Couverture envisagée pour l'EM héliportée (hachurés rouge) avec une acquisition plus fine au droit du nœud structural du bassin de l'Iton, représentant un linéaire de 200km

- **Géophysique (option de repli) réinterprétation des données anciennes et acquisition géophysique électrique terrestre** (en lien avec OS1.1)

Dans le cas où la géophysique aéroportée ne serait pas possible (AO infructueux par exemple), le budget alloué sera utilisé pour réaliser :

- Exploiter les données de la base de données gravimétriques du BRGM

Au titre du Code Minier, le BRGM inventorie et compile les données gravimétriques acquises sur le territoire national. Ces données sont validées, harmonisées et archivées dans la BGF (Banque Gravimétrique de la France) – (Martelet et al., 2009). Les données de la BGF seront extraites sur et au pourtour du BV de l'Iton. Les données seront ensuite retraitées, harmonisées (mise en forme et en cohérence des levés récents et des données anciennes) puis interpolées pour générer des cartes gravimétriques (anomalie de Bouguer, gradient vertical de l'anomalie de Bouguer, tilt derivative de l'anomalie de Bouguer). Une fois ces cartes établies, une interprétation structurale gravimétrique sera réalisée afin de mettre en évidence les discontinuités gravimétriques et proposer un schéma structural sur la base de ces résultats.

- Réaliser des profils géophysiques électriques (ERT) terrestres classiques

En complément du retraitement des données existantes (données sismiques anciennes et base gravimétrique) quelques profils électriques terrestres (ERT) seront réalisés dans la limite du budget alloué.

- **Réalisation de 2 forages transformés en piézomètres** (en lien avec OS1.1 ; OS1.2 ; OS2.1 ; OS2.4)

Deux forages seront réalisés et ont été optimisés en terme de localisation afin de répondre à un maximum d'objectifs spécifiques du projet : OS1.1 ; OS1.2 ; OS2.1 ; OS2.4.

Un forage sera réalisé sur la plateau situé entre l'Eure et l'Iton et fera l'objet d'une caractérisation haute résolution du réservoir et des écoulements (par une combinaison de diagraphies idoinées). Ce forage fera par la suite l'objet d'un suivi en continu (niveau, conductivité, température) sur deux cycles hydrologiques afin de tester l'hypothèse de l'absence de dôme piézométrique entre la rivière de l'Eure et celle de l'Iton.

Un forage dans le sec-Iton sera également réalisé sur le site du captage AEP abandonné de Sainte-Cécile (site à forte intensité karstique avec karst étagé reconnu). Il fera également l'objet d'une caractérisation haute résolution du réservoir et des écoulements (par une combinaison de diagraphies).

Ces deux forages seront interprétés dans le cadre du déploiement de l'approche lithostratigraphique et de la compréhension de la karstogénèse du BV de l'Iton (cf. état de l'art)

- **Réalisation de diagraphies sur les deux forages réalisés** (en lien avec OS1.2 ; OS2.1 ; OS2.4)

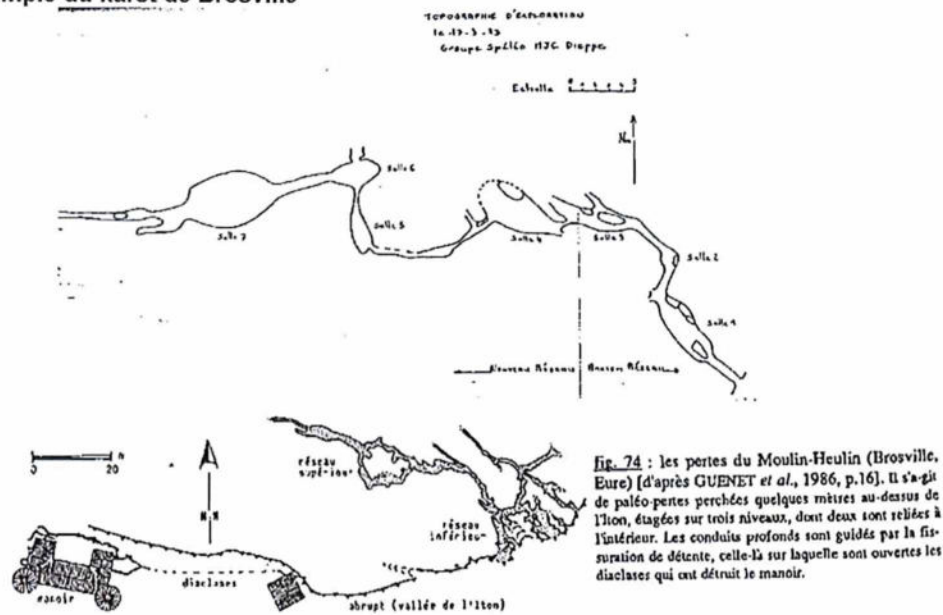
La caractérisation haute résolution du réservoir et des écoulements évoqués précédemment sera réalisée par un couplage de plusieurs Diagraphies (DIA) de forages qui pourront être : Gamma-Ray, Conductivité par induction, Résistivité focalisé, imagerie de paroi, densité et porosité, micromoulinet etc....

Le rôle des discontinuités lithologiques (niveaux marneux, hardground, lits de silex) sur les écoulements préférentiels et la karstification sera en particulier étudiée. Des corrélations avec les galeries karstiques connues sur deux sites seront en particulier tentées (Figure 11).

- **Première analyse de la karstogénèse du BV de l'Iton** (en lien avec OS1.2 et OS2.4)

Des experts karstologues viendront en appui au projet afin d'apporter des éléments de compréhension au système karstique de l'ITON sur son fonctionnement actuel. À partir des nouvelles acquisitions de terrain et des observations sur affleurement, les résultats de l'étude seront interrogés et comparés aux modèles de karstogénèse réalisés sur la vallée du Cailly avec pour objectif d'affiner la compréhension du karst de la craie, notamment en termes d'hétérogénéités spatiales.

Exemple du karst de Brosville



(a)



(b)

Figure 11 : Karsts reconnus à proximité des 2 forages envisagés : (a) karst étagé de Brosville, cartographié par les spéléologues de Dieppe ; (b) Effondrement karstique sous le « moulin de Février » en 2018 (à proximité du site du forage n°2 envisagé)

TA1.2 : Collecte et acquisition des données nécessaires au modèle hydrogéologique 3D

Cette tâche 2 du PT1 vise à collecter les données existantes et acquérir les données manquantes nécessaires à la construction d'un modèle hydrogéologique en 3D du BV de l'Iton.

- **Investigations visant à caractériser les éventuels processus de dénitrification naturels** (répondant à l'OS2.3)

L'examen des teneurs en nitrate dans les eaux souterraines à l'échelle du bassin montre l'existence de teneurs particulièrement faibles dans le secteur de Bourth bien qu'une pression agricole (de type grandes cultures) existe (David et al., 2016). L'hypothèse d'une atténuation de la contamination par des processus de dénitrification peut être avancée mais doit être vérifiée. Si le processus existe, il convient aussi de bien caractériser les conditions qui le favorisent. Pour cela, plusieurs investigations seront réalisées : investigations de terrain avec une acquisition *in situ* dans les règles de l'art des paramètres tels que la teneur en oxygène et le potentiel Redox. Des analyses chimiques en laboratoire permettront également de caractériser le milieu pour des paramètres (teneurs en fer, en sulfate etc.) qui sont de bons indicateurs de l'existence potentielle de processus. Même si les conditions favorables à la dénitrification existent, il convient de vérifier que le processus est bien actif et si possible de le quantifier. Pour cela, la détermination des signatures isotopiques de l'oxygène et de l'azote des nitrates sera réalisée pour différents points d'eau. Pour contraindre les interprétations, ces signatures seront également déterminées dans les eaux collectées au niveau de drains agricoles, ces eaux étant considérées comme représentatives de l'eau qui s'infiltre jusqu'à la nappe. En fonction de l'évolution des conditions (notamment niveau piézométrique), plusieurs campagnes seront réalisées pour apprécier la relation aspect hydrodynamique - qualité de l'eau - processus de dénitrification. Sur quelques échantillons (en contextes hydrodynamiques différents), une approche microbiologique et de biologie moléculaire (cf. BRGM/RP-69499-FR) sera réalisée pour identifier la présence de gènes spécifiques de ce processus et évaluer son évolution en fonction des conditions de milieu (par exemple oxygénation en lien avec les fluctuations piézométriques).

- **Mise en œuvre d'une campagne quantitative sur le BV de l'Iton** (en lien avec OS2.6)

La réalisation d'une campagne de mesures quantitatives de basses eaux (mesure des niveaux des nappes, des lignes d'eau des rivières, jaugeages différentiels des cours d'eau) sera menée. Ces acquisitions seront réalisées par un bureau d'études (sous maîtrise d'ouvrage du SMABI) et par le service hydrométrie de la DREAL (sous réserve de leur disponibilité). Leur objectif est le calage du modèle hydrogéologique. L'interprétation de ces campagnes via l'établissement de cartes piézométriques du BV de l'Iton, des profils nappe-rivières (caractérisation des échanges) sera réalisée par le BRGM.

- **Mesure de la géométrie des cours d'eau** (en lien avec OS2.6)

Les données des géométries des rivières (largeur, altitude du fond du lit) seront collectées auprès des PPRI existants notamment. Si ces données sont insuffisantes, des mesures sur le terrain seront réalisées par un bureau d'études (sous maîtrise d'ouvrage du SMABI) ou en régie par le SMABI.

- **Collecte et bancarisation des données des paramètres hydrodynamiques** (en lien avec OS2.6)

Les données des paramètres hydrodynamiques (transmissivités, perméabilité, emmagasinement) seront collectées et bancarisées à partir de la consultation des rapports d'études hydrogéologiques du secteur. Ce travail sera réalisé par le BRGM.

