MODÈLES SPATIALISÉS EN HYDROGÉOLOGIE

Colloque - Le Référentiel Géologique des Pyrénées

03 juin 2019 - Pau

O. Douez (BRGM, Bordeaux)

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

INSTITUT CARNOT brgm

Géosciences pour une Terre durable
brgm

MODÈLES SPATIALISÉS EN HYDROGÉOLOGIE

Colloque - Le Référentiel Géologique des Pyrénées

03 juin 2019 - Pau

O. Douez (BRGM, Bordeaux)

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

INSTITUT CARNOT brgm

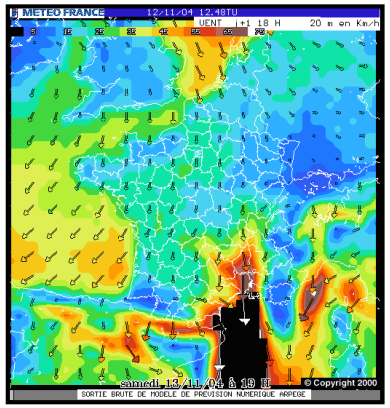
Géosciences pour une Terre durable
brgm

Qu'est-ce qu'un modèle Hydrogéologique ?

Objectif : reproduire une certaine « réalité » à partir de différentes équations mathématiques dans le but de réaliser des simulations ou des prévisions dans le temps.

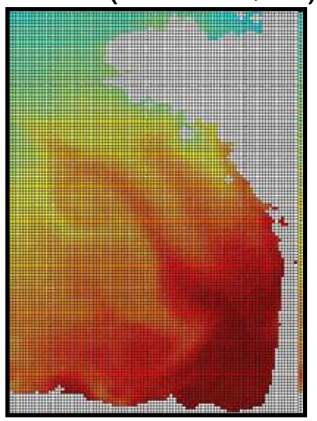
Quelques exemples de modèles…

Circulations atmosphériques (MétéoFrance,…)



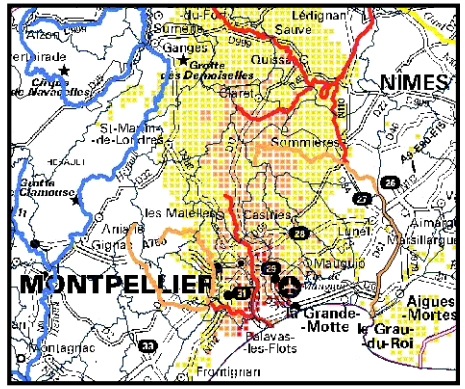
Météo France

Circulations océaniques (Ifremer,…)



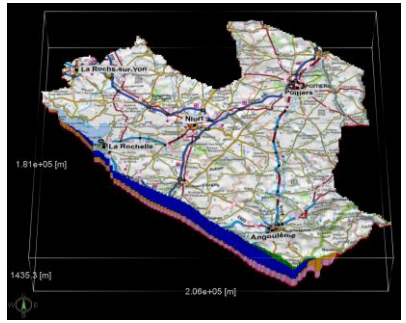
Ifremer

Prévision des crues (IRSTEA,…)



Irstea

… et les modèles hydrogéologiques qui permettent de simuler les écoulements souterrains (modèles spatialisés)



Modèle hydrogéologique Jurassique du Poitou-Charentes (Douez et al., 2015)

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

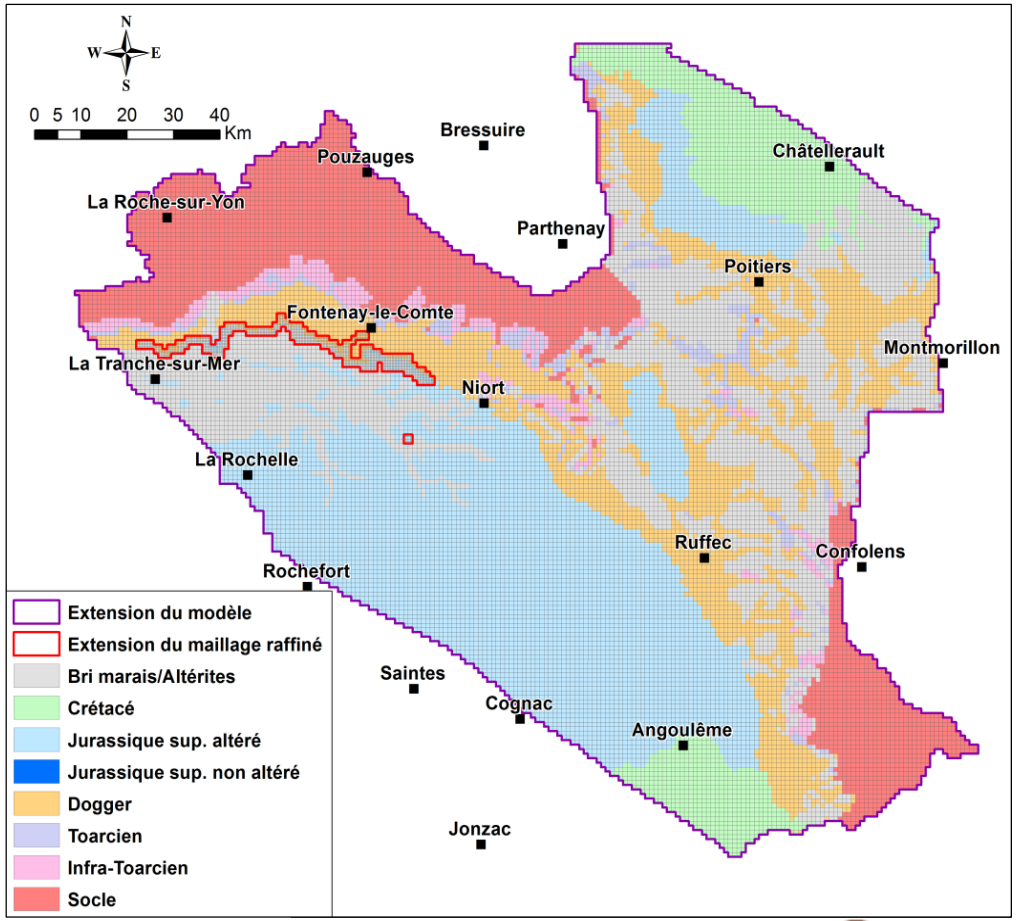
Géosciences pour une Terre durable brgm

Les modèles hydrogéologiques spatialisés

Modèles basés physiquement (mécanistes)

→ Représentation du système physique dans sa réalité (simplifiée) - résolution de l'équation générale des écoulements souterrains

Modèles incontournables pour la représentation des systèmes aquifères multicouches, où chaque couche aquifère peut échanger de l'eau par drainance verticale avec les couches sus- et sous-jacentes



Modèle hydrogéologique Jurassique du Poitou-Charentes (Douez et al. 2015)

Un modèle hydrogéologique spatialisé – pour quoi faire?

Un outil de compréhension du fonctionnement d'un système aquifère qui permet :

- D'organiser, comparer, confronter et exploiter numériquement les données collectées sur un site d'étude, dans le but de comprendre
- D'identifier les secteurs en déficit d'informations
- De restituer des niveaux de nappes, des circulations des eaux (+ possibilité d'intégration des principaux cours d'eau : prise en compte des échanges nappes rivières)
- D'estimer des volumes d'eau transitant par les nappes (ou par les cours d'eau) : stockage/déstockage des nappes, bilan hydrogéologique par bassin versant, volume échangé entre les nappes et les cours d'eau, débits des cours d'eau

Un outil de gestion, d'aide à la décision et de prédiction des ressources et/ou de la qualité des eaux qui permet :

- De gérer de façon globale les ressources en eau en tenant compte des prélèvements, des rejets
- D'aider à la détermination volumes prélevables, en lien ou non avec les débits des cours d'eau et/ou des indicateurs piézométriques, voire d'indicateurs de débit de cours d'eau
- D'aider à valider ou non des stratégies d'exploitation
- D'estimer/de prédire l'impact de la réduction ou de l'augmentation des prélèvements, l'influence de nouveaux pompages, la mise en place d'aménagements souterrains (drains, excavation etc…)
- D'optimiser l'implantation d'ouvrages
- D'évaluer l'impact du changement global sur la ressource eau
- De prévoir la migration de pollutions (trajectoires, temps de transfert, concentrations)

Les étapes de la modélisation

1 - Définition du cadre de la modélisation : une modélisation pour quoi faire ? Les objectifs conditionnent le type de modèle à mettre en œuvre : extension, nature des phénomènes à simuler, pas d'espace et de temps, etc.

2 - Collecte, analyse et synthèse des données (+ modèle conceptuel) : hydrogéologiques, géologiques, météorologiques, etc.

