



HAL
open science

Points et supports de simulation des projections hydrologiques

Eric Sauquet, Yvan Caballero, Jean-Pierre Vergnes, Ryma Aissat

► **To cite this version:**

Eric Sauquet, Yvan Caballero, Jean-Pierre Vergnes, Ryma Aissat. Points et supports de simulation des projections hydrologiques. INRAE; BRGM. 2022, 22 p. <hal-03940238>

HAL Id: hal-03940238

<https://hal.inrae.fr/hal-03940238v1>

Submitted on 22 Dec 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



POINTS ET SUPPORTS DE SIMULATION DES PROJECTIONS HYDROLOGIQUES

Éric SAUQUET, INRAE
Yvan CABALLERO, BRGM
Jean-Pierre VERGNES, BRGM
Ryma AISSAT, BRGM

01/07/2022

Avec le soutien financier de :



Le projet Explore2, porté par INRAE et l'Office International de l'eau (OiEau), s'inscrit dans la suite de l'étude Explore 2070 (2010-2012) grâce à laquelle les acteurs de la recherche, autour du Ministère de l'écologie, avaient établi des premiers scénarios prospectifs de disponibilités des ressources en eau à l'échelle de la France à horizon 2070.

Officiellement lancé en juillet 2021, co-financé par les partenaires du projet, le Ministère de la transition écologique (MTE) et l'Office français de la biodiversité (OFB), le projet Explore2 a pour objectif, d'ici 2024, d'actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des publications du GIEC (CMIP5), mais aussi d'accompagner les acteurs des territoires dans la compréhension et l'utilisation de ces résultats pour adapter leurs stratégies de gestion de la ressource en eau.

Nom du projet	Explore2 : Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques en France
Nom du rapport	Points et supports de simulation des projections hydrologiques
Auteur(s)	Éric SAUQUET, INRAE Yvan CABALLERO, BRGM Jean-Pierre VERGNES, BRGM Ryma AISSAT, BRGM
Numéro de version	V1
Date contractuelle de remise du livrable	01/07/2022
Date effective de remise du livrable	08/07/2022
Statut du document	version provisoire /version finale
Accès en ligne	libre/ restreint / confidentiel
Mots-clés (5 maximum)	modélisation, point, maillage, hydrologie, hydrogéologie

Table des matières

1. Introduction	8
2. Constitution de l'ensemble des points de restitution pour l'hydrologie de surface	9
3. Constitution de l'ensemble des supports et points de restitution pour l'hydrologie souterraine	13
3.1. Support pour la recharge potentielle	13
3.2. Support pour les sorties de la plateforme AquiFR	14
3.3. Support pour le MOdèle Nord-Aquitain (MONA)	18
3.4. Des simulations complémentaires sur des piézomètres.....	19
4. Conclusion.....	21
5. Références	22

Résumé

Ce rapport décrit les supports de restitution des modèles impliqués dans le projet Explore2 : il s'agit des points des réseaux de référence établis pour l'évaluation des modèles appliqués dans le projet (Sauquet *et al.*, 2022), de points positionnés le long du réseau hydrographique ou sur une grille définie par des modèles hydrogéologiques, et d'entités géographiques, *i.e.* des masses d'eau souterraine issues d'un découpage de l'ensemble du territoire national en unités hydrogéologiques homogènes.

Ces supports de restitution ont été conçus pour répondre aux besoins d'une densité de sorties des modèles plus élevée que celle du précédent exercice Explore2070. Les points le long du réseau hydrographique ont été choisis pour répondre à des questionnements opérationnels ou des possibles utilisations futures (*i.e.* le devenir du régime au droit des points de gestion inscrits dans les SDAGEs ou des points actuels de suivi de la qualité des eaux). Les simulations de piézométrie seront fournies sur un ensemble de piézomètres identifiés dans les bases de données nationales et sur les points d'une grille régulière superposée au maillage préexistant des modèles hydrologiques. Le nombre de points de grille et d'entités a été limité dans un but de gestion raisonnée des bases de données et du futur portail DRIAS-Eau qui hébergera les projections hydrologiques.

Acronymes

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

DCE : Directive-Cadre sur l'Eau

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

LISA : Base de donnée des Limites des Systèmes Aquifères

MESO : Masse(s) d'Eau SOuerraine

MONA : Modèle Nord-Aquitain

OFB : Office français de la biodiversité

ONDE : Observatoire National Des Etiages

RCS : Réseau de Contrôle de Surveillance

SANDRE : Service d'Administration National des Données et Référentiels sur l'Eau

Liste des figures

Figure 1 : Distribution de l'ensemble des points de simulation en termes de surface drainée et de répartition dans l'espace	11
Figure 2 : Densité de points de simulation par zone hydrographique du SANDRE	12
Figure 3 : Visualisation des contours des MESO de la France métropolitaine	13
Figure 4 : Domaines spatiaux couverts par les modèles hydrogéologiques de la plateforme AquifR utilisés dans Explore2. Le fond de carte correspond à la Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères (BDLISA) disponible à l'échelle de la France (https://bdlisa.eaufrance.fr/)	15
Figure 5 : Maillage brut affleurant de chaque modèle	16
Figure 6 : Maillage à 1 km utilisé dans Explore2 pour les sorties d'AquifR.....	16
Figure 7 : Superposition du maillage à 1 km (rouge) sur le maillage du modèle Basse Normandie (noir). Les projections des deux maillages diffèrent et une partie du maillage du modèle est à la résolution de 200 m. Les charges à 1 km sont obtenues en réalisant la moyenne pondérée des charges du modèle dans chaque maille 1 km, la pondération correspondant à la surface contributive de chaque maille du modèle dans la maille à 1 km	17
Figure 8 : Exemple de superposition du maillage à 1 km sur le maillage du modèle Marne-Oise.....	17
Figure 9 : Extension de la zone modélisée intégrant le département de la Gironde, le sud de la Charente et de la Charente-Maritime, le nord-ouest du Gers, le Lot-et-Garonne, l'essentiel du département de la Dordogne et une grande partie des départements du Lot et des Landes (A) et vue 3D des 15 couches aquifères modélisées dans le MONA (B).....	18
Figure 10 : Extensions et maillages des couches du MONA considérées dans Explore2 (A) et zoom sur l'aquifère de l'Aquitainien (B)	19
Figure 11 : Points de simulation de niveaux piézométriques par modèle.	20

Liste des tableaux

Tableau 1 : Descriptif et contribution des réseaux identifiés à l'ensemble des points de simulations retenus dans Explore2	11
Tableau 2 : Descriptif des modèles hydrogéologiques spatialisés présents dans la plate-forme AquifR.....	14
Tableau 3 : Nombre de mailles et superficie de chaque couche du MONA	18

1. Introduction

Lors du retour d'expérience sur le projet Explore2070, les acteurs de l'eau interrogés ont pu regretter une faible densité de points de calculs sur certains secteurs, la mise à disposition des projections uniquement au droit de stations hydrométriques existantes (hors exutoire à la mer) et un domaine hydrogéologique modélisé morcelé.

Fort des progrès en modélisation réalisés depuis, le consortium scientifique réuni dans Explore2 s'est engagé à enrichir la base de connaissance en multipliant les points de simulation (notamment aller au-delà des 1522 points de calcul d'Explore2070 pour l'hydrologie de surface) et produisant des résultats sur des bassins non jaugés.

Cependant, il n'est pas possible de démultiplier les points de restitution sans engendrer au final des problèmes de stockage des séries dans les portails. Un compromis doit donc être trouvé et le nombre de points doit être limité, et « raisonnable ».

Le rapport présente le mode d'élaboration des supports de restitution des projections.

Pour l'hydrologie de surface, nous avons cherché un ensemble de points de simulation du réseau hydrographique répartis uniformément sur le territoire ayant un intérêt *a priori* pour la gestion de l'eau (points de suivi quantitatifs ou qualitatifs), sous contrainte de redondances limitées.