- **Collecte des données de prélèvement et rejet**

La connaissance des prélèvements en nappe et en rivière est cruciale pour la gestion durable des ressources en eau, mais elle est souvent limitée par des données incomplètes ou peu précises. Les prélèvements anthropiques et les interactions nappe-rivière nécessitent une meilleure caractérisation pour être intégrés de manière fiable dans les modèles.

La mise en œuvre de ces bases de données sera confiée à un bureau d'études (sous maîtrise d'ouvrage du SMABI).

- **La collecte et la mise en forme des données hydrologiques et météorologiques** (en lien avec OS2.6) :

- Débits de rivières (données de suivis en continu et jaugeages volants)
- Niveaux des nappes (données de suivis en continu et mesures ponctuelles)
- Données météo (aux stations, et données SAFRAN, ERA5)

- **Mis en place d'un réseau de suivi en continu des débits/niveaux** (en lien avec OS2.6)

La mise en place de suivis en continu et niveaux des nappes sera réalisée par un bureau d'études (sous maîtrise d'ouvrage du SMABI).

Deux stations débitmétriques seront mises en place sur l'Iton (bras forcé de l'Iton et Iton à l'amont immédiat de sa confluence avec l'Eure).

Un réseau piézométrique complémentaire au réseau BRGM et composé de 5 points sera mis en place sur une durée minimum de deux années.

- **L'étude, calcul et spatialisation de la recharge de la nappe sur la BV de l'Iton** (en lien avec OS4.2)

L'étude de la recharge sera poursuivie en croisant différentes méthodes. L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR), développé par le BRGM (Mardhel et al., 2021) sera notamment valorisé pour déterminer des zones de recharge homogène, zones qui seront ensuite intégrées dans le modèle hydrodynamique. En complément, un modèle EROS de l'Iton et son affluent (Rouloir) pour prédéterminer et sectoriser les paramètres de calcul de la recharge (répartition ruissellement/infiltration ; temps demi-percolation ...). Il s'appuiera sur les stations de débits disponibles notamment les nouvelles mises en place dans le cadre de l'étude « crue Iton » (BRGM/DDTM27/DREAL).

- **Synthèse des données acquises et définition d'un schéma conceptuel** préalable à la modélisation 3D.

Le BRGM synthétisera l'ensemble des données géologiques et hydrogéologiques existantes et acquises afin de mettre à jour le schéma conceptuel du fonctionnement de ce bassin versant.

Concernant les prestations confiées aux bureaux d'études, le BRGM accompagnera le SMABI dans la rédaction de la partie technique des cahiers des charges afin de s'assurer que les données soient produites selon une méthodologie permettant l'exploitation des données compatibles avec les objectifs de l'étude (cf. TA1.3 ci-dessous).

TA1.3 : : Passation des marchés et suivi des travaux (forages/piézomètres, diagraphie du TA1.1, campagnes de multitraçage, campagnes quantitative et bases de données prélèvements-rejets du TA1.2

a) Identification de l'implantation des piézomètres

Le SMABI se chargera en collaboration avec le BRGM d'identifier le site d'implantation des deux forages à réaliser et de demander les autorisations nécessaires à son implantation.

b) Dossiers réglementaires, DICT, dossiers loi sur l'eau

Le SMABI se chargera de la réalisation de l'ensemble des dossiers réglementaires, DICT, Dossiers loi sur l'eau, concernant les 2 ouvrages à implanter.

c) Rédaction des documents techniques nécessaires au lancement des appels d'offres

Le BRGM rédigera les cahiers des charges techniques (CCTP) pour la réalisation :

- des 2 forages/piézomètres ;
- des diagraphies ;
- des 2 campagnes de multitraçages ;
- de la campagne quantitative ;
- de la constitution des bases de données prélèvements-rejets.

Le SMABI se chargera de l'ensemble des procédures d'appel d'offres y afférant.

d) Appréciation technique des offres

Le SMABI se chargera de l'appréciation technique des offres des 5 marchés (forages, diagraphie, campagne quantitative, multitraçage, bases de données). Le BRGM fournira au SMABI une appréciation technique des offres.

e) Assistance technique et scientifique pour le suivi des travaux

Le BRGM assistera le SMABI dans le suivi des travaux concernant la foration des 2 piézomètres et se rendra sur place lors des campagnes de diagraphie.

PT2 – Construction du modèle géologique 3D (en lien avec OS3)

La nature, la géométrie, la structure et la relation spatiale des différentes formations géologiques - aquifères ou non - sont portées par le modèle géologique 3D (multicouches). C'est la raison pour laquelle, le modèle géologique constitue un élément déterminant pour ce qui concerne le niveau de performance et la robustesse du modèle hydrodynamique à partir duquel ce dernier est bâti.

La modélisation géologique consiste à valoriser au mieux, à l'échelle du domaine d'étude, les données et connaissances issues de différentes sources d'informations, telles que : les cartes géologiques harmonisées au 1/50 000 et notices associées, les modèles numériques de terrain (MNT), les investigations géophysiques, les diagraphies et les logs géologiques de sondages, et plus généralement la bibliographie (Cf. principe de modélisation, Figure 12).

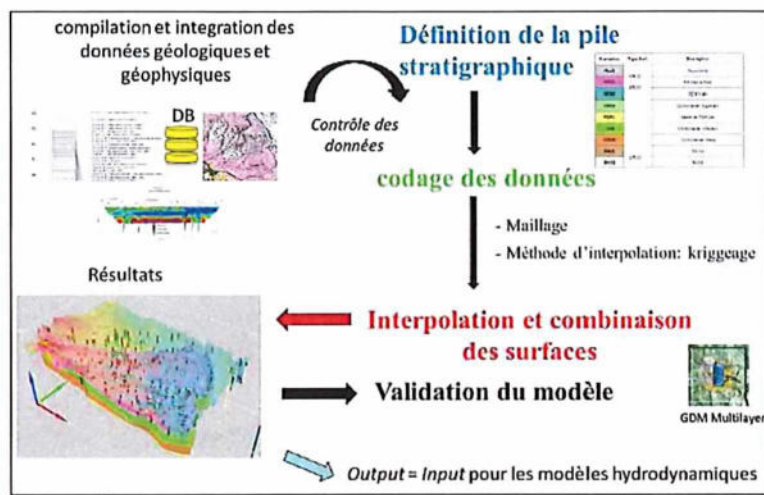


Figure 12 : Principe de modélisation avec GDM-Multilayer

La construction du modèle géologique est basée sur quatre étapes distinctes mais liées : (1) définition d'une pile litho-stratigraphique décrivant la succession des formations et les relations entre deux formations successives, (2) interprétation des données et codage des différentes formations géologiques selon le cadre fourni par la pile préalablement définie, (3) intégration du schéma structural après sélection d'un jeu de failles et (4) interpolation des surfaces (interfaces entre couches).

Le modèle géologique 3D s'attachera à modéliser la géométrie des grands faciès de craie.

PT3 – Construction du modèle hydrogéologique 3D (en lien avec OS4)

Le PT3 est dédié à la construction du modèle hydrodynamique de gestion et à le rendre aussi conforme que possible à la réalité qu'il représentera. Il sera bâti sur la base du modèle géologique construit dans le cadre du PT2 ci-dessus.

Le travail dans ce volet se présente en 4 étapes successives :

- Élaboration d'un modèle conceptuel d'écoulement dans l'hydro-système ;
- Structuration du modèle hydrodynamique et initialisation ;
- Calage du modèle ;
- Analyse des résultats.

Le code de calcul retenu pour réaliser le modèle hydrodynamique sera MARTHE, capable de simuler à la fois les écoulements superficiels et souterrains, ainsi que les échanges de flux entre les deux, ce qui est nécessaire pour pouvoir représenter le fonctionnement de l'hydro-

système. MARTHE (Modélisation d'Aquifères avec un maillage Rectangulaire, Transport et HydrodynamiquE) est un code de calcul développé par le BRGM depuis plus de 30 ans, et constamment enrichi en fonction des problématiques abordées.

Ce logiciel, fondé sur la méthode des différences finies, et plutôt même des volumes finis, est un code très complet qui permettra de traiter la complexité du système aquifère ou de l'hydro-système qui nous concerne, et de répondre aux enjeux de l'étude (recherche de nouvelles ressources, gestion quantitative, volumes prélevables, entraînement des pollutions, zones d'appel d'un captage, préservation des zones humides, etc.). Parmi ces fonctionnalités figurent les suivantes :

- représentation des différentes couches litho-stratigraphiques identifiées (biseautage possible) ;
- représentation des réseaux hydrographiques (rivières, étangs) par une modélisation explicite ;
- quantification des échanges avec l'atmosphère (pluie, évapotranspiration) avec le calcul d'un bilan hydroclimatique intégré ;
- prise en compte d'une anisotropie horizontale (liée aux variations latérales de faciès) et/ou verticale des perméabilités ;
- calcul des charges aux puits en fonction du diamètre de l'ouvrage par rapport à la dimension de la maille ;
- possibilité d'affiner localement le maillage par des sous-maillages emboîtés (maillages gigognes) pour une représentation plus précise de certains secteurs d'intérêt : champs captant, réseau hydrographique, sources, etc. ;
- possibilité d'intégrer un système de réseaux de drains totalement couplé au système aquifère pour représenter le réseau karstique. Le transport de masse est également couplé directement entre le système aquifère et les drains ;
- possibilité de modifier n'importe quelle donnée maillée à chaque pas de temps de calcul : charge hydraulique, débit de pompage, pluie, évapotranspiration potentielle, recharge, perméabilité, porosité, colmatage des berges des cours d'eau, extension du réseau hydrographique, cote topographique, imposition ou libération de charges imposées ;
- simulation du transfert de masse en régime permanent ou transitoire, intégralement couplé au calcul hydrodynamique des charges ou des pressions, y compris dans le cas où ces écoulements dépendent d'un gradient de densité ou d'un gradient thermique (plusieurs méthodes de calcul possibles).