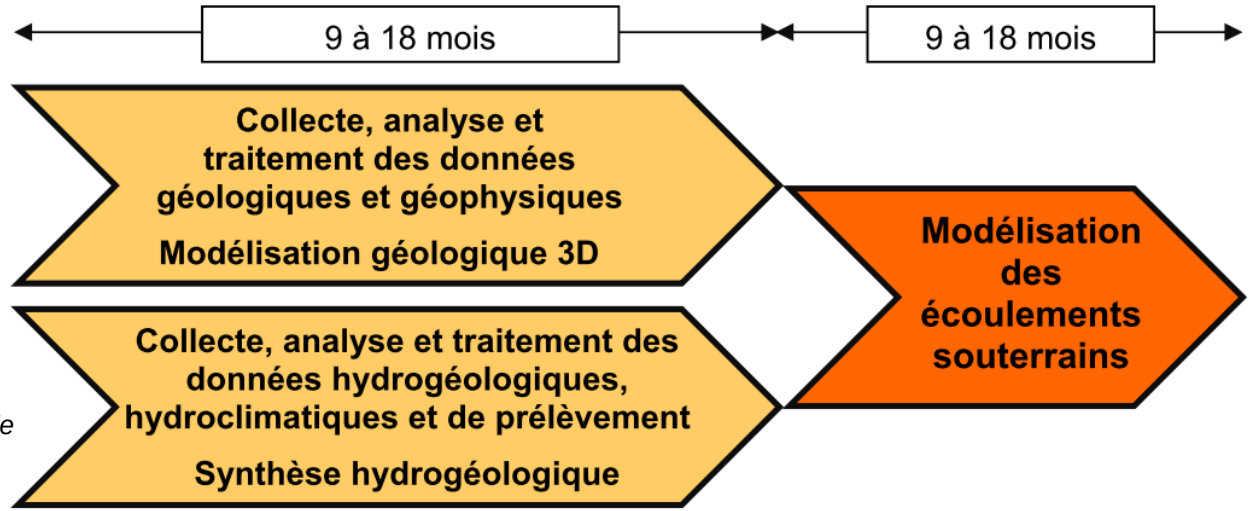
3 - Construction optionnelle d'un modèle géologique 3D, fonction de la complexité, de l'étendue de la zone à modéliser

4 - Construction du modèle d'écoulement : création du maillage et renseignement de chaque maille par les données (géométrie du système aquifère, propriétés hydrogéologiques, conditions aux limites, entrées/sorties hydrauliques,…)

5 - Calage du modèle (ou calibration) recherche des « meilleures » valeurs de paramètres permettant d'obtenir une bonne adéquation entre observations et valeurs calculées par le modèle : niveaux piézométriques, débits des cours d'eau etc.

6 - Validation du modèle

7 - Exploitation du modèle calé



Chronogramme indicatif des grandes étapes d'une modélisation hydrogéologique régionale (Barthélemy et Seguin, 2016)

Les données nécessaires

...Nécessité de récolter et de mettre en forme de nombreuses données (modèle hydrodynamique simple)

Géologie

- Surface topographique : Modèle Numérique de Terrain
- Limites/Substratum des formations
- Cartes géologiques
- Coupes de forage
- Linéaments structuraux
- Harmonisation cartes et coupes
- Coupes sismiques et électriques
- Pendages (affleurements, forages)
- Avis d'experts

Prélèvements en nappes et en cours d'eau

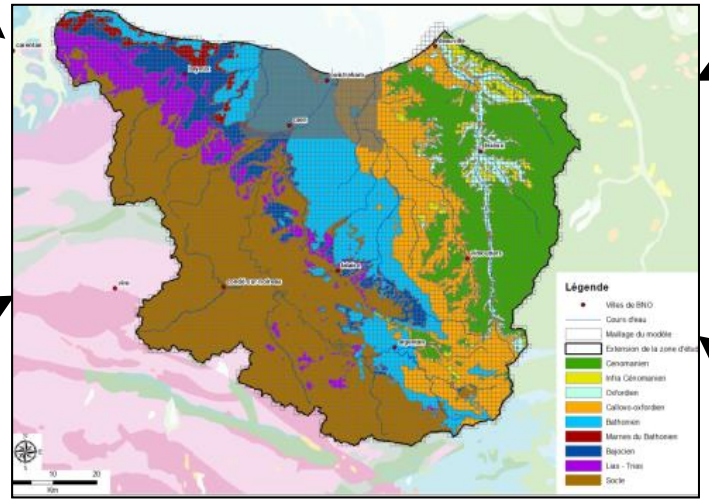
- Chroniques de pompage
- Règles de distribution temporelle
- Distribution en aquifère pour les prélèvements en nappe

Recharge de nappe

- Chroniques pluviométriques
- Zones de Pluie (AURELHY, SAFRAN)
- Zones d'évapotranspiration (ETP)
- Capacité de stockage du sol
- Ruissellement vs. infiltration
- Déphasage induit par la ZNS

Propriétés hydrogéologiques

- Perméabilité, anisotropie
- Emmagasinement libre/captif
- Conditions aux limites
- Observations piézométriques : mesures synchrones / chroniques



Modèle hydrogéologique des aquifères jurassique et crétacé de Basse-Normandie (Wuilleumier et al. , 2013)

Réseau hydrographique

- Arborescence du réseau
- Longueur des tronçons
- Largeur des tronçons
- Pompages en rivière
- Épaisseur de colmatage
- Perméabilité de colmatage
- Observation hydrométriques : chroniques de débits/hauteur des cours d'eau

Les données nécessaires

...Nécessité de récolter et de mettre en forme de nombreuses données (modèle hydrodynamique simple)

Géologie

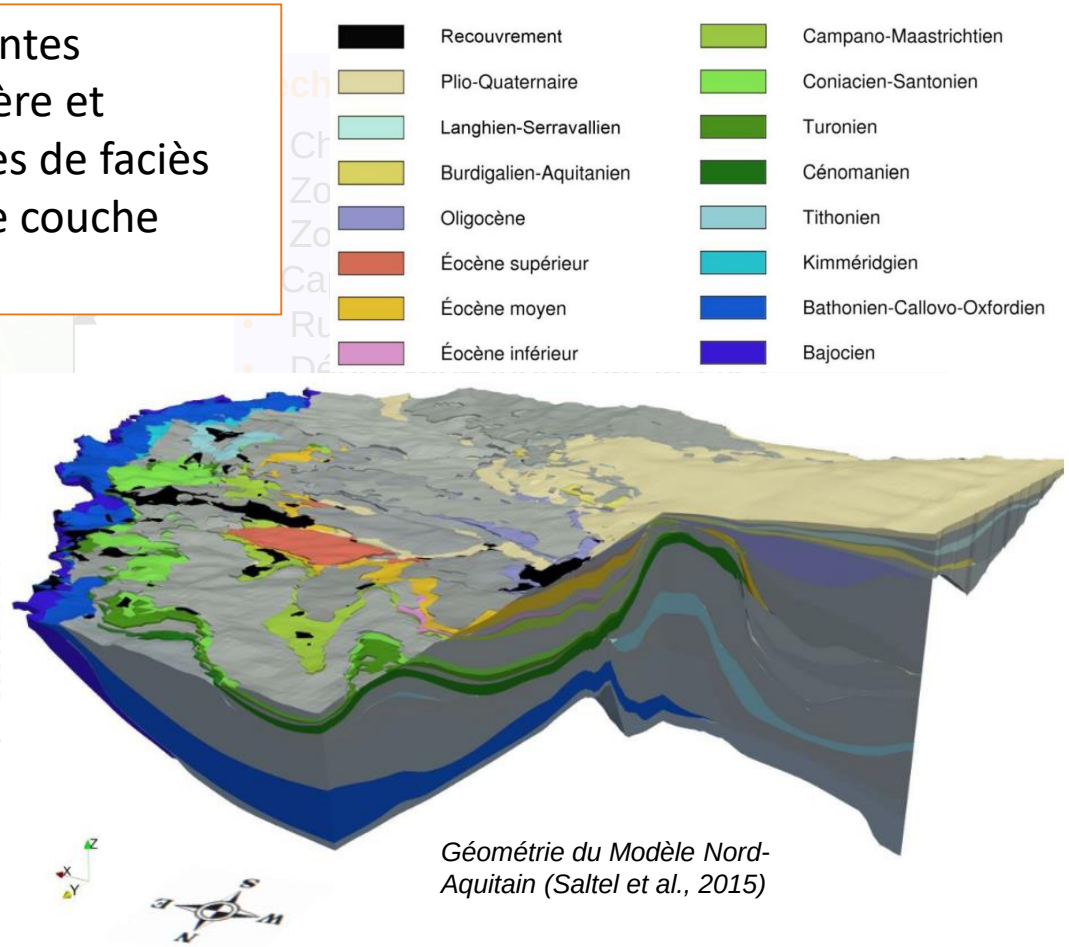
- Surface topographique : Modèle Numérique de Terrain
- Limites/Substratum des formations
- Cartes géologiques
- Coupes de forage
- Linéaments structuraux
- Harmonisation cartes et coupes
- Coupes sismiques et électriques
- Pendages (affleurements, forages)
- Avis d'experts