Comparativement à Explore2070, pour l'hydrologie souterraine, les domaines de modélisation sont étendus et les recharges sont estimées sur un découpage du territoire plus fin.

2. Constitution de l'ensemble des points de restitution pour l'hydrologie de surface

La sélection de points n'a pas été faite au hasard. A un échantillonnage régulier (ex. un point sur le réseau hydrographique tous les X km), nous avons préféré sélectionner des points déjà présents dans plusieurs réseaux nationaux thématiques opérationnels. L'hypothèse est faite que ces points présentent un intérêt en termes de gestion (connaissance, suivi, réglementation, etc.). Outre la « valeur » présumée des sites, les réseaux nationaux assurent de fait une couverture uniforme des points. Croiser plusieurs réseaux aux objectifs différents permet également d'intégrer différents enjeux.

Les réseaux nationaux mobilisés ici sont :

- Le réseau de stations hydrométriques de la banque HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr/>) : cette base de données nationale rassemble les mesures de hauteur d'eau (à pas de temps variable) et les débits de près de 5000 stations de mesure (dont environ 3200 sont actuellement en service) localisées en France (dont Outre-Mer). La base de données administrée par le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI) est alimentée principalement par les services de l'Etat (ex. Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), mais également par les producteurs d'hydroélectricité (ex. EDF, CNR) et les compagnies d'aménagement (ex. Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne).
- L'Observatoire National Des Etiages (ONDE, <https://onde.eaufrance.fr>) : il a été mis en place en 2012 par l'ONEMA (devenu depuis OFB) dans le but de constituer un réseau de connaissance sur les étiages estivaux (en caractérisant leur occurrence et leur intensité) et d'être un outil d'aide à la gestion des étiages sévères (Nowak et Durozoi, 2012). Les sites ONDE sont répartis sur l'ensemble de la France. Ils sont représentatifs des contextes hydrographiques de chaque département, ont été choisis pour être non redondants avec des systèmes d'observation déjà existants et sont positionnés sur des cours d'eau d'ordre de Strahler de 1 à 4, *a priori* sujets à des assecs naturels et/ou anthropiques. Le nombre des sites est proportionnel au linéaire de cours d'eau par Hydro-EcoRégions (HER, Wasson *et al.*, 2002).
- Les points nodaux des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) : ces points sont pour l'essentiel des points de suivi (débit, concentration de polluant, température de l'eau, etc.). Y sont généralement associées des valeurs repères des paramètres mesurés permettant de juger du respect ou de l'atteinte d'objectifs environnementaux fixés pour l'entité hydrographique concernée. Leur localisation repose sur des critères de cohérence hydrographique, écosystémique, hydrogéologique et socio-économique (<http://www.glossaire-eau.fr/concept/point-nodal>). La liste des 403 points nodaux a été fournie par les Agences de l'Eau et les DREALs de bassin.
- Le Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS) des eaux douces de surface : il est constitué de sites de mesures pérennes répartis sur l'ensemble du territoire, représentatifs du fonctionnement des masses d'eau. Il a été mis en place en 2007 pour évaluer et suivre sur le long terme l'état général des eaux de surface (suivis physico-chimiques et biologiques). Les mesures réalisées contribuent au rapportage DCE (Directive-Cadre sur l'Eau) auprès de l'Union Européenne. La couche SIG *StationMesureEauxSurface_FXX* (<https://www.geocatalogue.fr/>, téléchargement : octobre 2021) a fourni les coordonnées de 1568 points de surveillance labellisé « RCS ».

L'ensemble de ces sites disposent d'un code du Service d'Administration National des Données et Référentiels sur l'Eau (SANDRE, <https://www.sandre.eaufrance.fr/>) pour faciliter leur référencement à l'échelle nationale. A ces réseaux opérationnels, s'ajoute l'ensemble de 1522 points de simulation du projet Explore2070, sélectionné pour assurer une continuité entre les deux projets.

Superposer les différents ensembles conduit à plus de 10 000 points et certains du fait de leur proximité portent la même information. Compte tenu de la résolution spatiale des forçages climatiques qui seront

utilisés pour les modélisations, les points drainant moins de 64 km² ont été de fait exclus. Une procédure de rationalisation a été engagée pour ne conserver qu'un point quand deux sites étaient trop proches. Il est exclu de faire un tri manuellement : la procédure repose sur la comparaison de la distance entre points à un seuil.

Du fait de la structuration des points en réseau, la distance entre deux points en rivière est mesurée par une distance intégrant la proximité géographique et la différence entre surfaces drainées.

Considérons deux bassins *A* et *B*, définis aux exutoires de coordonnées (*X*(*A*) ; *Y*(*A*)) et (*X*(*B*) ; *Y*(*B*)) (en km, système de projection Lambert 93), drainant respectivement *Surf*(*A*) et *Surf*(*B*) (en km²). La distance (en km) est définie ici par :

$$Dist(A,B) = \sqrt{(X(A) - X(B))^2 + (Y(A) - Y(B))^2 + (\alpha \times \Delta Srel)^2}$$

où $\Delta Srel = 2 \times |Surf(A) - Surf(B)| / (Surf(A) + Surf(B))$ est l'écart relatif entre les surfaces drainées en valeur absolue.

Le coefficient α vient équilibrer le poids de la distance géographique et celui de la différence relative de surface. Les coordonnées sont exprimées en km dans le système de projection Lambert93 et les surfaces en km². Nous avons considéré que deux points portent la même information (ils sont jugés redondants) si la distance est inférieure à un seuil. Le choix d'un seuil fixe n'a pas forcément de sens : par exemple, deux stations drainant plus de 10 000 km² sur le même linéaire peuvent être considérées comme redondantes si elles sont éloignées de plus de 10 km sans affluent conséquent entre les deux stations hydrométriques ; en revanche pour des bassins drainant moins de 1000 km², cette redondance est discutable. Le seuil ne doit pas être fixe mais évoluer au regard des surfaces des bassins versants.

Finalement :

- nous avons fixé α à 100 ;
- nous avons considéré une redondance si :

$$Dist(A,B) \leq 2.5 \log_{10}(\overline{Surf}(A,B))$$

où $\overline{Surf}(A,B)$ désigne la moyenne des surfaces. Cela correspond à un seuil de 5 km pour $\overline{Surf}(A,B) = 100$ km² et un seuil de 10 km pour $\overline{Surf}(A,B) = 10\,000$ km².

Ainsi, au droit d'une confluence de deux bassins *A* et *B* avec un écart relatif de 10% (de surface respectives 95 et 105 km²), ces deux bassins *A* et *B* seront considérés comme différents car :

$$Dist(A,B) = \alpha \Delta Srel = 10 \text{ km} > 2.5 \log_{10}((105 + 95)/2) = 5 \text{ km.}$$

Inversement, considérons deux bassins *A* et *B* avec un écart relatif de 3% (de surface respectives 6600 et 6400 km²) distants de 6.5 km, ces deux bassins *A* et *B* seront considérés comme redondants car :

$$Dist(A,B) = 7.2 \text{ km} \leq 2.5 \log_{10}((6600 + 6400)/2) = 9.5 \text{ km.}$$

Pour mener à bien cet exercice, les surfaces drainées par les points doivent être connues. En l'absence de cette information (réseaux ONDE et RCS), les points ont été positionnés sur un des tronçons sur le SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau (SYRAH-CE, Chandesris *et al.*, 2007) et le Réseau Hydrographique Théorique (RHT, Pella *et al.*, 2012). L'estimation de surface issue du SYRAH-CE a été privilégiée quand elle était disponible. L'affectation à un brin s'est appuyée sur les coordonnées géographiques des points (distance minimale au brin) et le nom du cours d'eau instrumenté (correspondance avec l'identifiant du brin) et a été réalisée avec le soutien technique de l'Unité de Recherche RiverLy (INRAE, Villeurbanne).