Afin d'obtenir un modèle représentant au mieux le fonctionnement de l'hydro-système, il convient de structurer le modèle en fonction et en intégrant les données pertinentes relatives :

- au contexte géologique et structural découlant du modèle géologique 3D (multicouches) ;
- au contexte topographique et morphologique du domaine d'étude à l'aide du Modèle Numérique de Terrain ;
- aux caractéristiques du réseau hydrographique (largeur des cours d'eau, cotes de la surface libre et du fond de la rivière, ...) ;
- aux principales hétérogénéités du sous-sol, reconnues ou supposées, telles que les zones semi-perméables ou zones de drainage de faible perméabilité (horizons aquitards ou structures drainantes), les barrières imperméables (horizons ou couches aquicludes), les anisotropies éventuelles induites par des discontinuités sédimentologiques, les failles, etc. ;
- aux débits et durées d'exploitation des ouvrages de captage ;
- aux rejets ;
- etc.

Le modèle hydrodynamique sera ainsi découpé sur le plan vertical selon la structure du modèle géologique établi dans le PT2, conformément à la géométrie réelle des couches, à leur extension géographique et à leur positionnement dans l'espace 3D. Une simplification du modèle géologique en combinant certaines couches (ex. celles qui ne font pas l'objet de chevauchement) pourra toutefois avoir lieu au préalable si jugée utile et sans impact significatif pour la précision du modèle par rapport aux objectifs à atteindre.

Sur le plan horizontal, l'espace sera découpé en espaces discrets appelés « mailles ». Ces mailles seront carrées et de taille variable en fonction des besoins. En effet, la taille des mailles adoptée pour le modèle sera fonction de la densité de données disponibles et de la nécessaire finesse de représentation du territoire dans certains secteurs (dictée par la géologie ou par les enjeux). Les tailles des mailles du modèle résulteront d'un compromis entre le temps de calcul, la précision attendue et les données disponibles. Elles seront définies à l'issue de l'élaboration du modèle conceptuel, en fonction des simulations à venir.

La modélisation explicite du réseau hydrographique, associée au calcul des pluies efficaces par le modèle, avec partition entre ruissellement et infiltration, constitue la meilleure approche pour modéliser les systèmes aquifères connectés à des cours d'eau.

Le modèle une fois construit et structuré, sera initialisé à l'aide des différents jeux de données qui auront préalablement été mis en forme et structurés selon les formats imposés. A cet effet, chaque paramètre de calcul fera l'objet d'une première distribution spatiale de ses valeurs dans l'espace tridimensionnel, qui sera ensuite introduite dans le modèle. Ce travail portera notamment sur les données concernant les paramètres hydrodynamiques, la recharge, le réseau hydrographique, les prélèvements, les rejets.

Calage du modèle

Le calage d'un modèle est classiquement conduit en deux phases : une première phase **en régime hydraulique permanent** qui a pour objectif d'obtenir un premier réglage du modèle, sur une situation d'étiage à l'équilibre ; cette première phase de l'ajustement du modèle servira surtout à établir une configuration générale moyenne des écoulements souterrains et de surface.

Le vrai processus de calage du modèle se déroulera essentiellement **en régime hydraulique transitoire** (avec éventuellement des retours au régime permanent). Il consistera à reproduire au mieux les historiques de niveaux piézométriques et de débits observés, et permettra ainsi d'ajuster les paramètres liés au temps et à l'aspect « réservoir » du système aquifère, et plus généralement de l'ensemble de l'hydro-système.

Dans le cas d'un modèle spatialisé, les paramètres à ajuster sont notamment les paramètres descriptifs du milieu hydrogéologique (perméabilités et coefficients d'emménagement des formations aquifères, des aquitards et aquicludes, perméabilité du lit des cours d'eau, ...), ainsi que ceux simulant la recharge par les précipitations et ceux liés aux processus opérant aux limites (ex : flux ou potentiels imposés). Ces informations ne sont en effet connues que ponctuellement, sur certains points dans l'espace, et le calage du modèle a pour mission d'en proposer une distribution spatiale exhaustive, dans l'espace tridimensionnel où dans chacune des couches du modèle. Pour faciliter cette opération, des zones homogènes peuvent être prédéfinies sur la base de l'analyse hydrogéologique préalable, et/ou être progressivement constituées en cours de calage grâce à l'approfondissement des réflexions et à l'amélioration des connaissances qui accompagne toujours cette phase de travail.

En régime transitoire, le modèle sera calé avec un pas de temps de calcul a priori mensuel et sur une période suffisamment longue (20 ans minimum) pour prendre en compte les principales situations, moyennes et extrêmes, connues du système aquifère.

L'échelle de temps peut être découplée entre le modèle hydro-climatique, pour lequel le pas de temps pourrait par exemple être journalier, et le modèle hydrodynamique qui fonctionnerait avec un pas de temps mensuel.

Les opérations de calage du modèle seront guidées et cadrées à l'aide des données de contrôle qui auront pu être observées et mesurées sur le terrain durant la période retenue pour le calage, et qui sont en général de deux sortes :

- 1- Des niveaux piézométriques ponctuels, le débit ponctuel des rivières à différents endroits, celui des sources, ;
- 2- Des historiques et chroniques de données pour ces mêmes paramètres.

Il est à noter que la précision du modèle sera inégale sur l'ensemble de la zone modélisée, compte tenu de la différence dans la densité et la nature des données disponibles. Le calage dépendra de la quantité et de la qualité des données existantes, d'où l'importance des huit chroniques courtes qu'il est proposé d'acquérir dans le cadre du PT1 de l'étude.

Une nouvelle approche de calage pourra par ailleurs être testée (calage paramétrique). La possibilité de mise en œuvre de ce calage paramétrique dépendra du temps de calcul du modèle une fois construit (le temps doit être relativement court). Le calage paramétrique réalisé avec le module PEST (Parameter ESTimation) de l'USGS (White et al. 2020), permet l'optimisation des paramètres du modèle en ajustant ceux-ci pour minimiser les différences entre les observations et les simulations. Dans le cadre de sa thèse Ryma Aissat (Aissat, 2021) a développé une "interface de couplage" entre le modèle numérique hydrogéologique MARTHE (BRGM) et les algorithmes d'optimisation fournis par les installations PEST++ (schéma de principe, Figure 13).

Cependant, cette technique nécessite des données de haute qualité et une compréhension approfondie des processus hydrogéologiques pour éviter les sur-ajustements et garantir des prédictions fiables. Ce travail sera mené par un post-doctorant.

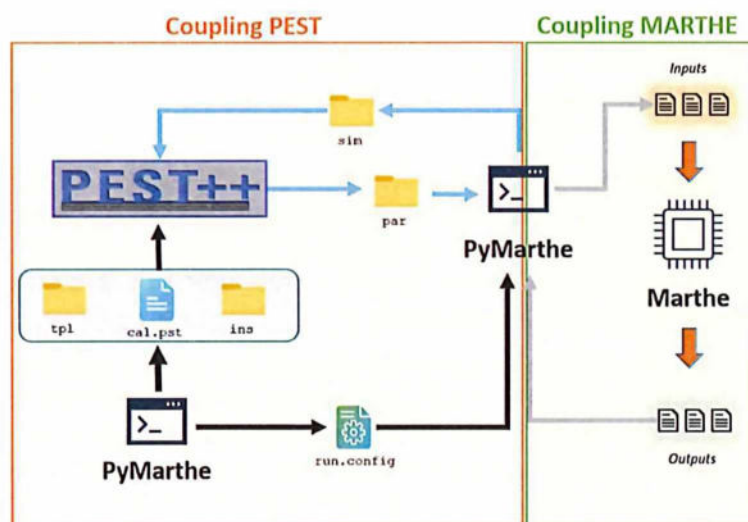


Figure 13 : Principe du couplage de PEST et MARTHE avec PyMarthe

PT4 - Exploitation du modèle

TA4.1 : Exploitation du modèle

La première exploitation du modèle sera dédiée aux ressources en eaux du BV de l'Iton et à l'étude des impacts des prélèvements sur les milieux naturels et débits des cours d'eau. Le bassin versant de l'Iton est en effet classé dans le SDAGE Seine-Normandie comme une ressource stratégique à préserver pour le futur (cf. carte n°15 du SAGE). 4 scénarii définis par le Copil seront simulés à cet effet.

TA4.2 : Étude d'impact du C.C. sur les ressources en eau du BV de l'Iton

Cette tâche TA4.2 a pour objet d'analyser l'évolution de la ressource en eau superficielle et souterraine dans le contexte du changement climatique pour estimer les tensions éventuelles à venir sur la production d'eau potable à l'horizon 2085.

Ce travail sera réalisé à l'aide du modèle MARTHE pour le territoire du SMABI.

Des projections climatiques futures les plus adaptées à la Normandie seront récupérées depuis les plateformes disponibles (<http://www.drias-climat.fr/>) et utilisées pour forcer les modèles et, ensuite, analyser leurs impacts en termes de débits sur les eaux souterraines et superficielles aux horizons 2050 et 2085.

L'analyse approfondie des résultats portera notamment sur les aspects et enjeux suivants :

- L'évolution des niveaux piézométriques des horizons aquifères, avec une précision à l'échelle des mailles pour le modèle spatialisé ;
- L'évolution des recharges ;
- L'évolution du débit des rivières ;
- Les difficultés éventuelles à prévoir à l'avenir au niveau de la production d'eau (AEP, irrigation, industries, ...), tant souterraine que de surface, à partir de la prise en compte des débits minimum biologiques et des besoins en eau envisagés.