Propriétés hydrogéologiques

- Perméabilité, anisotropie
- Emmagasinement libre/captif
- Conditions aux limites
- Observations piézométriques : mesures synchrones / chroniques

- Extension des zones affleurantes
- Faciès des formations (aquifère et éponte) et variations latérales de faciès
- Cotes du toit/mur de chaque couche (« hydrogéologique »)

Modèle hydrogéologique des aquifères jurassique et crétacé de Basse-Normandie (Wuilleumier et al. , 2013)

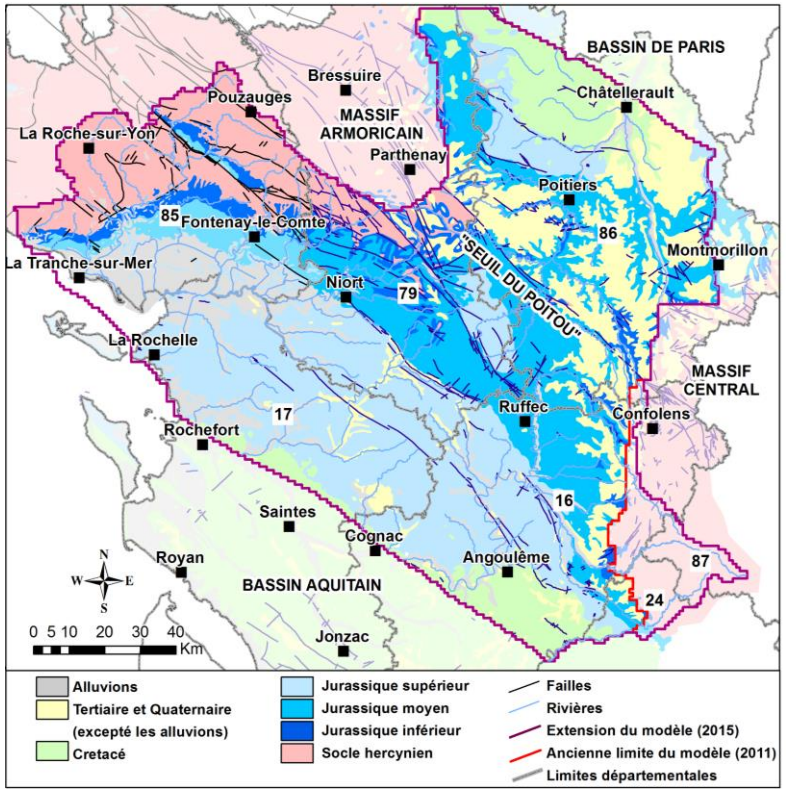


Géométrie du Modèle Nord-Aquitain (Saltel et al., 2015)

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

Le modèle conceptuel

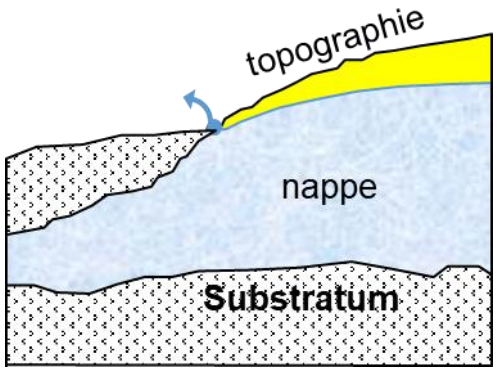
Extension du modèle hydrogéologique Jurassique du Poitou-Charentes retenu – (Douez et al. 2015)



Le modèle conceptuel d'écoulement décrit de façon schématique le système aquifère étudié en précisant notamment :

- l'extension horizontale
- l'extension verticale
- la succession des aquifères et aquitards
- la lithologie et les caractéristiques hydrogéologiques
- les conditions hydrauliques aux limites du système
- les zones de recharge et d'exutoire
- éventuellement le réseau hydrographique à prendre en compte
- etc.

Le modèle d'écoulement est ensuite une transposition numérique du modèle conceptuel, en mettant les données nécessaires à la modélisation au format requis par le code de calcul.



Conceptualisation verticale

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

Géosciences pour une Terre durable brgm

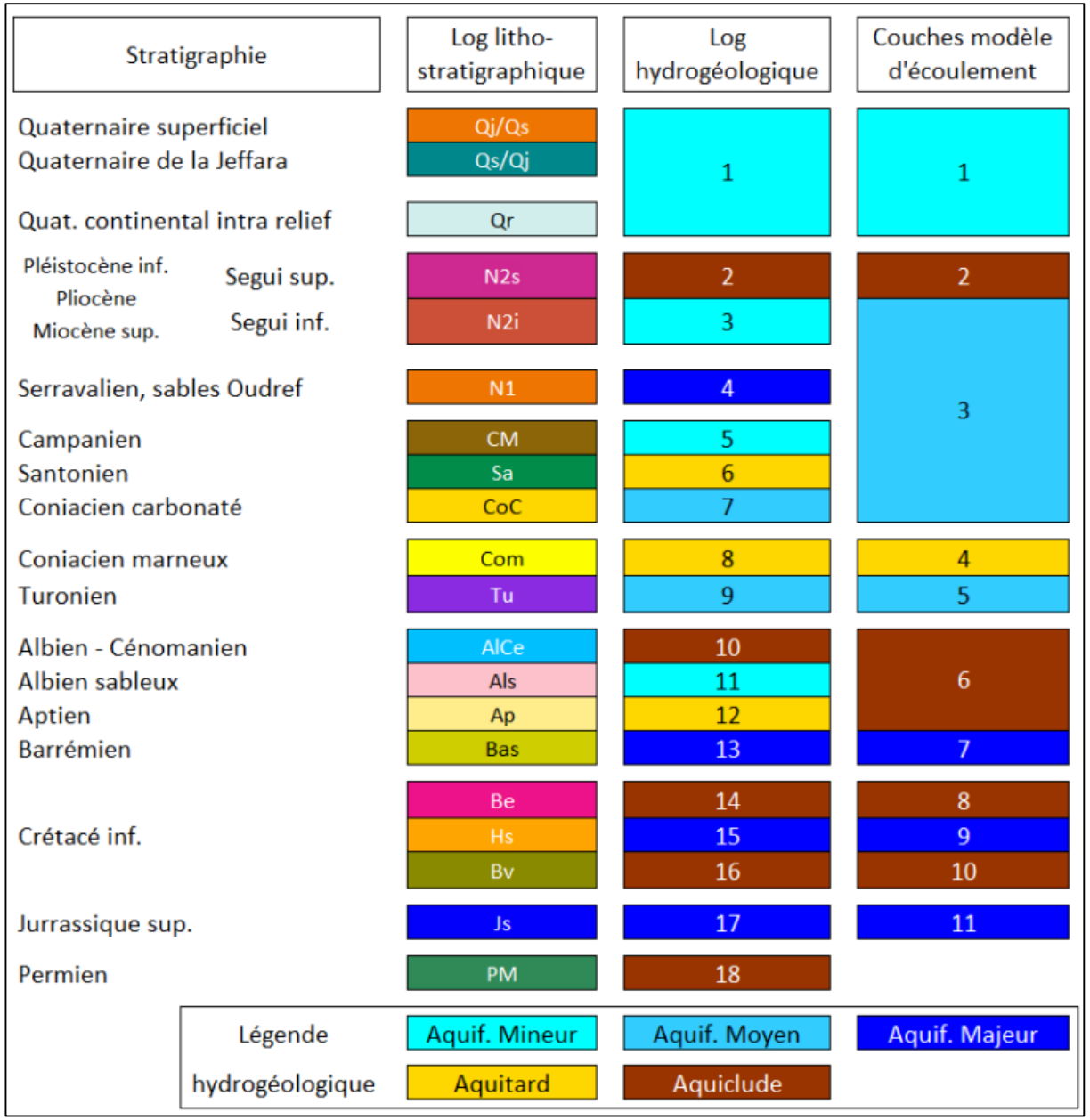
Le modèle conceptuel

Exemple de discrétisation verticale

La série litho-stratigraphique régionale est schématisée sur la base de considérations hydrogéologiques avec le regroupement des formations ayant des propriétés similaires

➔ alternance d'horizons, aquifères et aquitards

D'où la nécessité d'avoir une bonne connaissance géologique des formations en amont de la modélisation hydrogéologique



Système aquifère des plaines côtières de Gabès (Tunisie). Simplifications successives pour condenser les 20 unités litho-stratigraphiques (colonne gauche) en 18 entités hydrogéologiques (col. centrale), puis 11 couches du modèle d'écoulement (col. droite) (Barthélemy et Seguin, 2016)