Le processus a été réalisé en trois étapes : la redondance au sein de la banque HYDRO complétée des données EDF mises à disposition a été examinée et l'échantillon de stations hydrométriques jugées indépendantes a été ensuite complété de tous les autres réseaux (RCS, Explore2070, ONDE, points nodaux) et finalement, les 880 stations hydrométriques candidates au jeu de référence ont été ajoutées (Sauquet *et al.*, 2022).

Le processus permet d'extraire 4369 points de simulation d'un ensemble de 7071 points candidats (Tableau 1, Figure 1). La dernière colonne renseigne l'apport de chaque source de données. Ainsi, les points nodaux sont traités dans la dernière itération : ils n'apportent que 13 points indépendants à l'échantillon final. Sans surprise, l'ensemble retenu est dense et réparti sur l'ensemble du territoire. Les zones dépourvues de points répondent à une logique : il s'agit de secteurs sans réseau de surface développé (ex. la Beauce). Une majorité de ces points est issue de la base de données HYDRO. Notons que le réseau ONDE paraît complémentaire des autres réseaux car plus de 511 (~ 83%) des 611 points drainant plus de 64 km² sont conservés dans la sélection Explore2 et ces points ONDE sont des bassins versants de petite taille qui étoffent la catégorie des points simulés de surface comprise entre 64 et 100 km². La Figure 2 indique la densité de points par zone hydrographique SANDRE. Finalement, 2814 zones sur les 6189 seront renseignées par au moins un point de simulation. Les grandes zones contiennent de fait un plus grand nombre de points de simulation.

Tableau 1 : Descriptif et contribution des réseaux identifiés à l'ensemble des points de simulations retenus dans Explore2

Source de données	Nombre de points des réseaux	Nombre de points drainant plus de 64 km ²	Nombre de points retenus
HYDRO	5045	3381	2889
EDF	36	36	
RCS	1568	1229	652
Explore2070	1522	1426	304
<i>dont estuaires</i>	231	202	175
ONDE	3302	611	511
Points nodaux	403	388	13
TOTAL	11876	7071	4369

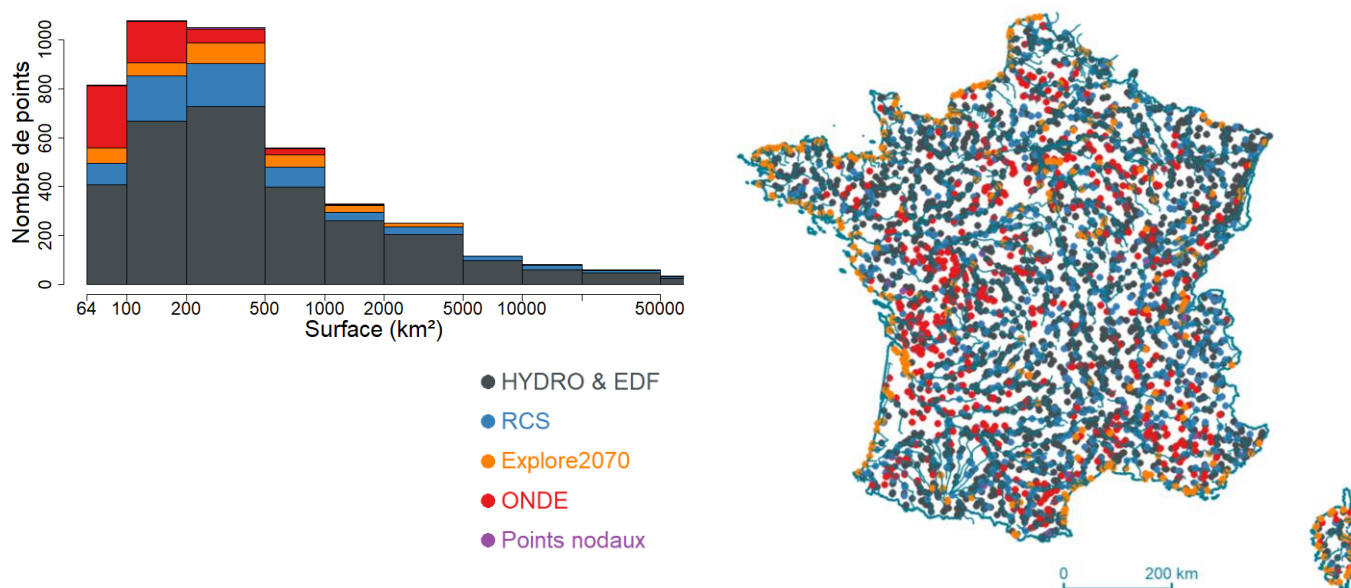


Figure 1 : Distribution de l'ensemble des points de simulation en termes de surface drainée et de répartition dans l'espace

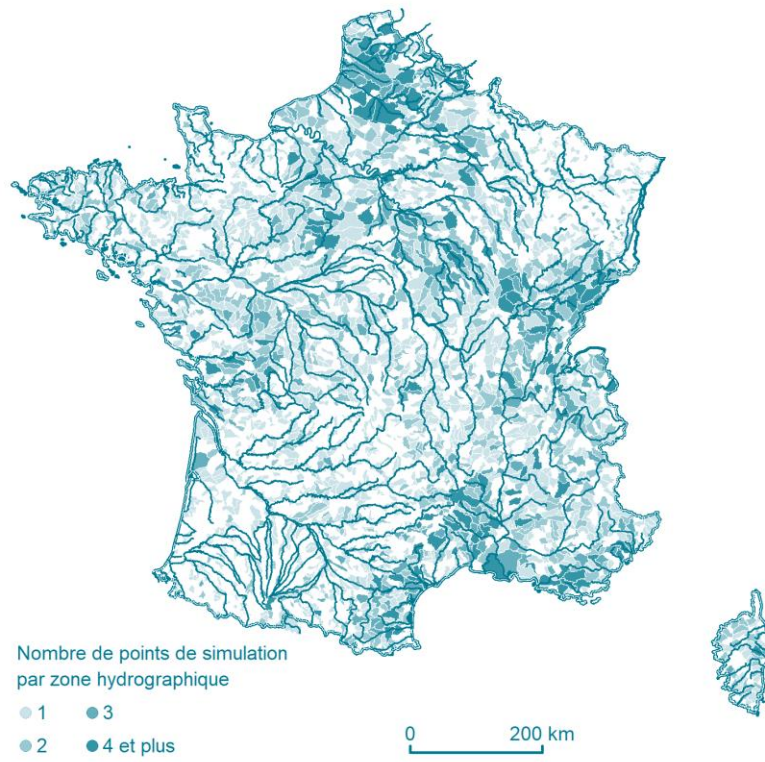


Figure 2 : Densité de points de simulation par zone hydrographique du SANDRE

3. Constitution de l'ensemble des supports et points de restitution pour l'hydrologie souterraine

3.1. Support pour la recharge potentielle

Des chroniques de recharge potentielle seront produites dans le cadre du projet sur l'ensemble du territoire métropolitain. La recharge potentielle est ici définie comme la part des précipitations efficaces qui s'infiltré pour recharger les aquifères, mais dont on ne peut être certain qu'elle y sera effectivement stockée. La méthode de simulation (Lanini *et al.*, 2019) permet de fournir des chroniques sur des entités hydrogéologiques homogènes du point de vue de leurs propriétés hydrodynamiques.