Remarque : les projections climatiques présentant très souvent des biais pouvant être importants en comparaison du climat observé (en termes de précipitations notamment), l'analyse se fera sur l'évolution relative des débits et niveaux caractéristiques entre les situations futures et la situation présente pour chaque modèle climatique.

Cette tâche TA4.2 est divisée en 5 sous-tâches.

TA4.2.1 : Sélection des modèles climatiques disponibles et analyse des forçages climatiques

Le conseil national pour la transition écologique a doté la France d'une Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC)¹. L'objectif étant de fixer une trajectoire commune de réchauffement, qui permettra de bâtir une véritable stratégie d'adaptation. 2 scénarios de réchauffement envisagés dans ce rapport TRACC : le scénario « Accord de Paris » et un scénario Pessimiste consistant à s'adapter progressivement à un niveau de réchauffement mondial de 1,5 °C en 2030, 2 °C en 2050 et 3 °C en 2100 par rapport à l'ère pré-industrielle, soit un niveau de réchauffement pour la France métropolitaine d'environ 2 °C en 2030, 2,7 °C en 2050 et **4 °C en 2100**.

En 2024, les données climatiques disponibles sur le site DRIAS², ont été mises à jour, et un nouveau jeu de données nommé TRACC a été mis en ligne. Par rapport au jeu de données DRIAS2020 précédant, dans le nouveau jeu de données TRACC :

- Seule la projection RCP8.5 est conservée
- Passage de 12 à 17 couples GCM/RCM

a) Sous-Tâche a : Sélection des projections climatiques

Afin de prendre en compte les incertitudes inhérentes aux projections climatiques, une approche multi-modèle est indispensable. Il est convenu de travailler avec des projections climatiques issues de cinq modèles de climat. En première hypothèse de travail, cette sélection de 5 modèles climatiques sera effectuée parmi les 17 disponibles dans le jeu de données TRACC. Nous nous appuierons sur les résultats du projet EXPLORE2 pour réaliser ce sous-échantillonnage. Dans le cas où le jeu de données climatique officiel aurait évolué au moment de la mise en œuvre de cette tâche, la sélection des 5 modèles climatiques sera réalisée parmi

¹ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/document-reference-TRACC.pdf>

² <https://www.drias-climat.fr/>

le jeu de données officiel disponible au moment de l'étude et ceux proposés par le PIREN Seine et sur décision du COPIL.

b) Sous-Tâche b : Extraction des données

Les variables climatiques qui seront utilisées concerneront les précipitations liquides, les précipitations solides, la température et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Elles seront collectées par le BRGM et couvriront la période 1950-2100 au pas de temps journalier. Pour chaque projection, les variables climatiques seront utilisées comme données d'entrée du modèle MARTHE.

c) Sous-tâche c : Analyse des données

L'évolution des précipitations annuelles et de l'ETP annuelle moyenne sera présentée sur la période 1950-2050. Par ailleurs, une analyse de la variabilité saisonnière sera conduite.

Pour une meilleure lisibilité, des graphiques d'évolution des changements par rapport à une période de référence (par exemple 1991-2020 pour une vision moyenne centrée sur 2005, mais à définir par le COPIL) seront proposés. L'évolution des anomalies par rapport à la période de référence sera ensuite établie.

Pour les temps futurs et en vue de consolider l'analyse, deux périodes de référence seront retenues : 2036-2065 (pour une vision moyenne vers l'horizon 2050) et 2071 – 2100 (pour une vision moyenne vers l'horizon 2085). Il est en effet important de conduire les analyses comparatives sur des périodes d'un minimum de 30 années afin de gommer les variabilités climatiques interannuelles d'origine naturelle qui peuvent masquer le signal de changement climatique de long terme (Ouzeau et al., 2014).

Outre les projections issues des 5 modèles de climat sélectionnés, une valeur représentative des 5 modèles (médiane ; moyenne, ...) sera calculée et reportée dans l'analyse.

TA4.2.2 : Estimation des besoins en eau et des rejets jusqu'à l'horizon 2070

Cette tâche vise à prendre en compte dans les futures simulations prospectives l'effet du changement global, donc à la fois l'effet du changement climatique et celui lié aux migrations démographiques et au développement économique envisagé, en termes de prélèvements et de rejets futurs.

Deux scénarii de prélèvements seront pris en compte, qui pourraient être à titre indicatif :

- 1 scénario de prélèvements « actuels » ;
- 1 scénario de « sobriété » défini par l'AESN : -14% pour l'AEP, stabilité pour les prélèvements agricoles et -10% pour les autres usages économiques.

Toutefois ces projections des besoins en eau et des prélèvements envisagés (Eaux souterraines et de surface) seront définies en concertation étroite avec le Comité de Pilotage de l'étude pour les différents usages (AEP, Irrigation, Élevage, Industrie) jusqu'à l'horizon 2070, pour chacune des unités de gestion, afin qu'ils soient intégrés dans les modèles.

Le BRGM utilisera pour les besoins des simulations prospectives le scénario de prélèvements / rejets construit avec le COPIL et validé par celui-ci.

TA4.2.3 : Simulations sur la période 1950-2100 – scénario de référence

Afin de pouvoir œuvrer aux 2 horizons proposés, et pour également exploiter l'ensemble des données / projections climatiques disponibles à ce jour de manière à disposer d'un meilleur recul, il est proposé de lancer les simulations prospectives sur la période allant de 1950 à 2100.

Un total de 10 simulations sera réalisé en régime transitoire sur la période 1950- 2100 : 5 modèles climatiques x 1 méthode de débiaisage x 2 scénarios de prélèvements / rejets.

Le modèle fonctionnera avec un pas de temps journalier pour les calculs hydroclimatiques (calcul du ruissellement et de la recharge) et avec un pas de temps mensuel pour les écoulements souterrains.

Remarque 1 : les modèles de climat, modèles dont la grille est en général ≥ 50 km de côté, engendrent, malgré les méthodes de descente d'échelle (pour passer à l'échelle SAFRAN, 8 km de côté), des biais pouvant parfois être importants. Ces biais seront évalués dans le cadre de la tâche TA4.2.4. Ainsi, du fait de l'existence de ces biais :

1. L'analyse des résultats des simulations se fera sur l'évolution relative des débits entre les situations actuelles (et antérieures) modélisées et futures modélisées ;
2. Les interprétations se feront au mieux sur des pas de temps mensuels.

TA4.2.4 : Analyse globale des résultats - impacts modélisés du changement climatique/global sur les ressources en eau au niveau des hydrosystèmes

Dans le cadre de cette première analyse des résultats, les moyennes annuelles et mensuelles de différentes variables hydro- climatiques seront comparées par l'intermédiaire de représentations graphiques et cartographiques : les lames d'eau infiltrées et ruisselées, les niveaux piézométriques ainsi que les débits des principaux cours d'eau du système aquifère du SMABI. L'analyse sera menée de manière relative entre les 3 périodes de référence définies à la tâche TA4.2.1c (1 passée et 2 futures).

Une analyse spatiale comparative sera effectuée pour chacun de ces paramètres au niveau des unités de gestion.

À ce stade, les impacts modélisés du changement climatique sur les ressources en eau pourront d'ores et déjà être déterminés à la lumière de différentes situations hydrologiques (saisons : basses eaux, moyennes eaux, hautes eaux). En revanche, pour une étude plus approfondie, statistique, des étiages des cours d'eau, des compléments d'analyse seront nécessaires. Ils sont proposés dans la tâche TA4.2.5 ci-après.

Les analyses ci-dessus seront conduites pour les résultats issus de chaque modèle climatique ainsi que sur la médiane des 5 modèles climatiques retenus et porteront pour le modèle spatialisé sur les différentes unités de gestion définies par le SMABI.

TA4.2.5 : Analyses thématiques relatives aux étiages des cours d'eau

Cette tâche TA4.2.5 permettra d'approfondir l'analyse effectuée dans la tâche TA4.2.4 ci-dessus, au niveau des cours d'eau en période d'étiage, et cette fois dans le cadre d'une approche statistique qui permettra de mieux quantifier les dépassements ou les manquements par rapport à la réglementation en vigueur ou aux indicateurs en place.

Le même cadre de travail que celui utilisé pour l'analyse globale des résultats réalisée dans la tâche TA4.2.4 sera utilisé dans la tâche TA4.2.5. Ainsi, l'évolution des débits statistiques caractéristiques des étiages sera analysée à partir d'un calcul réalisé au niveau des 3 périodes de référence retenues tâche TA4.2.1c (1 passée et 2 futures).

Les débits statistiques étudiés pourraient être a priori le QMNA5 et le VCN3, mais le choix définitif sera arrêté en concertation avec le Comité de Pilotage de l'étude.

En complément, les étiages des trois périodes de référence pourront être analysés à la lumière des indicateurs actuels, aux Débits Objectifs Biologiques, ou encore aux valeurs seuils utilisées dans les Arrêtés sécheresse (sous réserve de leur disponibilité). L'évolution des fréquences de dépassement / non atteinte de ces différents indicateurs sous l'effet du changement climatique sera analysée, pour le moins au niveau des stations de jaugeages disposant de chroniques de débits, et plus généralement au niveau de l'ensemble des indicateurs qui seront définis en concertation avec le COPIL.

À l'issue de cette tâche TA4.2.5, une première analyse en période d'étiage de la situation des eaux de surface au regard des débits statistiques, des contraintes réglementaires, voire environnementales, sera effectuée.