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

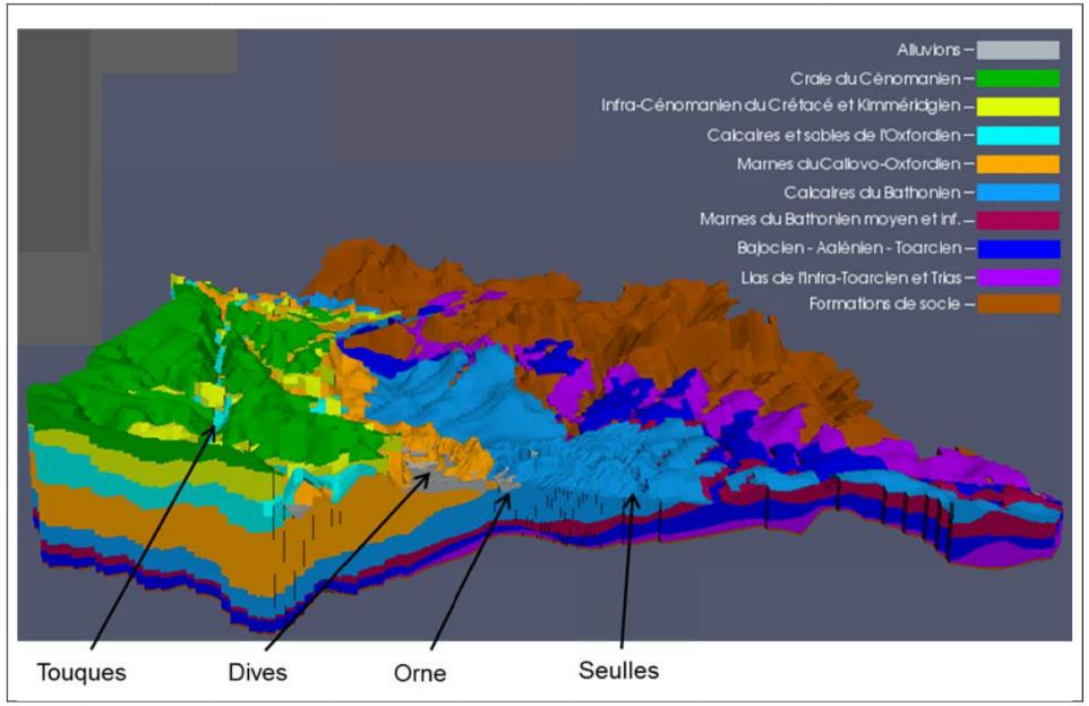
Modélisation géologique 3D …

… pour les systèmes aquifères complexes

En opposition avec les modèles simples, monocouche par exemple

Pour les systèmes aquifères complexes, les difficultés sont de disposer :

- d'une représentation numérique fidèle et cohérente de la structure géologique, représentative de l'empilement des formations plus ou moins perméables, d'extensions variables, qui constituent le système aquifère.
- de la connaissance des accidents structuraux qui peuvent être générateur de discontinuités des écoulements (rejet vertical, nature imperméable ou conductrice)



Modèle géologique des aquifères jurassique et crétacé de Basse-Normandie (Wuilleumier et al. , 2013)

Pour éviter ces difficultés, la meilleure façon de procéder ➔ produire un modèle géologique 3D bien individualisé (à l'aide d'un modeleur géologique), préalable à la modélisation hydrogéologique de façon à construire la structure géométrique du futur modèle d'écoulement.

➡ Collaboration géologues/hydrogéologues

DES EXEMPLES

Le MOdèle Nord-Aquitain (MONA)

- Le modèle Nord-Aquitain (MONA), développé depuis 1970 est un modèle hydrodynamique initié au départ pour apporter des réponses à la problématique de la baisse continue des niveaux de la nappe de l'Eocène en Gironde

- Modèle conçu pour répondre notamment aux problématiques des nappes profondes

- Modèle ayant connu depuis le début des années 1990 de nombreuses évolutions du fait de l'amélioration des connaissances et des outils de modélisation (maille de 5 Km à 500 m, de 4 à 30 couches, …)

DISPOSITION 94 : MODÈLE MATHÉMATIQUE NORD AQUITAIN DU BRGM

Le Modèle mathématique Nord Aquitain (MONA) est le modèle de référence pour l'élaboration des règles de gestion des nappes profondes, et notamment la fixation ou la révision des volumes maximum prélevables objectifs (VMPO) prévus par la disposition 2 du SAGE.

Les nouveaux prélèvements susceptibles d'avoir un impact régional sur les nappes feront l'objet d'une simulation au sein du MONA pour vérification de la compatibilité avec les règles de gestion.

La mise à jour du MONA est placée sous la maîtrise d'ouvrage et le financement du BRGM. Le modèle est mis à jour tous les ans avec les données de l'année n-2. Les sorties du modèle alimentent le tableau de bord du SAGE (variations des réserves et piézométrie).

Les développements du MONA se font sous la maîtrise d'ouvrage du BRGM en concertation avec les partenaires historiques et l'EPTB des nappes profondes, en vue de répondre aux objectifs du SAGE.

Les données numériques de base du modèle (géométrie, paramètres hydrodynamiques, conditions aux limites, prélèvements) sont publiques. Ces données sont mises à disposition de tout demandeur par le BRGM qui élabore un protocole ad hoc.

L'utilisation du MONA pour des simulations à la demande d'un tiers est cadrée par un protocole précisant notamment les conditions économiques et les délais.

Un Modèle inscrit dans le SAGE Nappes profondes : « *Le MOdèle mathématique Nord Aquitain (MONA) est le modèle de référence pour l'élaboration des règles de gestion des nappes profondes, et notamment la fixation ou la révision des volumes maximum prélevables objectifs (VMPO) prévus par la disposition 2 du SAGE* »

Un modèle opérationnel utilisé

- **Appui police de l'eau** — Impacts de nouveaux ouvrages Ex : Ressources de substitution SAGE NP
- **Schéma directeur Eau potable de Gironde** — Proposition d'implantation de champs captants
- **SAGE NP de Gironde** — VMPO + Révision 2010
- **Appui à la définition des Volumes Prélevables** — Simulations multiples prenant en compte les dernières données INSEE et GIEC
- **Eocène Bergeracois** — Evaluation de la ressource

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

Géosciences pour une Terre durable brgm

DES EXEMPLES

Le MOdèle Nord-Aquitain (MONA)

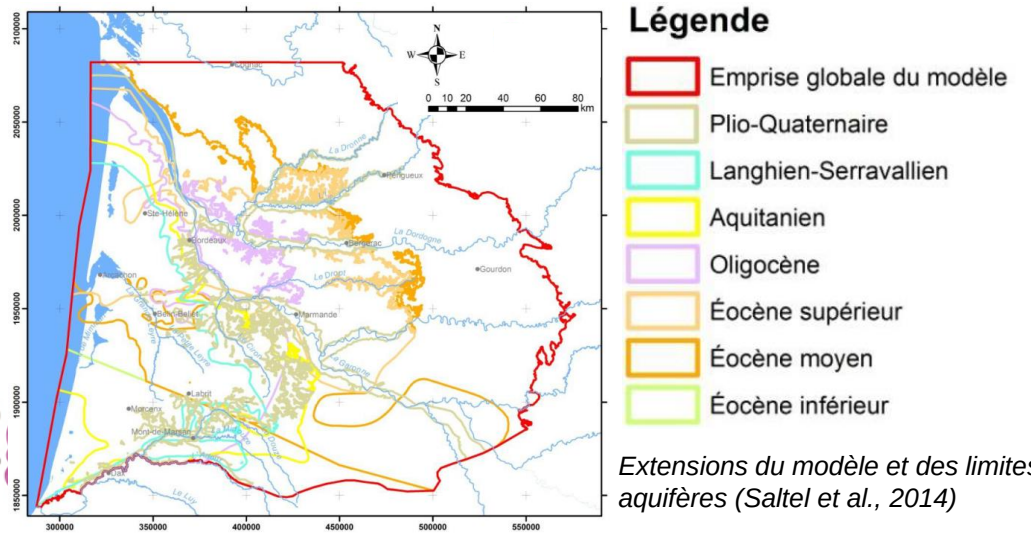
Le modèle hydrogéologie « Version 4 »

La version 4 MONA :

- ~ 50 000 km²
- 30 couches (15 aquifères et 15 épontes)
- maille de 500 m (~ 2 400 000 mailles)
- Prise en compte du réseau hydrographique
- En cours de calage en transitoire (période 1972-2015)

➔ en cours de calage

Les 30 couches du MONA (Saltel et al., 2014)



Extensions du modèle et des limites des aquifères (Saltel et al., 2014)