Les entités sur lesquelles ce calcul est généralement fait sont celles répertoriées dans la BDLISA (Brugeron *et al.*, 2018), qui est une base de données qui décrit des entités hydrogéologiques à l'échelle de la France. Les entités de la BDLISA peuvent parfois avoir une taille très largement inférieure à 64 km² (et n'être donc pas compatible avec la résolution des forçages climatiques). Pour cette raison, il a été décidé de simuler les chroniques de recharge potentielle sur des entités de plus grande taille, comme celles proposées par la base de données des Masses d'Eau SOuerraine (MESO, Mardhel et Normand, 2006), qui regroupent généralement les entités BDLISA de petite taille. Ce découpage est pertinent à l'échelle de l'Europe, puisque ce sont les entités hydrogéologiques qui font l'objet de suivis des états quantitatifs et qualitatifs des eaux souterraines au titre de la DCE. Ainsi, des chroniques journalières de recharge potentielle seront fournies pour chacune des MESO du territoire métropolitain français (Figure 3).

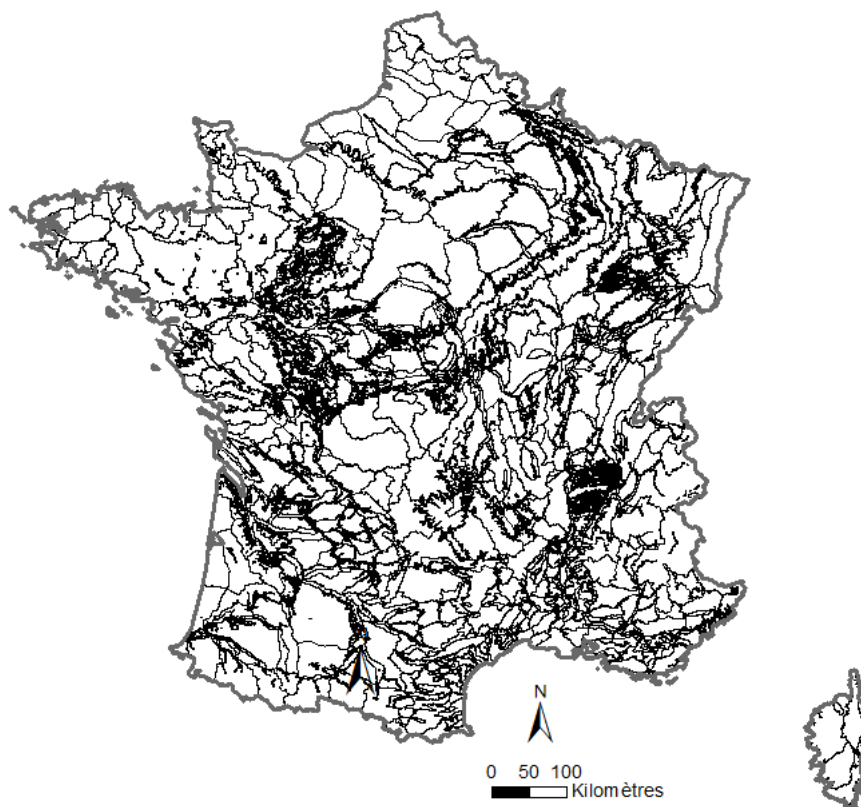


Figure 3 : Visualisation des contours des MESO de la France métropolitaine

Afin de comparer ces résultats avec les flux simulés par les différentes modélisations hydrologiques menées par ailleurs dans le cadre du projet, il sera également possible de fournir ces flux de recharge potentielle, à l'échelle des bassins versants unitaires correspondants. Ces flux seront cependant calculés par croisement

entre la couche des MESO et celle des bassins versants qui seront choisis (rapport des surfaces) et auront donc une représentativité limitée.

3.2. Support pour les sorties de la plateforme **AquiFR**

La plate-forme de modélisation **AquiFR** (<https://www.geosciences.ens.fr/recherche/projets/aqui-fr>) fournit des chroniques piézométriques journalières sur un ensemble de piézomètres ainsi que des données maillées mensuelles sur l'ensemble des grilles des modèles.

Le Tableau 2 fournit un descriptif des modèles hydrogéologiques spatialisés implémentés dans **AquiFR** et utilisés dans le cadre du projet Explore2. Certains modèles ont été développés avec le code de calcul Marthe, d'autres avec le code de calcul EauDyssée. Ces modèles représentent des systèmes aquifères multicouches et simulent les variations de hauteurs de nappe sur des grilles spatialisées caractérisées par un nombre de couches et une résolution spatiale qui varient selon le modèle. Le modèle de la Somme représente, par exemple, la nappe de la Craie Séno-Turonienne sur une grille de résolution spatiale de 500 m, affinée à 100 m le long du linéaire de la Somme. Le modèle de la Seine représente le système aquifère multicouche du bassin parisien sur six couches sur une grille dont la résolution varie de 1 km à 4 km.

Tableau 2 : Descriptif des modèles hydrogéologiques spatialisés présents dans la plate-forme **AquiFR**.

Code de calcul	Modèle	Nombre de couches	Nombre de mailles	Résolution spatiale du maillage	Référence de la version du modèle disponible dans AquiFR
Marthe	Somme	1	66 924	100 m/500 m	Amraoui et al. (2014)
	Nord Pas-de-Calais	10	226 077	500 m	Amraoui et al. (2017)
	Basse-Normandie	10	93 800	100 m/250 m	Croiset et al. (2013)
	Poitou-Charentes	8	90 084	1 km	Douez et al. (2011)
	Alsace	3	40 947	125 m	Noyer and Elsass (2006)
	Tarn-et-Garonne	2	36 442	250 m	Bardeau et al. (2016)
EauDyssée	Marne-Loing	4	66 235	250 m/500 m/1 km	Viennot and Abasq (2013)
	Marne-Oise	2	45 904	250 m/500 m/1 km	Viennot and Abasq (2013)
	Seine-Eure	1	57 306	250 m/500 m/1 km	Viennot and Abasq (2013)
	Seine-Oise	4	87 178	250 m/500 m/1 km	Viennot and Abasq (2013)
	Seine	6	41 609	1 km/2 km/ 4 km	Viennot (2009)
	Loire	3	37 620	1 km/2 km	Monteil et al. (2011)

AquiFR fournit des charges piézométriques mensuelles moyennes simulées en chaque point de grille de chaque modèle, et pour une période de simulation donnée. Au total, l'ensemble des modèles comptabilisent 890 126 mailles.

Il est possible de se restreindre aux couches aquifères « affleurantes » de chaque modèle, c'est-à-dire à la couche aquifère la plus haute rencontrée en chaque point de grille de chaque modèle. Ce choix se justifie entre autre par le fait que parmi l'ensemble des piézomètres disponibles pour l'évaluation d'**AquiFR**, 80% d'entre eux captent la couche affleurante des modèles d'**AquiFR**. Les résultats d'**AquiFR** sont fournis sur une grille 2D propre à chaque modèle qui parfois se superposent. Pour les points de grille où il y a superposition (par exemple, entre la Somme et le Nord-Pas-de-Calais), la priorité est donnée au modèle présentant les meilleures performances sur les points d'évaluations. Cet ordre de priorité est celui correspondant à l'ordre de présentation des modèles dans le Tableau 2.

Le domaine spatial couvert par les modèles est représenté sur la Figure 4 et le maillage des modèles sur la Figure 5. Les couleurs représentent la géologie des couches aquifères affleurantes de chaque modèle selon l'ordre de superposition du Tableau 2. Les couleurs avec des nuances de jaune correspondent à un contexte géologique récent (Néogène à Quaternaire), associé à des formations alluvionnaires ou limoneuses (Nord Pas de Calais) ou à des formations calcaires (calcaires de Beauce des modèles Loire et Seine). Les teintes

orange représentent les formations sableuses et calcaires du Paléogène à l'Oligocène du centre du Bassin Parisien, et les argiles du nord de la France. Les zones en vert correspondent aux formations du Crétacé associées en particulier aux formations crayeuses du bassin parisien. Les secteurs bleus correspondent aux formations calcaires du Jurassique, et enfin ceux de couleur rose au socle ancien semi-perméable.