L'analyse plus approfondie visant à évaluer les débits disponibles sera réalisée dans la tâche TA 4.3 (cf. § suivant)

TA 4.3 Evaluation des débits disponibles pour la période actuelle

Pour les unités de gestion, définies par le SMABI, au sein desquelles les débits minimums biologiques (retenus par le SMABI comme débit d'objectif d'étiage -DOE- ou autre objectif environnemental défini), ne seraient pas respectés, des scénarii itératifs de diminution de la pression de prélèvement seront réalisés jusqu'au respect des DOE (Figure 14).

Les choix des baisses à appliquer (par usage, saison, ...) seront pris en concertation lors d'un COPIL.

Estimation des débits prélevables

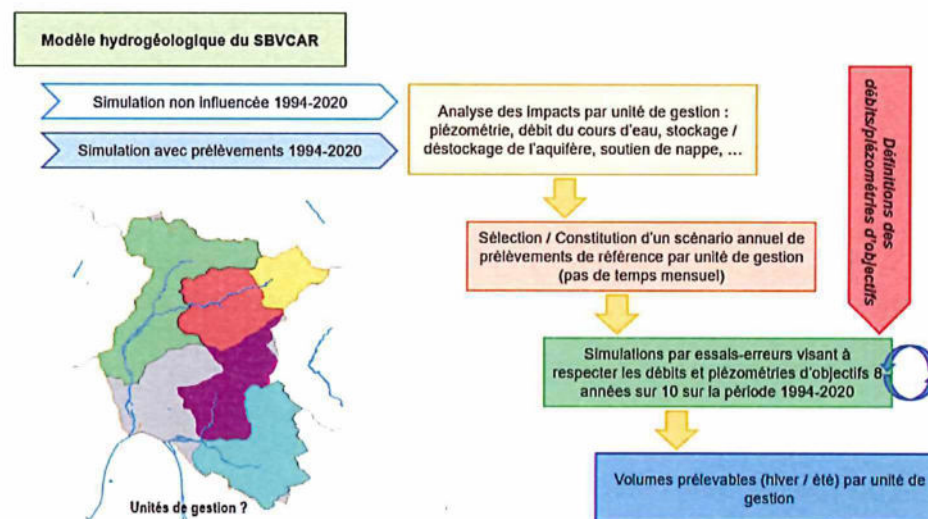


Figure 14 : Schéma de principe de la méthode itérative de simulation avec le modèle MARTHE pour identifier les volumes mobilisables (exemple du SBVCAR)

TA 4.4 : Evaluation des débits disponibles pour le futur prenant en compte le changement climatique

Des scénarii itératifs seront lancés de manière analogue à la méthodologie décrite dans la tâche TA4.3 pour un horizon de travail centré a priori sur 2070 et pour deux scénarii climatiques (a priori 1 scénario médian et 1 scénario pessimiste, mais les deux scénarii et l'horizon seront définis par le COPIL).

Les choix des baisses des prélèvements éventuellement nécessaires seront définis dans le cadre en concertation lors d'un COPIL et validés par la CLE.

Ce travail d'analyse des résultats débouchera sur :

- 1- Une évaluation détaillée du volume renouvelable des principales ressources en eaux aux horizons actuels et 2070, globalement et pour chacune des unités de gestion ;

- 2- Une analyse croisée besoins- ressources aux horizons actuels et 2070, avec croisement des besoins – ressources disponibles (volumes renouvelables), globalement et pour chacun des grands secteurs d'intérêt ;
- 3- Une identification des éventuels secteurs en tension au fil du temps en termes de niveaux (nappes) et débits (fleuves et rivières), des secteurs à risques... (ex. pénuries pour l'eau potable, l'eau industrielle, aléa intrusions salines, assèchement de zones humides, ...) et mise en exergue des enjeux ;
- 4- Une identification des éventuels secteurs excédentaires au fil du temps pouvant être mis à contribution pour fournir de l'eau complémentaire ;
- 5- Une identification des secteurs encore mal connus, pour lesquels des données complémentaires pourraient être nécessaires.

Ainsi dans ces TA4.3 et TA4.4, la démarche prendra en compte les aspects climatiques, hydrogéologiques et hydrologiques de l'hydro-système, les contraintes environnementales (débits minimum biologiques et éventuellement les zones de dénitrification), et les besoins en eau envisagés à l'avenir pour l'eau potable et les activités socio-économiques. L'objectif premier sera bien de déterminer l'évolution de la capacité de la ressource face au changement climatique tout en prenant en compte l'évolution de la demande en eau telle qu'envisagée aujourd'hui, afin d'identifier les éventuels secteurs en tension (et à risques). A l'issue de ces tâches, une analyse préliminaire de la situation au regard des contraintes environnementales et réglementaires aura été effectuée et les zones éventuelles dans lesquelles elles ne seront pas respectées seront établies et les dépassements ou manquements, qualifiés et quantifiés autant que possible à ce stade. Les contraintes réglementaires et environnementales à prendre en compte dans l'analyse seront déterminées en concertation étroite avec les services de l'Etat et le COPIL. Ces tâches déboucheront donc sur un constat qualifié et quantifié dans la mesure du possible.

5 ORGANISATION ET REALISATION DU PROJET

5.1 Chronogramme

Le projet sera réalisé sur une durée de 4 années à compter de la date de signature de la Convention selon le chronogramme (page suivante). Le BRGM ne pourra pas être tenu responsable de retards imputables aux autres études complémentaires interdépendantes avec son propre travail.

AP24ROUS

Envoyé en préfecture le 19/05/2025

Reçu en préfecture le 19/05/2025

Publié le 19/05/2025

ID : 027-200087252-20250516-25_17-CC



Version 1

AP24ROU508 / MORITO

PT1 : Collecte et acquisition des données nécessaires

TA1.1 : données nécessaires au modèle géologique 3D, synthèse géo.

Synthèse données disponibles et connaissances actuelles

géophysique aéroportée (hypothèse de 200km de levé)

2 forages / diagraphies

volet karstogénèse

Synthèse structurale

TA1.2 : données nécessaires au modèle hydrogéologique 3D

Campagnes quantitatives hautes et basses eaux

Interprétation des campagnes quantitatives

Données de géométrie des rivières (altitude de fond et largeur)

Base de données Prélèvements et Rejets

Campagne de multitraçage (3 injections)

Collecte des données de propriétés hydrodynamiques

Synthèse des données de traçages

Étude de la spatialisation des paramètres de calcul de la recharge

Modèle EROS Iton multigrappe

Collecte, analyse, traitement des données hydro (débits, niveaux piézomètres...)

Collecte données météo

Mise en place de suivi continu (débit bras forcé / suivi continu 5 piézomètres)

Étude du processus de dénitrification (attente chiffrage Nicole)

Définition du schéma conceptuel et rapport

TA1.3 : Passation des 5 marchés et suivi des travaux

(forages/piézomètres, diagraphie du TA1.1 campagnes de

multitraçage, campagnes quantitative et bases de données

prélèvements-rejets du TA1.2)

PT2 : Construction du modèle géologique 3D

Collecte/ Traitement préalable des données

Définition de la pile stratigraphique

Interprétation et codage des données

Intégration du schéma structural (cartes, géophysique,...)

Interpolation des surfaces

Analyse, synthèse

rapport modèle géologique

PT3 : Construction du modèle Hydrogéologique 3D

Structuration du modèle

Initialisation du modèle

Calage en régime permanent

Calage en régime transitoire / analyse sensibilité

Calage paramétrique PEST

Analyse, bilans globaux hautes, moyenne, basses eaux

Synthèse finale et rapport modèle hydrogéologique

PT4 : Exploitation du modèle sur l'itton

TA4.1.4 Scénarii d'exploitation

TA4.2 Etude impact CC sur ESOU/ESU Iton

Sélection concertée des scénarios climatiques de référence (dont scénarios socio-économiques) et analyse des forçages climatiques

Collecte données projeté des données de niveau de seine

(résultats projection du modèle GIPSA si existant)

Estimation des besoins en eau / rejets -> 2100 (fournis par

COPIL)

10 Simulations sur période 1950 - 3100 (5 modèle climatiques * 2

scénarios de prélèvement)

Analyse globale des résultats

Analyse des étiages

TA 4.3 : Evaluation des débits disponibles pour la période actuelle

TA 4.4 : Evaluation des débits disponibles pour le futur prenant en compte le changement climatique

HORS VOLETS

Comités de pilotage (5 prévus)

Réunions techniques 2 prévues

	2025				2026				2027				2028			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
PT1 : Collecte et acquisition des données nécessaires																
TA1.1 : données nécessaires au modèle géologique 3D, synthèse géo.																
Synthèse données disponibles et connaissances actuelles																
géophysique aéroportée (hypothèse de 200km de levé)																
2 forages / diagraphies																
volet karstogénèse																
Synthèse structurale																
TA1.2 : données nécessaires au modèle hydrogéologique 3D																
Campagnes quantitatives hautes et basses eaux																
Interprétation des campagnes quantitatives																
Données de géométrie des rivières (altitude de fond et largeur)																
Base de données Prélèvements et Rejets																
Campagne de multitraçage (3 injections)																
Collecte des données de propriétés hydrodynamiques																
Synthèse des données de traçages																
Étude de la spatialisation des paramètres de calcul de la recharge																
Modèle EROS Iton multigrappe																
Collecte, analyse, traitement des données hydro (débits, niveaux piézomètres...)																
Collecte données météo																
Mise en place de suivi continu (débit bras forcé / suivi continu 5 piézomètres)																
Étude du processus de dénitrification (attente chiffrage Nicole)																
Définition du schéma conceptuel et rapport																
TA1.3 : Passation des 5 marchés et suivi des travaux																
(forages/piézomètres, diagraphie du TA1.1 campagnes de																
multitraçage, campagnes quantitative et bases de données																
prélèvements-rejets du TA1.2)																
PT2 : Construction du modèle géologique 3D																
Collecte/ Traitement préalable des données																
Définition de la pile stratigraphique																
Interprétation et codage des données																
Intégration du schéma structural (cartes, géophysique,...)																
Interpolation des surfaces																
Analyse, synthèse																
rapport modèle géologique																
PT3 : Construction du modèle Hydrogéologique 3D																
Structuration du modèle																
Initialisation du modèle																
Calage en régime permanent																
Calage en régime transitoire / analyse sensibilité																
Calage paramétrique PEST																
Analyse, bilans globaux hautes, moyenne, basses eaux																
Synthèse finale et rapport modèle hydrogéologique																
PT4 : Exploitation du modèle sur l'itton																
TA4.1.4 Scénarii d'exploitation																
TA4.2 Etude impact CC sur ESOU/ESU Iton																
Sélection concertée des scénarios climatiques de référence (dont																
scénarios socio-économiques) et analyse des forçages																
climatiques																
Collecte données projeté des données de niveau de seine																
(résultats projection du modèle GIPSA si existant)																
Estimation des besoins en eau / rejets -> 2100 (fournis par																
COPIL)																
10 Simulations sur période 1950 - 3100 (5 modèle climatiques * 2																
scénarios de prélèvement)																
Analyse globale des résultats																
Analyse des étiages																
TA 4.3 : Evaluation des débits disponibles pour la période actuelle																
TA 4.4 : Evaluation des débits disponibles pour le futur prenant en compte le changement climatique																
HORS VOLETS																
Comités de pilotage (5 prévus)																
Réunions techniques 2 prévues																