Code	Description
RECO	Formations de recouvrement et alluvions flandriennes
QUAT	Formations du Quaternaires
EPLS	Éponte au sommet du Langhien-Serravalien
LASE	Aquifère du Langhien-Serravalien
EPAQ	Éponte au sommet de l'Aquitanien
AQUI	Aquifère de l'Aquitanien
EPCM	Éponte Chattien-Miocène
OLNP	Aquifère de l'Oligocène
EPOL	Éponte à la base de l'Oligocène
EOCS	Réservoir supérieur de l'Éocène
EPES	Éponte à la base de l'Éocène supérieur
EOCM	Aquifère de l'Éocène moyen
EPEO	Éponte à la base de l'Éocène moyen
EOCI	Réservoir inférieur de l'Éocène
EPCA	Éponte au sommet du Campanien
CAMP	Aquifère du Campanien
EPCS	Éponte au sommet du Coniacien Santonien
COST	Aquifère du Coniacien-Santonien
EPTU	Éponte au sommet du Turonien
TURO	Aquifère du Turonien
EPCE	Éponte au sommet du Cénomanien
CENO	Cénomanien
EPTI	Éponte au sommet du Tithonien
TITH	Aquifère du Tithonien
EPKI	Éponte au sommet du Kimméridgien
KIMM	Aquifère du Kimméridgien
EPCX	Éponte au sommet du réservoir du Bathonien-Callovo-Oxfordien
BACX	Aquifère du Bathonien-Callovo-Oxfordien
EPBJ	Éponte au sommet du Bajocien
BAJO	Réservoir du Bajocien

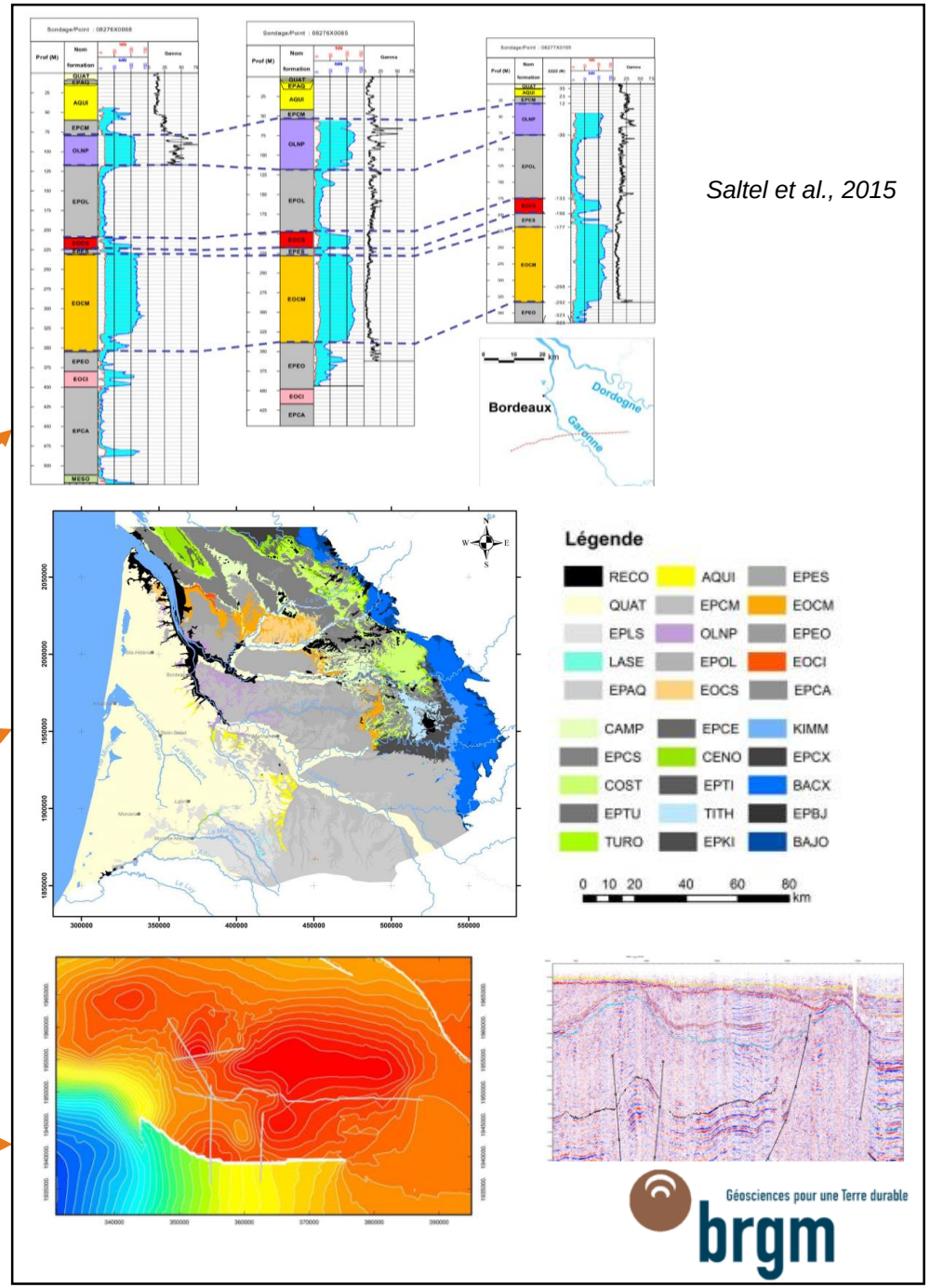
DES EXEMPLES

Le MOdèle Nord-Aquitain (MONA)

… Les travaux en géologie pour aboutir à la « version V4 »

Un modèle géologique (à visée hydrogéologique) construit avec le logiciel GDM (Geological Data Management) et son composant Multilayer (Bourgine, 2010) du BRGM

- Un total de 3 400 forages décrits par près de 15 000 horizons différents
- 343 données diagraphiques numériques sur près de 250 forages (Gamma ray et résistivité)
- 88 cartes géologiques sur l'ensemble de la surface - Source BD LISA Modifié
- Intégration de la carte géologique : mise en cohérence carte géologique / forages
- Intégration des données sismiques



Saltel et al., 2015

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

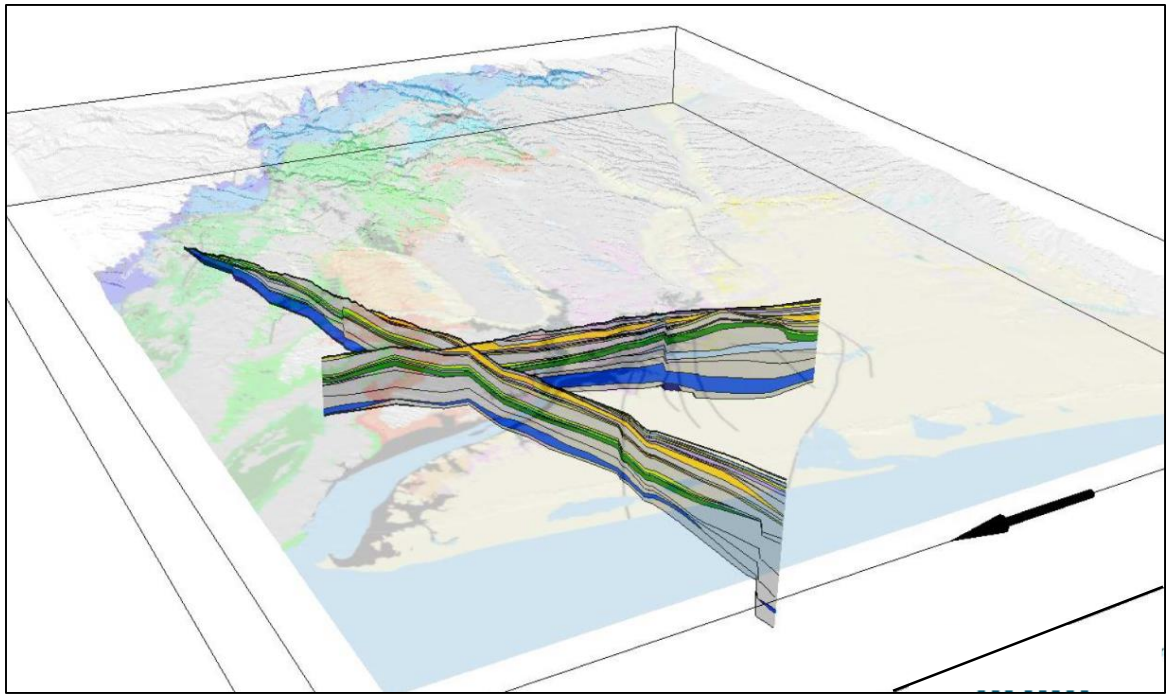
Géosciences pour une Terre durable brgm

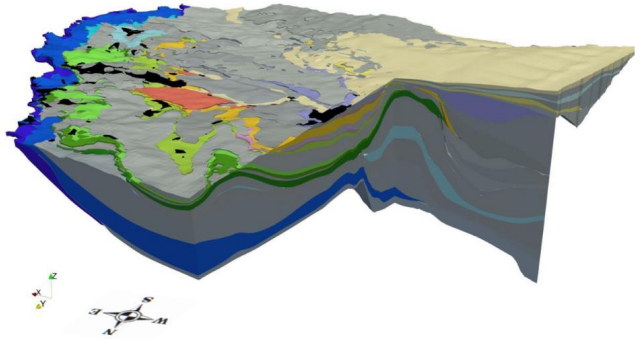
DES EXEMPLES

Le MOdèle Nord-Aquitain (MONA)