Chaque modèle dispose de sa propre grille de simulation 2D, de sa propre projection géographique, et de sa propre résolution, qui peut varier au sein du même modèle. Cette représentation hétérogène complique la représentation et la mise à disposition de ces données. C'est pourquoi dans Explore2 il est proposé de projeter les résultats des modèles sur une grille uniforme de résolution 1 km. La résolution de 1 km est une résolution intermédiaire vis-à-vis des résolutions proposées par chaque modèle (Tableau 2). Cette grille reprend la grille SAFRAN de 8 km × 8 km, désagrégée à la résolution de 1 km. Pour chaque point de grille à 1 km, il y aura une estimation de la piézométrie moyenne. Cette estimation est obtenue par moyenne pondérée des valeurs calculées par les modèles sur la grille de simulation. La moyenne est pondérée car chaque point de grille de simulation ne contribue pas avec le même poids à la valeur moyenne sur une maille à 1 km, les grilles des modèles à plus fine résolution n'étant pas forcément alignées avec la grille à 1 km.

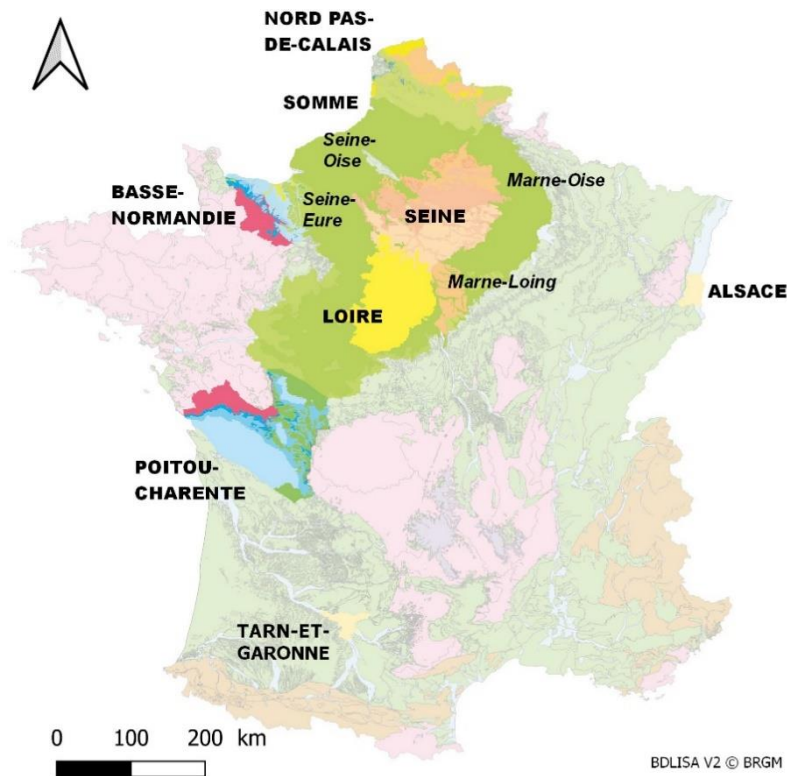


Figure 4 : Domaines spatiaux couverts par les modèles hydrogéologiques de la plateforme AquifR utilisés dans Explore2. Le fond de carte correspond à la Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères (BDLISA) disponible à l'échelle de la France (<https://bdlisa.eaufrance.fr/>).

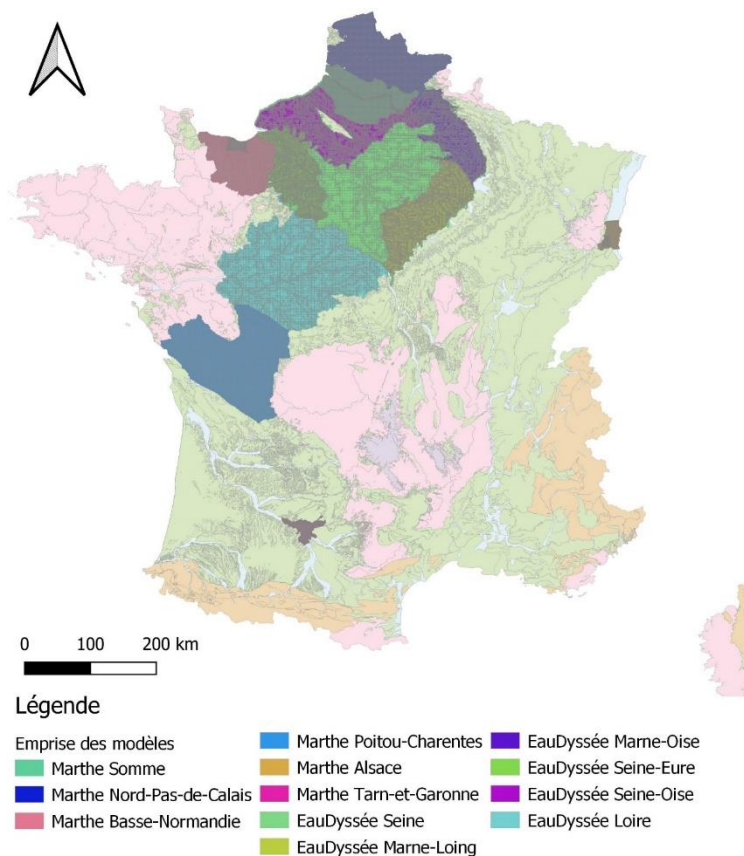


Figure 5 : Maillage brut affleurant de chaque modèle

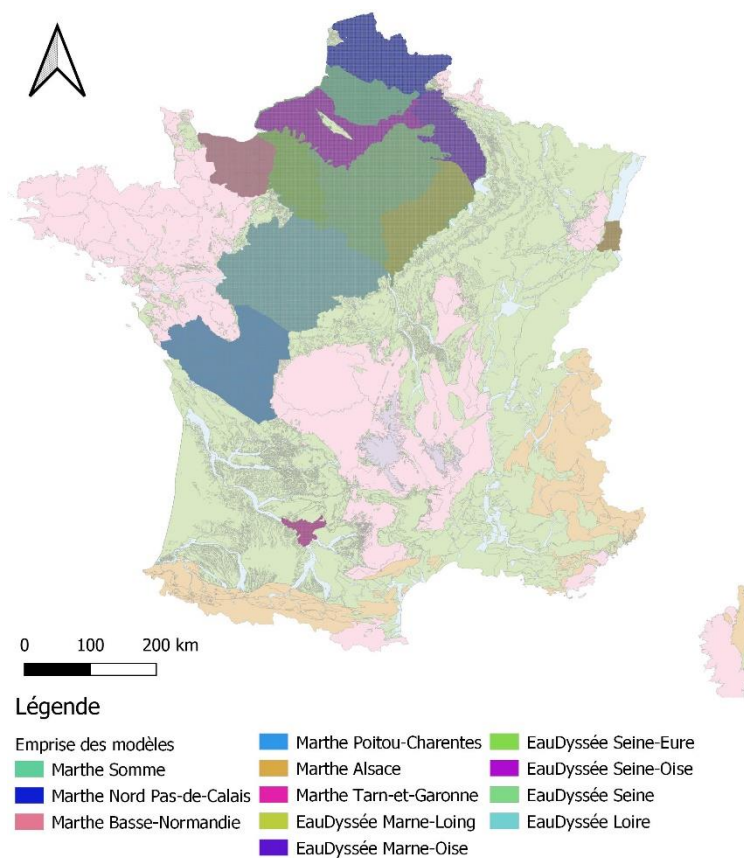


Figure 6 : Maillage à 1 km utilisé dans Explore2 pour les sorties d'AquiFR

La Figure 7 illustre le cas d'un zoom sur une partie du modèle Basse-Normandie. La grille 1 km, en rouge, est décalée par rapport à la grille du modèle, en noir. Les projections des deux maillages diffèrent et une partie du maillage du modèle est à la résolution de 200 m. Les charges à 1 km sont obtenues en réalisant la moyenne pondérée des charges du modèle dans chaque maille 1 km, la pondération correspondant à la surface contributive de chaque maille du modèle dans la maille à 1 km.