Le Programme reste la propriété du BRGM et ne saurait être utilisé en dehors du cadre contractuel pour lequel il a été rédigé.

5.2 Réunions

5 réunions d'un Comité de Pilotage (COPIL) sont prévues dans le cadre du projet :

- 1 COPIL de démarrage : COPIL 1
- 3 COPILs d'avancement :
 - o COPIL 2 pour rendre compte des travaux de la tâche TA1.1
 - o COPIL 3 à l'issue du PT2
 - o COPIL 4 à l'issue du PT3
- 1 COPIL de restitution des résultats : COPIL 5

Le COPIL sera a minima composé du SMABI, du BRGM et de l'AESN. Sur décision du SMABI, pourront également être associés : la DREAL Normandie, la DDTM27, le Département de l'Eure et tous autres établissements que le SMABI jugera pertinent.

Les comptes rendus des COPIL seront rédigés par le BRGM qui en assurera également la diffusion après validation par le SMABI.

Pour les besoins spécifiques des études et travaux réalisés par les entreprises et bureaux d'études, le BRGM participera à un nombre raisonnable de réunions techniques avec ces derniers. Cela permettra au BRGM de s'assurer que la mise en œuvre de ces études et travaux rattachées au programme MORITO sont bien en adéquation par rapport aux besoins. Pour faciliter l'appropriation et l'exploitation des résultats, le BRGM attachera une attention particulière à la méthodologie mise en œuvre, l'expression des hypothèses et incertitudes et dans la mise en forme des résultats. Le BRGM veillera également à la bonne articulation de ces études avec le planning de son propre programme d'étude. Ces missions d'accompagnement scientifique ne constituent pas une mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage.

Le SMABI pourra par ailleurs solliciter le BRGM pour faire une présentation des résultats et ou de l'avancement du projet à la Commission Locale de l'Eau (CLE) du SAGE à raison d'une réunion par an.

5.3 Livrables

Des rapports numériques seront produits à la fin de chaque volet structurant :

- 1 rapport de synthèse « Modèle Géologique » à l'issue du PT2 ;
- 1 rapport de synthèse « Modèle Hydrogéologique » à l'issue du PT3 ;
- 1 rapport de synthèse générale à l'issue du PT4.

Les principaux éléments seront repris dans un ou plusieurs articles qui seront mis en ligne sur le SIGES Seine Normandie. Le BRGM se réserve également la possibilité de rédiger une ou plusieurs publications scientifiques soumises à comité de lecture.

6 BIBLIOGRAPHIE

Amraoui N. et Seguin J.J. (2012) – Simulation par modèle maillé de l'impact d'épisodes pluvieux millénaires sur les niveaux de la nappe de la craie et les débits du fleuve Somme. Rapport final. BRGM/RP-61864-FR, 85 p., 54 ill., 4 ann.

Amraoui N., Castillo C. et Seguin J.-J. (2014b) – Évaluation de l'exploitabilité de ressource en eau souterraine de la nappe de la craie du bassin de la Somme. Rapport final BRGM/RP-63408-FR, 199 p., 88 fig., 22 tabl., 4 ann., 1CD.

Amraoui N., Golaz C., Mardhel V., Negrel P., Petit V., Pinault J.L., Pointet T. (2002) – Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme. Rapport BRGM/RP-51827-FR, 184 p., 83 fig., 11 tabl., 5 ann.

Le Programme reste la propriété du BRGM et ne saurait être utilisé en dehors du cadre contractuel pour lequel il a été rédigé.

Amraoui N., Klinka T., Thiéry D., Stollsteiner P. (2014a) – Appui au SCHAPI 2014 - Module 2 : Suivi du site expérimental de Warloy-Baillon et mise en œuvre d'une modélisation semi-globale et du modèle maillé des hautes eaux de la Somme. Rapport final. BRGM/RP-64242-FR, 87 pages, 74 illustrations, 1 annexe.

Amraoui N., Wuilleumier A., Thiéry D., Caous J.Y., Noyer M.L. (2004) – Mise à jour du modèle des hautes eaux de la Somme. Rapport final des travaux de la phase 2. BRGM/RP-53211-FR, 151 pages, 23 illustrations, 7 ann.

Arnaud L. (2015) – Appui au SCHAPI 2015 - Module 2 : Actualisation du modèle maillé des hautes eaux de la Somme et simulations prévisionnelles. Rapport final. BRGM/RP-65238-FR, 57 pages, 24 illustrations, 2 annexes.

Arnaud L. (2017a) - Appui au SCHAPI 2016 - Module 2 : Consolidation du modèle maillé des hautes eaux de la Somme. Rapport final. BRGM/RP-66510-FR, 67 pages, 29 illustrations, 2 ann.

Arnaud L. (2017b) – Vers une optimisation de l'exploitation des eaux souterraines du bassin versant de l'Avre (Somme). Rapport final BRGM/RP-66774-FR, 83 p., 62 ill., 2 ann.

Arnaud L. (2017c) – Estimation prélèvements / ressource dans le cadre de la DCE : compléments méthodologiques pour les eaux souterraines. Rapport BRGM/RP-67212-FR.

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. BRGM/RP-67360-FR, 49 pages, 23 illustrations, 2 ann.

Ballesteros, D., Farrant, A., Nehme, C., Woods, M., Todisco, D., Mouralis, D., 2020. Stratigraphical influence on chalk cave development in Upper Normandy, France: implications for chalk hydrogeology. Int. J. Speleol. 49. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.49.3.2319>

Baran N., Berho C., Devau N., Gourcy L., Grémont M., Gutierrez A., Herivaux C., Le Guern C., Lucassou F., Neverre N., Olivier P., Petelet-Giraud E., Portal A., Schroetter J.M., Sidoli P., Surdyk N., Thiery D., avec la collaboration de Koch F., Lefevre Y., Maurice B. (2020) – Qualité des eaux souterraines (nitrate et produits phytosanitaires) du bassin Loire-Bretagne : des approches expérimentales aux outils de gestion. Rapport final. BRGM/RP-69499-FR, 195 p., 116 ill., 6 ann

Baran N., David P.Y., Dewandel B., Neveux A. 2024. Origine des eaux captées par le forage AEP de Fumeçons (BSS000RGHK) : investigations. Rapport final V0. BRGM/RP-XXXXX-FR, 198 p. (sous presse)

Barthélemy Y., Seguin J.J. (2016) – Modélisation maillée des écoulements souterrains. Principes, démarche et recommandations. Rapport final - Version 1. Rapport BRGM/RP-62549-FR.

Bessière H., Picot J., Picot G., Parmentier M. (2015) – Affinement du modèle hydrogéologique de la Craie du Nord-Pas-de-Calais autour des champs captant de la métropole Lilloise. Rapport final. BRGM/RP-63689-FR, 295 p., 194 fig., 20 tabl., 4 ann.

Bloomfield, J., Butler, A.P. et al. 2003. Flow heterogeneity in the fractured Chalk aquifer of southern England, In: International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, Prague, 15–19 September 2003. Prague, International Association of Hydrogeologists, 29–30.

BRGM (1995) – Piézométrie du système aquifère de Beauce. Basses eaux 1994. Rapport BRGM R38572, 33 p., 8 fig., 1 tabl., 3 ann.

BRISTOW, C. R., MORTIMORE, R. N. & WOOD, C. J. 1997. Lithostratigraphy for mapping the Chalk of southern England. Proceedings of the Geologists' Association, Vol. 108, 293-315.

Bromley R.G., A.S. Gale, 1982. The lithostratigraphy of the English Chalk Rock. Cretaceous Research, 3 (1982), pp. 273-306

Buckley, D.K., Cripps, A.R. and Shedlock, S.L. 1989. Geophysical Logging of SC Series Boreholes to Investigated Pollution of a Chalk Aquifer. British Geological Survey Technical Report WK/89/20R.

Buscarlet E. et Pickaert L. (2011) – Modélisation de la nappe de la Craie du Nord-Pas-de-Calais - Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire. Rapport BRGM/RP-60217-FR.

Caballero Y., Lanini S., Seguin J.-J., Charlier J.-B., Ollivier C. (2016) – Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin RMC. Rapport de fin de 1ère année. BRGM/RP-64779-FR.