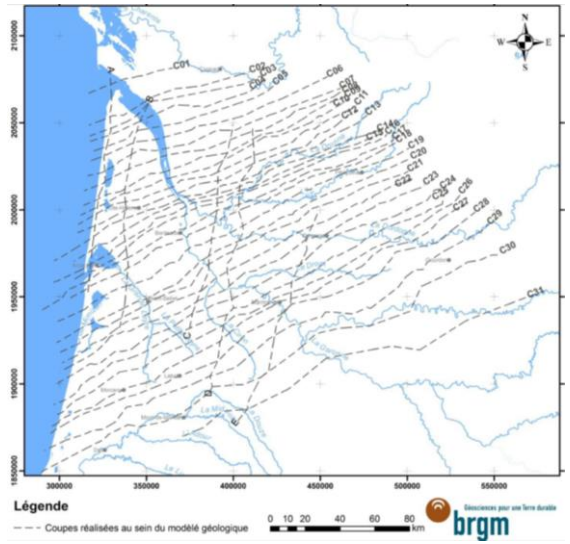
… Les travaux en géologie pour aboutir à la « version V4 »

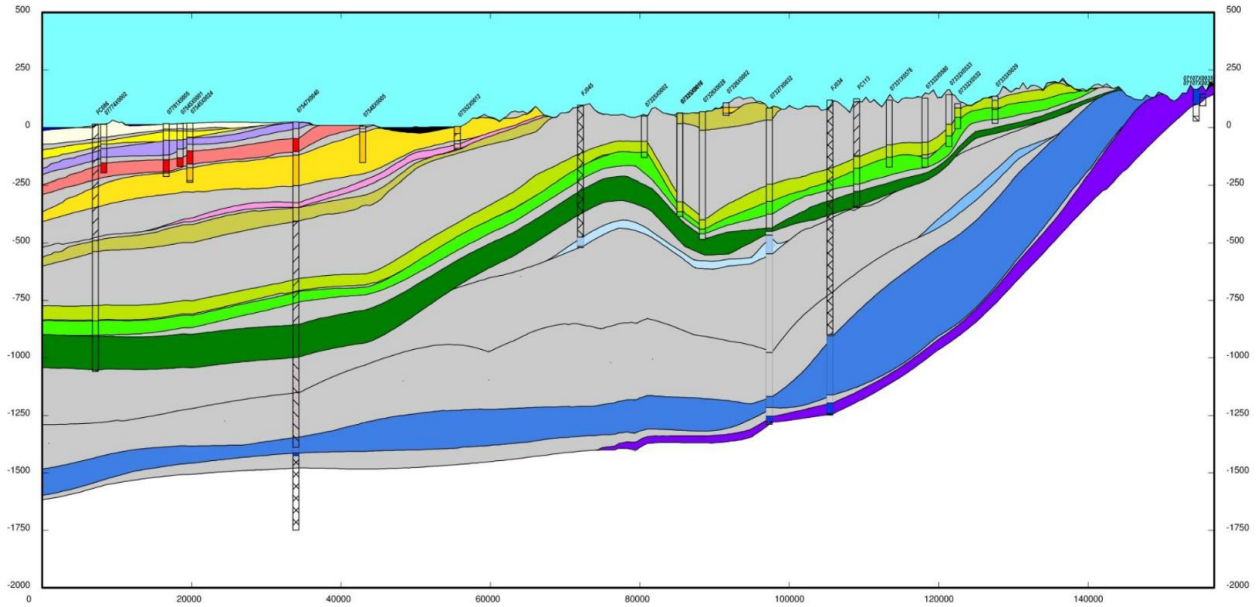
- Contrôle de cohérence





Saltel et al., 2015





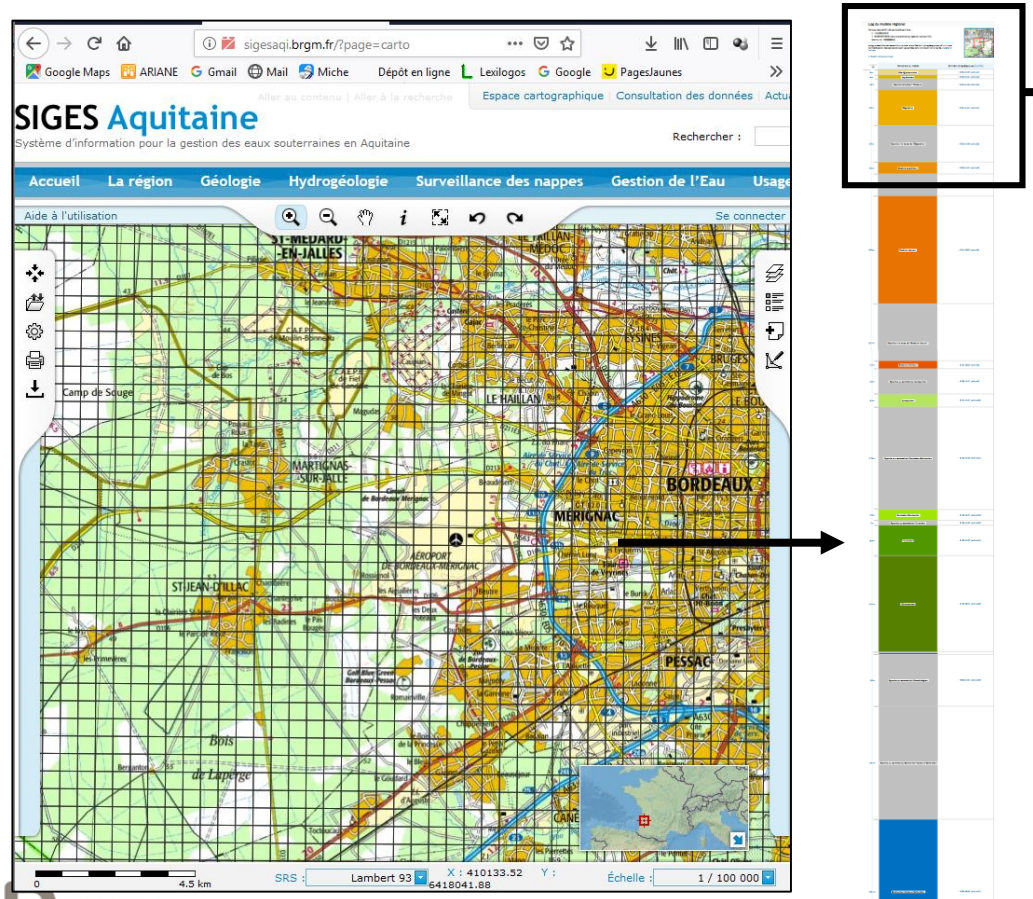
RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