La Figure 8 montre un deuxième exemple pour le modèle Marne-Oise. Le modèle ayant été construit à partir de la grille 8 km des données de forçages climatiques utilisées dans le projet Explore2 (SAFRAN, DRIAS 2020), les contours des mailles à 1 km se superposent.

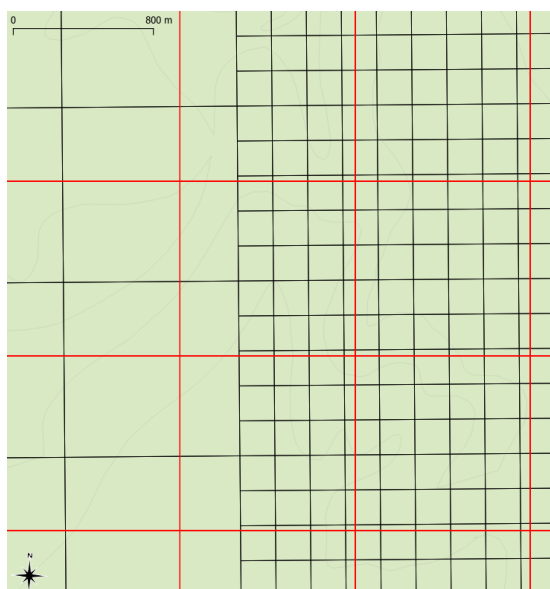


Figure 7 : Superposition du maillage à 1 km (rouge) sur le maillage du modèle Basse Normandie (noir). Les projections des deux maillages diffèrent et une partie du maillage du modèle est à la résolution de 200 m. Les charges à 1 km sont obtenues en réalisant la moyenne pondérée des charges du modèle dans chaque maille 1 km, la pondération correspondant à la surface contributive de chaque maille du modèle dans la maille à 1 km

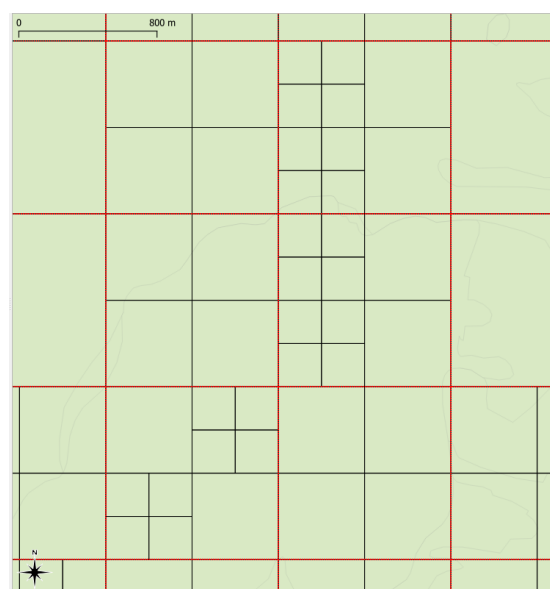


Figure 8 : Exemple de superposition du maillage à 1 km sur le maillage du modèle Marne-Oise

Les données fournies dans le cadre d'Explore2 le seront pour les couches aquifères affleurantes sur la grille 1 km. Cette grille compte 139 042 mailles. S'ajouteront les piézomètres choisis pour l'évaluation des modèles hydrogéologiques.

3.3. Support pour le MOdèle Nord-Aquitain (MONA)

Le MOdèle Nord Aquitain (**MONA**), modèle hydrodynamique d'extension régionale, répond principalement à des problématiques de nappes profondes à renouvellement lent, principalement par drainance (flux d'eau principalement vertical) (Pédron *et al.*, 2008). Il utilise le code de calcul Marthe (Thiéry, 2014), permettant de modéliser la partie nord du Bassin aquitain avec une superficie de 46 032 km² (Figure 9). Il permet de représenter, avec une taille de maille de 2 km de côté, 15 couches aquifères et 14 couches épontes, soit 66 953 mailles de calcul effectives. Le nombre de mailles dans chaque couche aquifère du modèle est donné dans le Tableau 3.

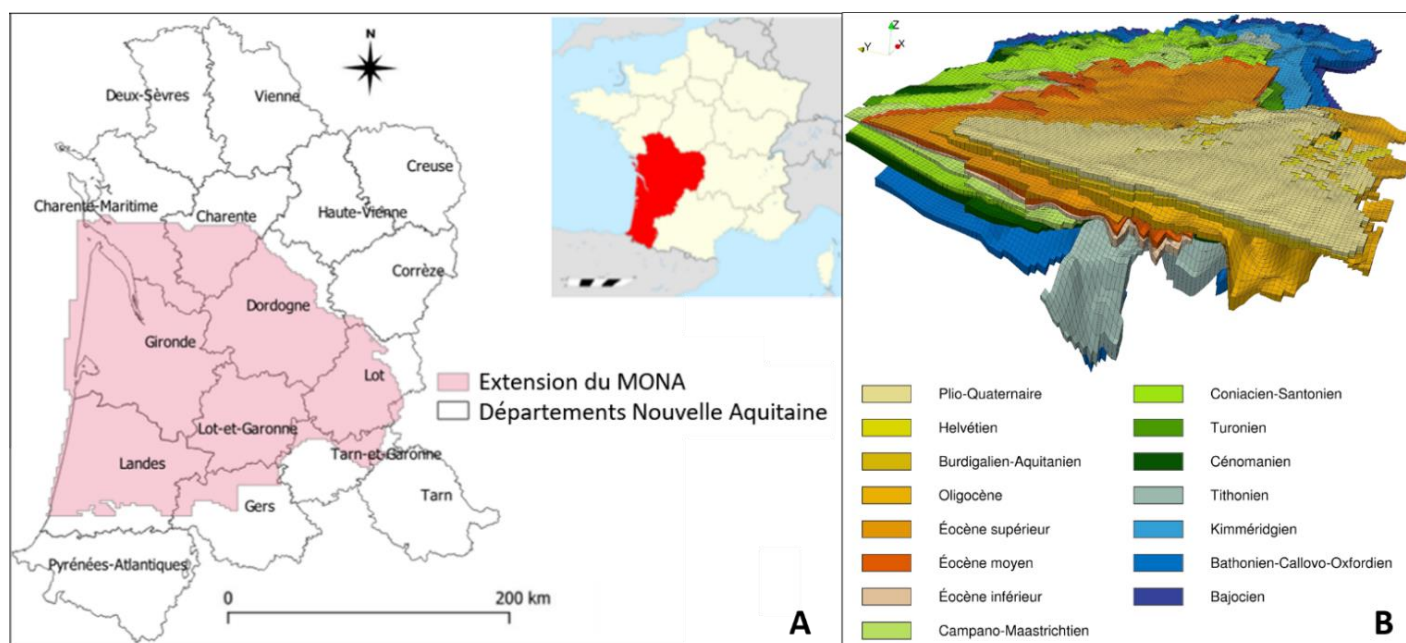


Figure 9 : Extension de la zone modélisée intégrant le département de la Gironde, le sud de la Charente et de la Charente-Maritime, le nord-ouest du Gers, le Lot-et-Garonne, l'essentiel du département de la Dordogne et une grande partie des départements du Lot et des Landes (A) et vue 3D des 15 couches aquifères modélisées dans le MONA (B)