CGG (1998) – Géologie et Géométrie de l'Aquifère de la Craie – Département de la Seine-Maritime

Chambers, J.E., Wilkinson, P.B., Kuras, O., Ford, J.R., Gunn, D.A., Meldrum, P.I., Pennington, C.V.L., Weller, A.L., Hobbs, P.R.N., Ogilvy, R.D., 2011. Three-dimensional geophysical anatomy of an active landslide in Lias Group mudrocks, Cleveland Basin, UK. Geomorphology 125, 472–484. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.017>

David P.Y, Loiselet C., Pannet P., Matthieu F, Lasseur E. et Servière M., 2015. Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Avre – Phase 3: Acquisition de données complémentaires – Phase 4 a: Construction du modèle géologique. Rapport BRGM/RP-64817-FR. 135 p., 53 ill., 6 ann.

David P.Y. (2012) – Elaboration d'un outil de gestion des prélèvements d'eau sur le bassin de l'Avre - Phase 1 : Etat de la connaissance ; Phase 2 : Analyse des données ; Rapport final, Orléans, BRGM/RP-60458-FR.

David P.-Y. et al. (2015) – Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Avre – Phase 3 : Acquisition de données complémentaires – Phase 4a : Construction du modèle géologique. Rapport BRGM/RP-64817-FR, 2015, 135 pages, 53 ill., 6 annexes.

David P.-Y., J.-B. Charlier, B. Ladouche, L. Cary, D. Pennequin, B. Meire, I. Schaefer, V. Hugot (2017b) – Observatoire de la Risle moyenne – Volets n°2, 3, 4 et 5 : Etude de l'hydro-système Risle-Nappe de la craie. Rapport final. BRGM/RP-67480-FR, 225 p., 111 ill., 10 tabl., 11 ann.

David P.-Y., Meire B., Cary L., Charlier J.-B., Ladouche B., Lemesnil M., Richard M., Yecora Zorzano L., (2016) – Etude du fonctionnement et de la vulnérabilité du bassin versant de l'Iton - Etat des connaissances, analyse des données et premiers résultats. Rapport final. BRGM/RP-65618-FR, 401 p., 246 ill., 22 tabl., 12 ann.

David P.Y., Pennequin D., Servière M., Amraoui N., Hugot V. (2017) – Elaboration d'un outil de gestion des prélèvements d'eau sur le bassin de l'Avre. Phase 4b : Construction et calage du modèle hydrogéologique - Phase 5 : Exploitation du modèle., Orléans, BRGM/RP-64826-FR.

David Pierre-Yann avec la collaboration de Arnaud Luc (2024) – Modèle mathématique de gestion des ressources en eau de l'hydro-système Seine – craie – alluvions sur les territoires de la Métropole de Rouen Normandie et du Syndicat Mixte du SAGE Caillly-Aubette-Robec. Rapport n°6 : Modélisation hydrogéologique 3D (MARTHE) . BRGM/RP-73335-FR (sous presse)

Dewandel B. (2018) – Méthodes analytiques d'estimation de l'impact quantitatif d'un prélèvement en nappe sur un cours d'eau – Problématique et solutions mathématiques. Rapport final. BRGM/RP-67566-FR, 107 p., 45 fig., 2 tabl., 1 ann.

Dufoyer Adeline, Massei Nicolas, Lecoq Nicolas, Marechal Jean-Christophe, Thiery Dominique, Pennequin Didier, David Pierre-Yann, 2019. Links between karst hydrogeological properties and statistical characteristics of spring discharge time series: a theoretical study. Environmental Earth Sciences 2019-07. DOI: 10.1007/s12665-019-8411-0

Farrant, A.R., Maurice, L., Ballesteros, D., Nehme, C., 2022. The genesis and evolution of karstic conduit systems in the Chalk. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 517, SP517-2020–126. <https://doi.org/10.1144/SP517-2020-126>

Farrant, A.R., Maurice, L., Mathewson, E., Ascott, M., Earl, G., Wilkinson, D., Howe, S., n.d. Caves and karst of the Chalk in East Sussex, UK: implications for groundwater management.

Fay Gomord, O., Descamps, F., Tshibangu, K., Vandycke, S., & Swennen, R. (15 July 2016). Unraveling chalk microtextural properties from indentation tests. "Engineering Geology, 209", 30-43. doi:10.1016/j.enggeo.2016.05.005. 2016_Faÿ-Gomord et al. ENGEO_Indentation.pdf

Fay Gomord, O., Soete, J., Katika, K., Galaup, S., Caline, B., Descamps, F., Lasseur, E., Fabricius, I. L., Saïag, J., Swennen, R., & Vandycke, S. (15 May 2016). New insight into the microtexture of chalks from NMR analysis. "Marine and Petroleum Geology, 75", 479-487. Faÿ-Gomord et al., 2016.pdf

Fay Gomord, O., Verbiest, M., Lasseur, E., Caline, B., Allanic, C., Descamps, F., Vandycke, S., & Swennen, R. (27 May 2018). Geological and mechanical study of argillaceous North Sea chalk: Implications of fractured reservoirs. "Marine and Petroleum Geology, 92", 962-978. doi:10.1016/j.marpetgeo.2018.03.037. 1-s2.0-S0264817218301478-main.pdf

Filipponi, M., Jeannin, P.Y., Tacher, L., 2009. Evidence of inception horizons in karst conduit networks. Geomorphology 106, 86–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.010>.

Gaillard Thierry, Lasseur Éric, Saïag Jessica, Dewez Thomas, Sizun Jean-Pierre et Collin Pierre-Yves , 2018. Sédimentologie et pétrophysique de la craie - Impact sur les écoulements actuels dans la Pointe de Caux (France). Revue Géologues n°199 de décembre 2018

Gaillard, T., Hoyez, B., Hauchard, E., 2023. Contribution of stratigraphy to groundwater motion understanding in chalk: examples of karstogenic horizons of the Pointe de Caux, France, in: Farrell, R.P., Massei, N., Foley, A.E., Howlett, P.R., West, L.J. (Eds.), The Chalk Aquifers of Northern Europe. Geological Society of London, p. 0. <https://doi.org/10.1144/SP517-2020-157>

Gallagher, A.J., Rutter, H.K., Buckley, D.K., Molyneux, I., 2012. Lithostratigraphic controls on recharge to the Chalk aquifer of Southern England. QJEGH 45, 161–172. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/09-048>

Gallois, N., Flipo, N., Schuite, J., 2021. Actualisation de l'application CaWaQS-Seine : Extension du système aquifère à la frange orientale du bassin et calibration de son comportement hydrodynamique.

Healy, R. W. and P. G. Cook (2002) – Using groundwater levels to estimate recharge, *Hydrogeol.J.*, 10(1), 91-109, doi:10.1007/s10040-001-0178-0.

Hohmann A., Selles A. (2019) – Synthèse bibliographique sur les techniques satellitaires appliquées à l'eau. Rapport final BRGM/RP-68673-FR, 60 p., 10 fig., 4 tabl., 1 ann.

HOPSON, P M. 2005. A stratigraphical framework for the Upper Cretaceous Chalk of England and Scotland, with statements on the Chalk of Northern Ireland and the UK Offshore Sector. British Geological Survey Research Report RR/05/01 102pp.

Hoyez B., 2008. Falaises du Pays de Caux-lithostratigraphie des craies turono-campaniennes. Publications Universitaires de Rouen et du Havre, 348 p.

Jaquet, O., Siegel, P., Klubertanz, G., Benabderrhamane, H., 2004. Stochastic discrete model of karstic networks. *Adv. Water Resour.* 27, 751–760. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.03.007>.

Juignet P. (1974) – La transgression crétacée sur la bordure orientale du Massif Armoricain Aptien, Albien, Cénomaniens de Normandie et du Maine. Le stratotype du Cénomaniens. Thèse. 2 vol, 806 p.

Karapanos, I., Jaweesh, M., Yarker, D.R., Sage, R.C., Marsili, A., Powers, E.M., 2021. Evidence of layered piezometry system within the Chalk aquifer in parts of SE England. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 54, qjgeh2019-175. <https://doi.org/10.1144/qjgeh2019-175>

Lanini S., Y. Caballero, J.-J. Seguin, J.-C. Maréchal (2015) – ESPERE, a multiple-method Microsoft Excel application for estimating aquifer recharge. *Groundwater*.

Lasseur E. (2008) – La Craie du Bassin de Paris (Cénomaniens-Campanien, Crétacé supérieur). Sédimentologie de faciès, stratigraphie séquentielle et géométrie 3D. Thèse de l'université de Rennes 1. 410 p.

Lasseur, E., 2007. La Craie du Bassin de Paris (Cénomaniens-Campanien, Crétacé supérieur). Sédimentologie de faciès, stratigraphie séquentielle et géométrie 3D. Minéralogie. Université Rennes 1, 2007. Français. NNT : tel-00350422

Le Cointe P., L. Arnaud, S. Beranger, Y. Caballero, S. Lanini (2019) – Réponse des Eaux souterraines au CHangement climatique dans le bassin Adour-Garonne (RECHARGE). Rapport final. BRGM/RP-67149-FR, 142 p., 52 ill., 12 tab., 7 ann.

Ledoux, E., Girard, G., de Marsily, G., Villeneuve, J. P. and Deschenes, J. (1989) – Spatially Distributed Modeling: Conceptual Approach, Coupling Surface Water And Groundwater, in *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling: Theory and Practice*, edited by H. J. Morel-Seytoux, pp. 435–454, Springer Netherlands, Dordrecht., 1989.

Liu C., Liu J., Hu Y. (2016) – Airborne Thermal Remote Sensing for Estimating of Groundwater Discharge to a river. *Groundwater*, 54: 363-373. Doi:10.1111/gwat.12362.

Lowe, D. 1992. Chalk caves revisited. *Cave Science*, 19, 55–58.