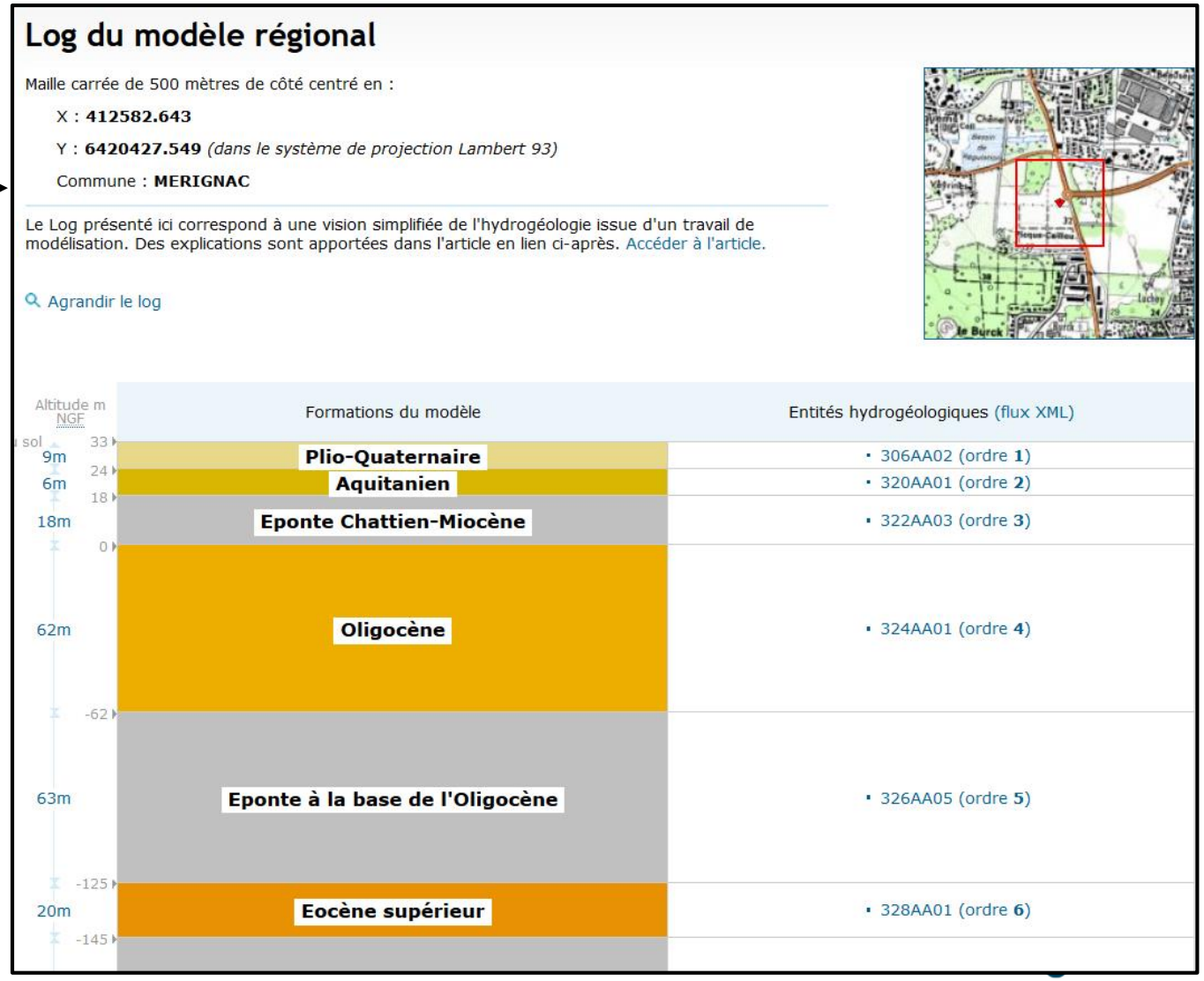
DES EXEMPLES

Le MOdèle Nord-Aquitain (MONA)

Valorisation du modèle géologique : exemple

http://sigesaqi.brgm.fr/





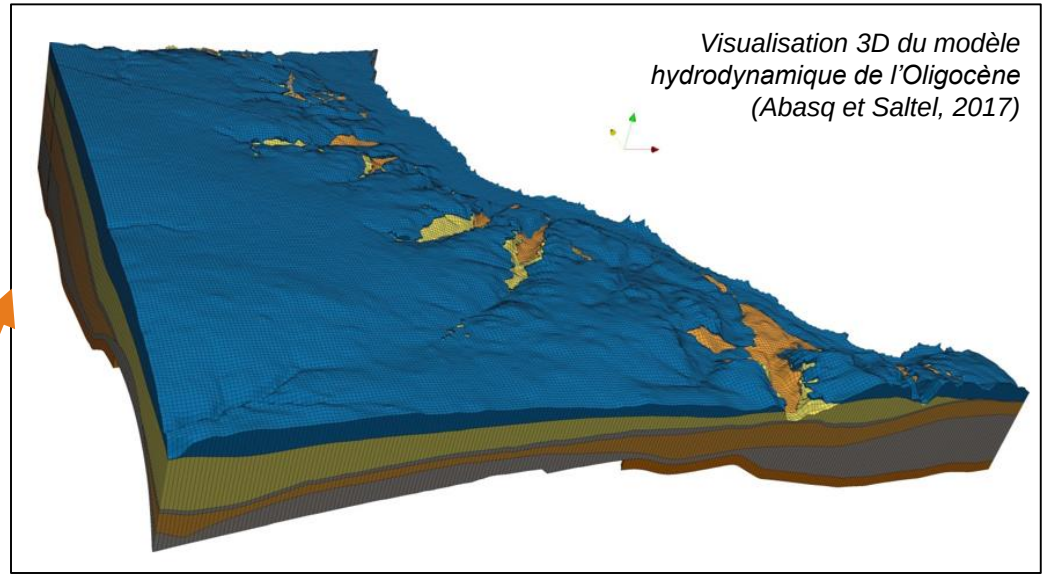
RGF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

DES EXEMPLES

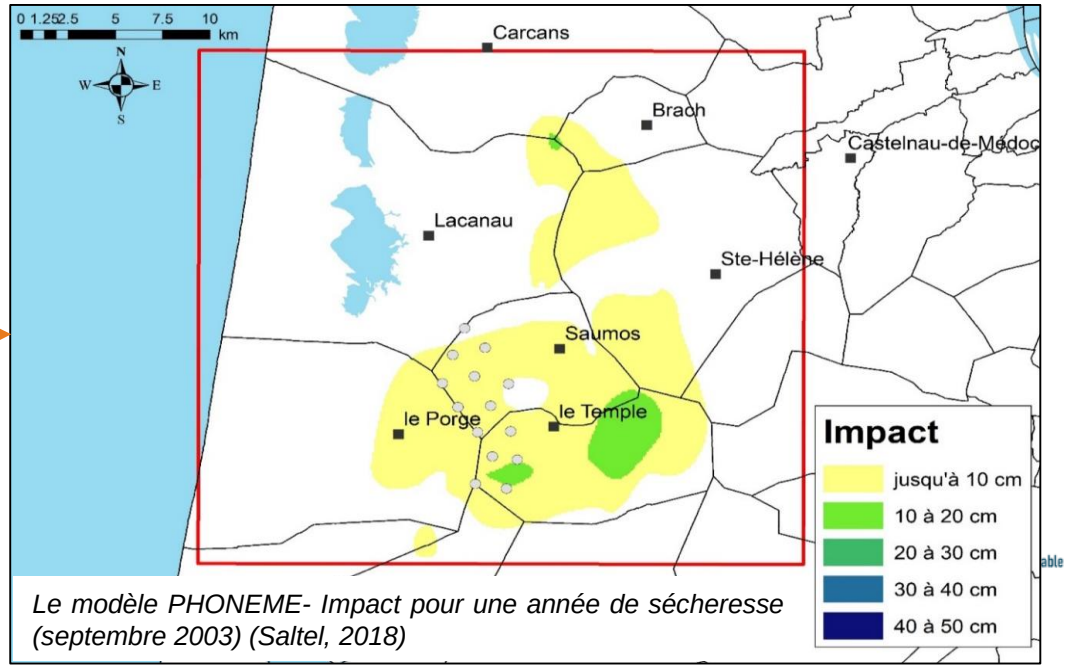
Le MOdèle Nord-Aquitain (MONA)

Une base pour la réalisation de modèles locaux

Nom du modèle	Problématique	Quelques caractéristiques
Oligocène	• Outil qui répond à des problématiques de dénoyage d'un aquifère du fait de son exploitation pour l'Alimentation en Eau Potable, notamment pour la métropole bordelaise + baisse des débits de cours d'eau en rive gauche de la Garonne.	• 1972-2014 (trimestriel entre 1972 et 1999 et en mensuel entre 2000 et 2014) • 8 couches • Maillage : 100 m • Réseau hydrologique
PHONEME	• Outil réalisé pour évaluer l'impact que pourrait occasionner la mise en place d'un champ captant sur la nappe de l'Oligocène mais également sur les nappes sus-jacentes du Plio-Quaternaire (le maintien des niveaux de cette dernière nappe étant indispensable à l'exploitation sylvicole).	• 2001-2012 (mensuel) • 15 couches • Maillage : 2 km et 100 m • Réseau hydrologique



Visualisation 3D du modèle hydrodynamique de l'Oligocène (Abasq et Saltel, 2017)



Le modèle PHONEME- Impact pour une année de sécheresse (septembre 2003) (Saltel, 2018)

RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

DES EXEMPLES

Le futur modèle Sud Aquitain (projet GAIA*)