Tableau 3 : Nombre de mailles et superficie de chaque couche du MONA

Formation	N° Couche	Nombre de mailles	Superficie (km ²)
Plio – Quaternaire	1	2841	11364
Helvétien	2	2227	8908
Aquitainien-Burdigalien	3	3161	12644
Oligocène	4	4055	16220
Éocène supérieur	5	3899	15596
Éocène moyen	6	4331	17324
Éocène inférieur	7	4326	17304
Campano-Maastrichtien	8	4337	17348
Coniacien-Santonien	9	6218	24872
Turonien	11	6667	26668
Cénomanién	12	5772	23088
Tithonien	13	1838	3752
Kimméridgien	14	3381	13524
Bathonien-Callovo-Oxfordien	15	7856	31424
Bajocien	16	6044	24176

Le **MONA** permet de simuler les charges hydrauliques dans chacune des mailles aquifères au pas de temps annuel. Dans le cadre d'Explore2, on se propose de restituer les résultats de simulation sur quatre principaux aquifères : les aquifères de surface et de subsurface, Plio-Quaternaire et Aquitainien et les aquifères profonds de l'Oligocène et l'Eocène moyen. Le renouvellement de cette ressource est assuré par drainance entre

aquifères, ou directement par la recharge par les eaux de pluie sur les zones d’affleurement. Dans un contexte de changement climatique, les nappes libres affleurantes ou sub-affleurantes sont directement vulnérables aux variations de recharge et notamment aux épisodes extrêmes de sécheresse dont la fréquence risque d’augmenter. Les aquifères profonds, fortement sollicités pour l’alimentation en eau potable, servent d’ores et déjà d’alternatives aux eaux de surface pour pallier la diminution de la disponibilité de ces ressources. Si les nappes profondes sont peu sensibles aux fluctuations saisonnières et interannuelles, elles restent vulnérables aux changements globaux, de manière indirecte et retardée. Dans ce contexte, il paraît nécessaire de quantifier la résilience de ces aquifères profonds au changement climatique. L’extension de ces couches est représentée en Figure 10 avec un maillage de 2 km de côté.

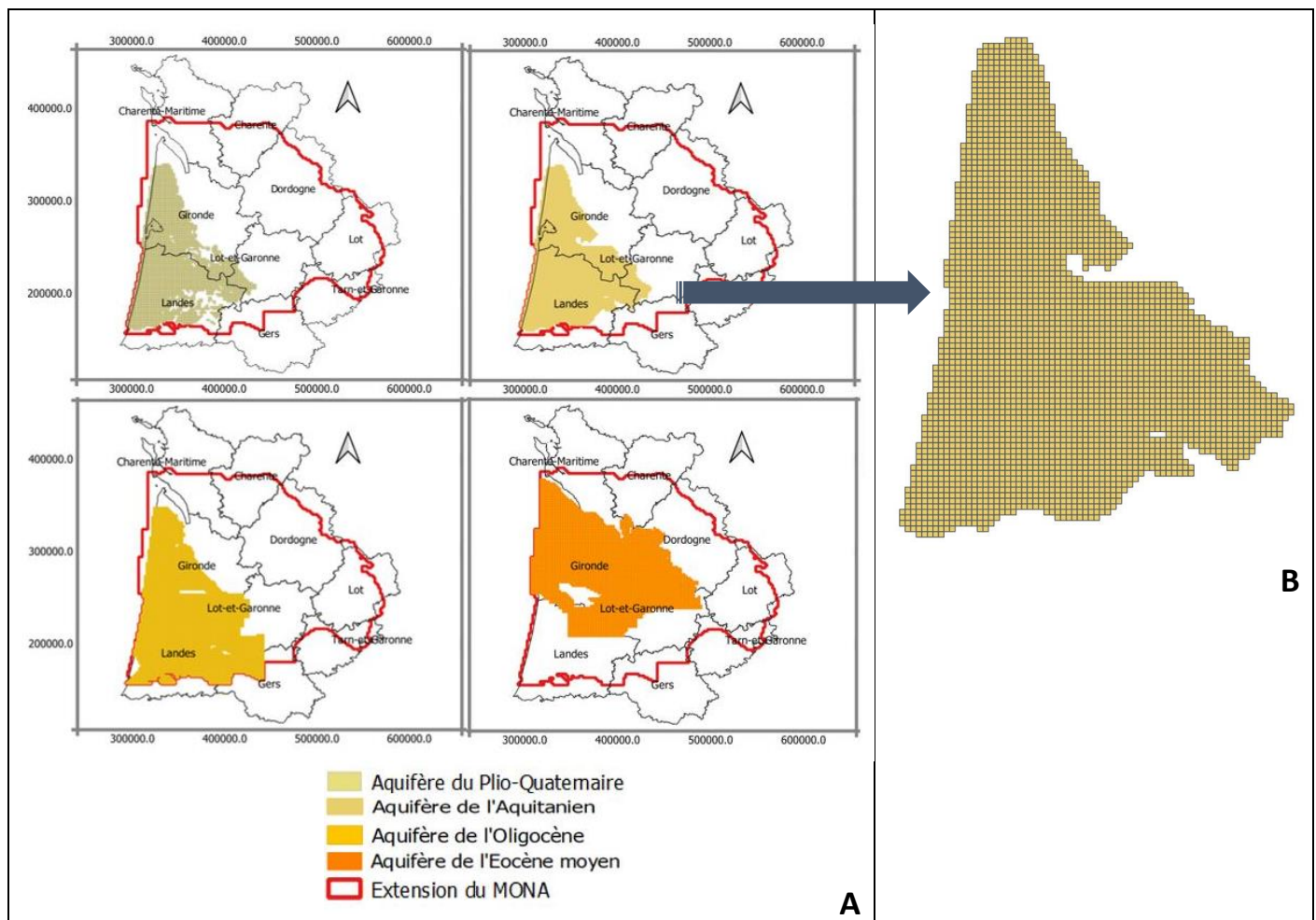


Figure 10 : Extensions et maillages des couches du MONA considérées dans Explore2 (A) et zoom sur l’aquifère de l’Aquitanien (B)

3.4. Des simulations complémentaires sur des piézomètres

D’autres projections de niveaux piézométriques viendront enrichir les données fournies sur les grilles des modèles hydrodynamiques **AquiFR** et **MONA**. Il s’agit :

- de simulations issues du modèle hydrologique **EROS-Bretagne**, qui, outre des estimations de débits, se cale sur des niveaux de nappes et en fournit des projections,
- de sorties additionnelles des modèles **AquiFR** et **MONA**.

sur un ensemble de piézomètres (Figure 11), tous répertoriés dans les banques de données publics ADES (<https://ades.eaufrance.fr/>) et Hub'Eau (<https://hubeau.eaufrance.fr/>) et identifiés par un numéro « BSS » (code national de l’ouvrage souterrain au sein de la Banque du Sous-Sol). Les données fournies aux 41

piézomètres pour le modèle **EROS-Bretagne**, 724 pour **AquiFR**, et 415 pour le **MONA** sont des chroniques temporelles d'évolution des niveaux de nappe au droit de ces points en périodes historiques et futures au pas de temps journalier pour **AquiFR** et **EROS-Bretagne**, et au pas de temps annuel pour le **MONA**.