Mangin, A., 1974. Contribution à l'Étude Hydrodynamique des Aquifères Karstiques. Technical Report, Université Dijon, URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01575806>.

Mardhel, V., Pinson, S., Allier, D., 2021. Description of an indirect method (IDPR) to determine spatial distribution of infiltration and runoff and its hydrogeological applications to the French territory. *J. Hydrol.* 592, 125609. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125609>

Marsili, A., Karapanos, I., Jaweesh, M., Yarker, D.R., Powers, E.M., Sage, R.C., 2022. Artesian conditions in the Chilterns Chalk aquifer (NW of the London Basin) and the implications for surface water–groundwater interactions. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 517, SP517-2020–144. <https://doi.org/10.1144/SP517-2020-144>

Maurice L.D., Atkinson T.C., Barker J.A., Williams A.T., Gallagher A.J., 2012. The nature and distribution of flowing features in a weakly karstified porous limestone aquifer. *Journal of Hydrology* Volumes 438–439, 17 May 2012, Pages 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.050>

Maurice, L., Farrant, A.R., Mathewson, E., Atkinson, T., 2022. Karst hydrogeology of the Chalk and implications for groundwater protection. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 517, SP517-2020–267. <https://doi.org/10.1144/SP517-2020-267>

Meire B., Paquet F., David P.Y. (2020) – Modèle mathématique de gestion des ressources en eau de l'hydro-système Seine – craie – alluvions sur les territoires de la Métropole de Rouen Normandie et du Syndicat Mixte du SAGE Cailly-Aubette-Robec. Rapport n°1 : Synthèse géologique et structurale. Rapport final. BRGM/RP-69543-FR, 69 p., 25 ill., 1 tabl., 1 ann.

Meire B., Paquet F., David P.Y. (2020) – Modèle mathématique de gestion des ressources en eau de l'hydro-système Seine – craie – alluvions sur les territoires de la Métropole de Rouen Normandie et du Syndicat Mixte du SAGE Cailly-Aubette-Robec. Rapport provisoire. BRGM/RP-69543-FR

Meire B., Portal A., Jacob T., Paquet F., Bitri A., Mathieu F., David P. Y., avec la collaboration de Ragot J. (2019) – Fonctionnement de l'hydro-système, interactions et cheminements des eaux naturelles et de la n-nitrosomorpholine dans le secteur de la Faille de Fécamp-Lillebonne – Volet géologique et géophysique. Rapport final. BRGM/RP-67087-FR, 175 p., 66 ill., 2 tabl..

Meire Baptiste et Assy Yvan Olivier, avec la collaboration de Lasseur Eric, Jallais Nolwenn, David Pierre-Yann et Idée Erwan (2022) – Modèle mathématique de gestion des ressources en eau de l'hydro-système Seine – craie – alluvions sur les territoires de la Métropole de Rouen Normandie et du Syndicat Mixte du SAGE Cailly-Aubette-Robec. Rapport n°5 : Modélisation géologique 3D. Rapport final V3. BRGM/RP-71809-FR, 124 p.

Mortimore, R. 1993. Chalk water and engineering geology. In: Downing, R.A., Price, M. and Jones, G.P. (eds) *The Hydrogeology of the Chalk of North-West Europe*. Clarendon Press, 67–92.

Mortimore, R.N., 2022. Chalk: all we need is a fracture log! *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 55, qjgegh2021-031. <https://doi.org/10.1144/qjgegh2021-031>

Nehme, C., Farrant, A., Ballesteros, D., Todisco, D., Rodet, J., Sahy, D., Grappone, J.M., Staigre, J., Mouralis, D., 2020. Reconstructing fluvial incision rates based on palaeo-water tables in chalk karst networks along the Seine valley (Normandy, France). *Earth Surf. Process. Landf.* 45, 1860–1876. <https://doi.org/10.1002/esp.4851>

Pennequin Didier, David Pierre-Yann, Servière Marie, Amraoui Nadia, Loiselet Chrystèle, 2017. *Hydro-System Flow Modelling for Water Resources Management in the Fractured and Karstified Chalk Aquifer Environment of Eastern Normandy*. EuroKarst 2016, Neuchâtel, 2017. ISBN : 978-3-319-45464-1. DOI: 10.1007/978-3-319-45465-8_22

Portal, Angélie ; Jacob, Thomas ; Meire, Baptiste ; Mathieu, Francis ; Bretaudeau, François ; Paquet, Fabien ; David, Pierre-Yann ; Maurice, Benjamin ; Roussez, G. ; Beaubois, Florent (2020) - Modèle mathématique de gestion des ressources en eau de l'hydro-système Seine –

craie – alluvions sur les territoires de la Métropole de Rouen Normandie et du Syndicat Mixte du SAGE Cailly-Aubette-Robec - Rapport n°2 : Résultats des investigations géophysiques - Rapport final . BRGM/RP-69544-FR, 123 p., 5 ann.

Price, M. 1987. Fluid flow in the Chalk of England. Geological Society, London, Special Publications, 34, 141–156, <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.034.01.10>

Revil, A., Finizola, A., Gresse, M., 2023. Self-potential as a tool to assess groundwater flow in hydrothermal systems: A review. Journal of Volcanology and Geothermal Research 437, 107788. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107788>

Revil, A., Pezard, P.A., Glover, P.W.J., 1999. Streaming potential in porous media 1. Theory of the zeta potential. J. Geophys. Res.-Solid Earth 104, 20021–20031. <https://doi.org/10.1029/1999JB900089>

Rolf Peter Farrell, Mark Whiteman, 2023. "The Environment Agency Chalk groundwater level monitoring network in England", The Chalk Aquifers of Northern Europe, R. P. Farrell, N. Massei, A. E. Foley, P. R. Howlett, L. J. West

Roubinet, D., Linde, N., Jougnot, D., Irving, J., 2016. Streaming potential modeling in fractured rock: Insights into the identification of hydraulically active fractures. Geophysical Research Letters 43, 4937–4944. <https://doi.org/10.1002/2016GL068669>

Saiag J., 2016. Caractérisation des hétérogénéités sédimentaires et pétrophysiques d'un réservoir carbonate microporeux. Le cas de la Craie (Crétacé supérieur, Bassin de Paris). Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, France. 404 p.

Saleh, F., Ducharme, A., Flipo, N., Oudin, L. and Ledoux, E. (2013) – Impact of river bed morphology on discharge and water levels simulated by a 1D Saint–Venant hydraulic model at regional scale, Journal of Hydrology, 476, 169–177, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.10.027.

Seguin J.-J. (2016) – Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines. BRGM/RP-65635-FR.

Siemers, J., Dreybrodt, W., 1998. Early development of karst aquifers on percolation networks of fractures in limestone. Water Resour. Res. 34, 409–419. <http://dx.doi.org/10.1029/97WR03218>, URL: <http://doi.wiley.com/10.1029/97WR03218>

Thiéry D. (2014) – Logiciel GARDENIA version 8.2, Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 128 p., 65 fig., 2 ann.

Thiéry D., (2010) – "Groundwater Flow Modeling in Porous Media Using MARTHE", vol. 5: Modeling Software, Chapter 4, p. 45-60, Environmental Hydraulics Series, J.M. Tanguy (Ed.), Editions Wiley/ISTE London.

Vernoux J.F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J., Stollsteiner P., Lalot E. (2010) – Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE, rapport BRGM/RP-57044-FR, 193 p., 71 illustrations.

White, J.T., Hunt, R.J., Fienen, M.N., and Doherty, J.E., 2020, Approaches to Highly Parameterized Inversion: PEST++ Version 5, a Software Suite for Parameter Estimation, Uncertainty Analysis, Management Optimization and Sensitivity Analysis: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 7C26, 52 p., <https://doi.org/10.3133/tm7C26>.

Woods, M.A., Farrant, A.R., Newell, A.J., Lee, K.A., 2023. The lithostratigraphical context of the English Chalk Rock (Turonian). Cretaceous Research 143, 105419. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2022.105419>

ANNEXE A2 : ANNEXE FINANCIÈRE

Programme de travail	Montant (€HT)	Part SMAEI (€HT)	Part BRGM (€HT)
PT1 : Collecte et acquisition des données nécessaires			
TA1.1 : données nécessaires au modèle géologique 3D, synthèse géologique (Interprétation géophysique héliportée, volet karstogénèse, synthèse structurale)	130 000 €	104 000 €	26 000 €
Aquisition Géophysique héliportée	92 000 €	92 000 €	- €
TA1.2 : données nécessaires au modèle hydrogéologique 3D	225 000 €	180 000 €	45 000 €
TA1.3 : appui passation des 5 marchés et suivi des travaux (forages/piézomètres, diagraphie du TA1.1, campagnes de multitraçage, campagnes quantitative et bases de données prélèvements-rejets du TA1.2)	52 430 €	41 944 €	10 486 €
PT2 : Construction du modèle géologique 3D	86 670 €	69 336 €	17 334 €
PT3 : Construction du modèle Hydrogéologique 3D	153 010 €	122 408 €	30 602 €
PT4 : Exploitation du modèle sur l'Iton			
TA4.1 : scénarii d'exploitation du modèle	44 940 €	35 952 €	8 988 €
TA4.2 : Etude impact CC sur ESQU/ESU Iton	85 600 €	68 480 €	17 120 €
TA4.3 : Evaluation des volumes mobilisables pour la période actuelle	37 450 €	29 960 €	7 490 €
TA4.4 : Evaluation des volumes mobilisables pour le futur (C.C.)	50 290 €	40 232 €	10 058 €
Pilotage / Gestion de Projet	46 010 €	36 808 €	9 202 €
Total HT	1 003 400 €	821 120 €	182 280 €
	TVA SMAEI (20%)	164 224 €	
	Total SMAEI TTC	985 344 €	
	Total BRGM HT		182 280 €