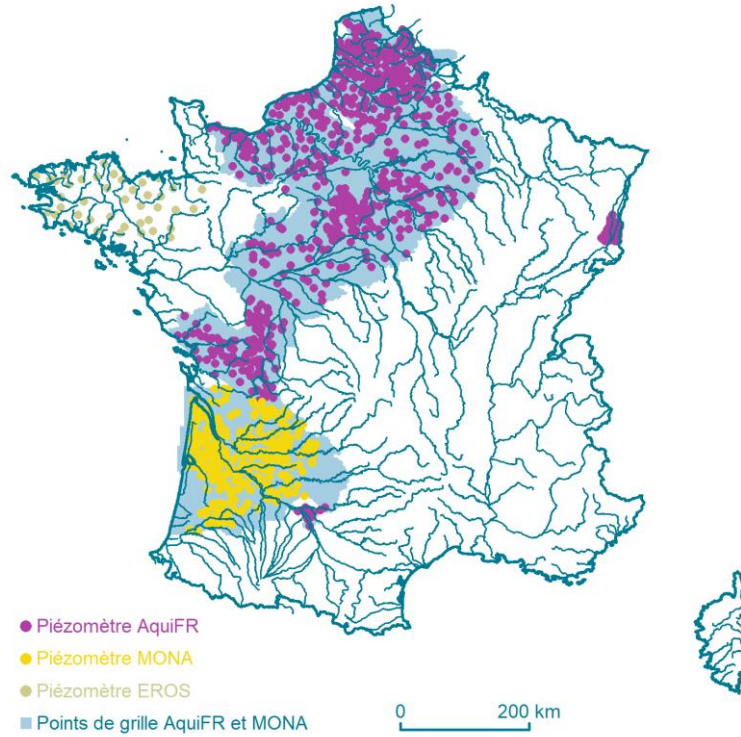


Figure 11 : Points de simulation de niveaux piézométriques par modèle.

4. Conclusion

Ce rapport présente l'ensemble des points de simulation pour l'hydrologie de surface et l'hydrologie souterraine avec l'ambition d'accroître leur nombre par rapport au précédent exercice Explore2070 sous contraintes diverses.

Pour l'hydrologie de surface, l'objectif était de proposer des points de simulations répartis uniformément pouvant répondre à des intérêts divers (gestion, connaissance, milieux aquatiques) avec une contrainte sur la surface drainée minimale imposée par la résolution spatiale des projections climatiques (64 km²). Ainsi, nous nous sommes appuyés sur des points référencés dans des réseaux de surveillance et des points de gestion nationaux pérennes et sur les points de simulation du projet Explore2070 pour assurer une continuité entre les deux exercices. Nous avons abouti à 4369 points de simulation.

Pour l'hydrologie souterraine, du fait de résolutions spatiales hétérogènes entre modèles hydrogéologiques, un travail de croisement des maillages a été réalisé et, finalement, les points retenus se positionnent sur une grille régulière de maille 1 km pour **AquiFR** compatible avec la maille des forçages climatiques et de maille 2 km pour **MONA**. Concernant la recharge potentielle, l'enjeu a été d'identifier un découpage de la France métropolitaine cohérent avec l'hydrogéologie, pour que les valeurs estimées soient représentatives de secteurs homogènes, et la même contrainte de 64 km² pesant sur l'hydrologie de surface a été considérée. Finalement le choix s'est orienté sur le découpage en masses d'eau souterraine (MESO).

Pour ces deux supports de restitution, un regard a été porté sur un gestion « économe » de données (masse de données « raisonnable » pour faciliter son traitement et son stockage), ce qui a conduit au choix d'une résolution plus grossière que la maille de calcul d'**AquiFR**, et à l'élimination de points jugés trop voisins (en termes de coordonnées et de surfaces drainées) issus des différents réseaux nationaux pour l'hydrologie de surface. Les simulations seront également fournies sur un ensemble de piézomètres incluant les points d'évaluation (Sauquet *et al.*, 2002).

Les prochaines étapes vont consister à positionner ces points de simulation dans les modèles hydrologiques qui ont chacun leur représentation du réseau hydrographique. Certains points de simulation ne pourront pas être intégrés, soit du fait d'imperfection des réseaux hydrographiques des modèles hydrologiques, soit du fait de coordonnées imprécises de certains points parmi les 4369 référencés. A la date du 01/07/2022, 140 parmi les 4369 points de simulation n'étaient pas positionnés dans deux modèles **GRSD** et **SMASH**.

Il faut noter que les modèles hydrologiques ne fourniront pas tous des simulations sur ces ensembles de points (par exemple, le modèle **J2000** est déployé sur la Loire et le Rhône et le modèle **SIM2** ne peut pas fournir de sorties en dehors des points définis dans Explore2070). De fait, tous les points ne bénéficieront pas du même nombre de simulations. Enfin, ce rapport présente le maillage élémentaire pour la recharge potentielle mais des estimations aux points de simulation seront fournies par croisement entre contours des bassins versants et délimitation en MESO.

5. Références

- Amraoui, N., Castillo, C., Seguin, J.-J. (2014) Évaluation de l'exploitabilité des ressources en eau souterraine de la nappe de la craie du bassin de la Somme. Rapport final. BRGM/RP-63408-FR.
- Amraoui *et al.* (2017). AQUI-FR, un système multi-modèle hydrogéologique à l'échelle nationale : travaux BRGM 2015-2016. BRGM/RP-66683-FR.
- Bardeau *et al.* (2016). Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne - Résultats de la modélisation et outil de gestion des prélèvements dans le Tarn-et-Garonne. Rapport final. BRGM/RP-65583-FR.
- Brugeron, A., Paroissien, J.B., Tillier, L. (2018). Référentiel hydrogéologique BDLISA version 2 : Principes de construction et évolutions. Rapport final. BRGM/RP-67489-FR.69.
- Chandesris, A., Malavoi, J.-R., Souchon, Y., Wasson, J.-G., Mengin, N. (2007). Le système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau (SYRAH-CE) : un outil multi-échelles d'aide à la décision pour la gestion des cours d'eau. *Ingénieries*, 50, 77-80.
- Croiset, N., Wuilleumier, A., Bessière, H., Gresselin, F. (2013). Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 2 : construction et calage du modèle hydrogéologique. BRGM/RP-62648-FR.
- Douez, O., Bichot, F., Petit, L. (2011). Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Jurassique de Poitou-Charentes. BRGM/RP-59288-FR.
- Lanini, S., Caballero, Y., Le Cointe, P., Béranger, S., Arnaud, L., Pinson, S. (2019), Recharge des aquifères à l'échelle de la France : estimation, évolution et incertitudes associées. Colloque SHF-UNESCO : Sécheresses, étiages et déficits en eau, déc. 2019, Paris, France. <hal-02159826>
- Mardhel, V., Normand, M. (2006). Mise en œuvre de la DCE. Identification et délimitation des masses d'eau souterraine. Mise à jour 2005. BRGM/RP 54605-FR.
- Monteil, C. (2011) Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage. Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Nowak, C., Durozoi, B. (2012). Observatoire National Des Etiages, Note technique, ONEMA.
- Noyer, M.-L., Elsass, P. (2006) Modélisation de la salure profonde au droit et en aval du Bassin Potassique - Rapport final. BRGM/RP-54389-FR.
- Pella, H., Lejot, J., Lamouroux, N., Snelder, T. (2012). Le réseau hydrographique théorique (RHT) français et ses attributs environnementaux. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 18, 317–336.
- Sauquet, E., Vergnes, J.-P., Thirel, G., Strohmenger, L. (2022). Identification de stations hydrométriques et piézomètres pour l'évaluation des modélisations hydrologiques et hydrogéologiques. Rapport Explore2. <<https://hal.inrae.fr/hal-03940233>>
- Viennot, P. (2009) Modélisation mathématique du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine. Représentation différenciée des aquifères du Tertiaire/Intégration des prélèvements anthropiques. Centre de Géosciences, Fontainebleau. R071128PVIE.
- Viennot, P., Abasq, L. (2013) Modélisation de la pollution nitrique des grands aquifères du bassin de Seine-Normandie à l'échelle des masses d'eau. Développement des sous modèles hydrogéologiques "Craie" du bassin de la Seine. Rapport final. Centre de Géosciences, Fontainebleau.
- Wasson, J.-G., Chandesris, A., Pella, H., Blanc, L. (2002). Typology and reference conditions for surface water bodies in France: the hydro-ecoregion approach. *TemaNord*, 566, 37–41.