Contexte hydrogéologique

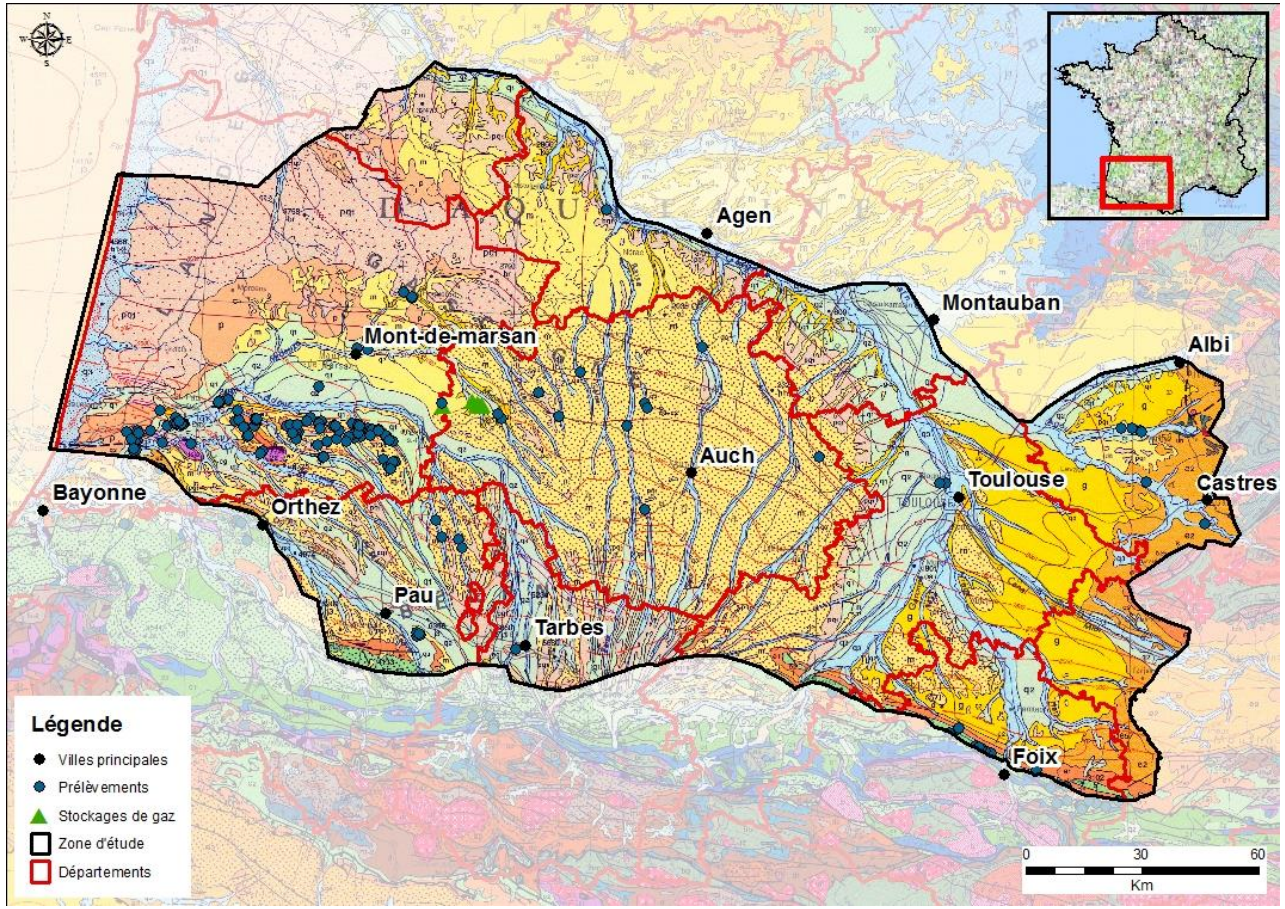
Les aquifères « profonds » (Eocène à Crétacé supérieur) du Sud du Bassin aquitain sont exploités pour de multiples usages : eau potable, thermalisme, géothermie, irrigation et stockage de gaz

*** projet GAIA : Programme de recherche sur la Géologie et les Aquifères du sud du bassin Aquitain**

AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE
ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTERE DU DEVELOPPEMENT DURABLE

TERÉGA
LE GAZ, ACCÉLÉRATEUR D'AVENIR

Géosciences pour une Terre durable
brgm



- Emprise : 32 000 km²
- Profondeurs d'accès : 0-3000m
- Un peu moins de 200 forages d'exploitation pour un volume prélevé cumulé de 25 à 30 Mm^3/an

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

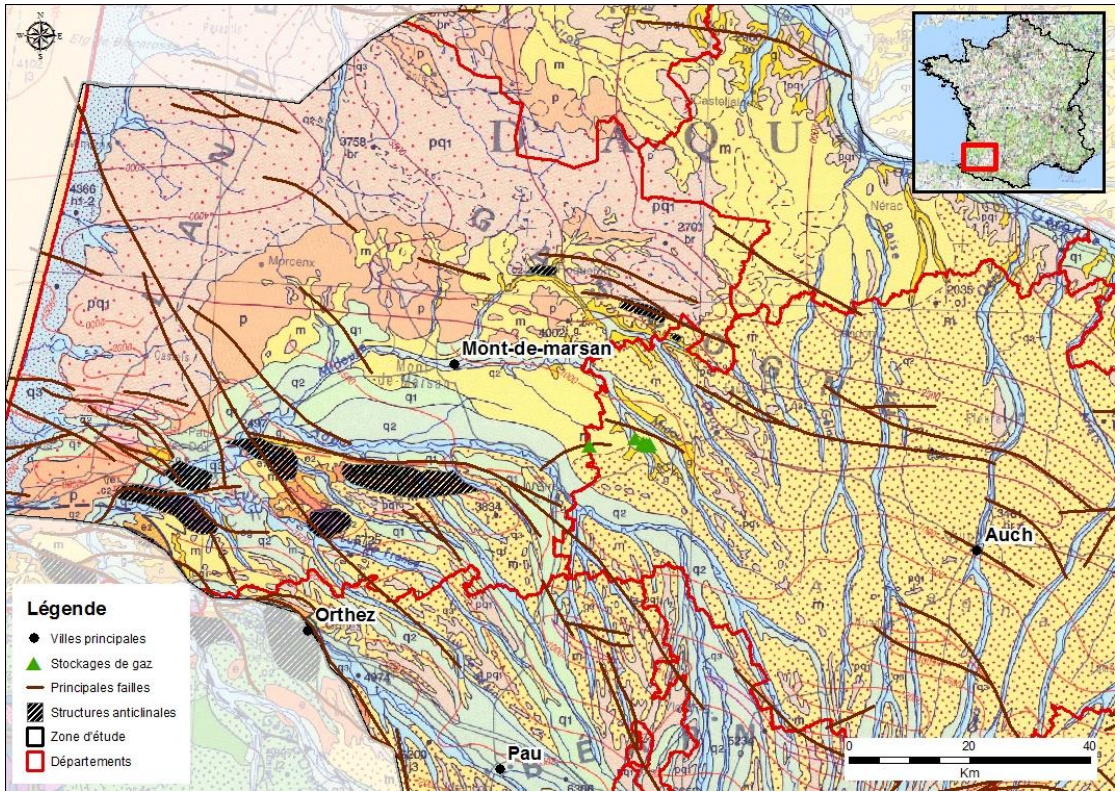
Géosciences pour une Terre durable
brgm

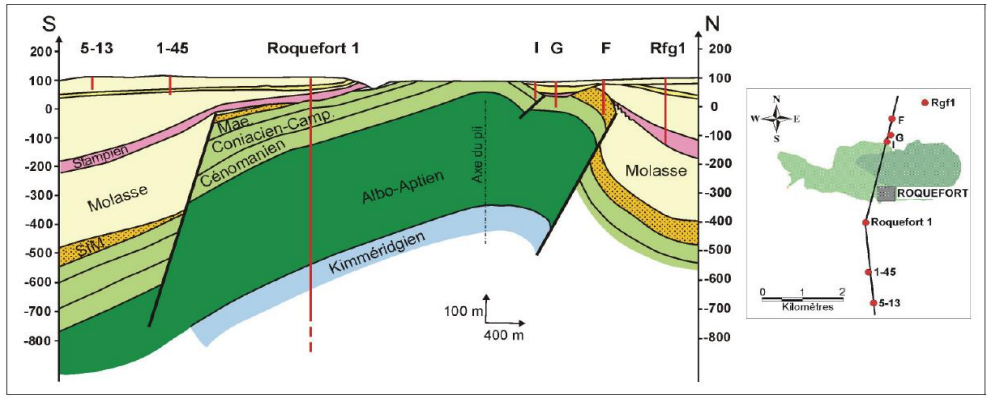
DES EXEMPLES

Le futur modèle Sud Aquitain (projet GAIA)

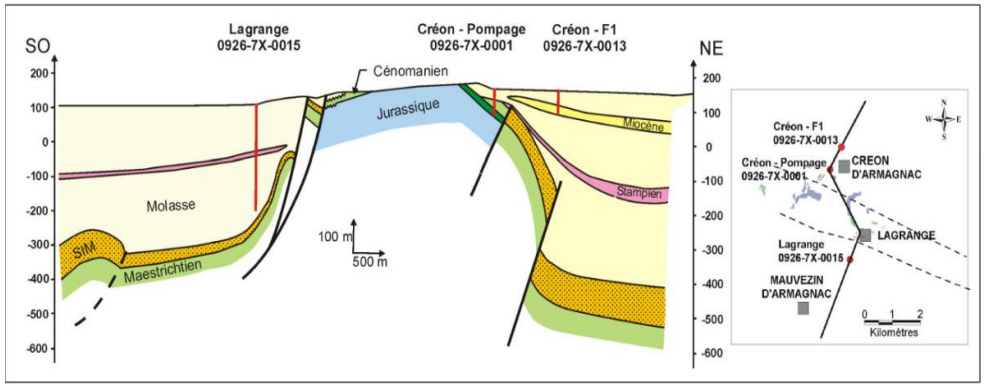
Un système aquifère complexe

- Particularité de la zone : nombreuses manifestations d'une déformation des couches par compression orientée globalement Sud-Nord, incluant des failles inverses et des plis (anticlinaux et synclinaux), accompagnés localement de remontée de sels datant du Trias (diapirisme)
- Les aquifères profonds confinés sont connectés entre eux localement au droit des structures anticlinales et, pour deux d'entre eux, à une échelle régionale (Sables Infra-Molassique – SIM – et Paléocène)





Coupe géologique schématique de la Structure de Roquefort (Guillemin et Krause, 2000)



Coupe géologique schématique de Créon d'Armagnac(Guillemin et Krause , 2000)

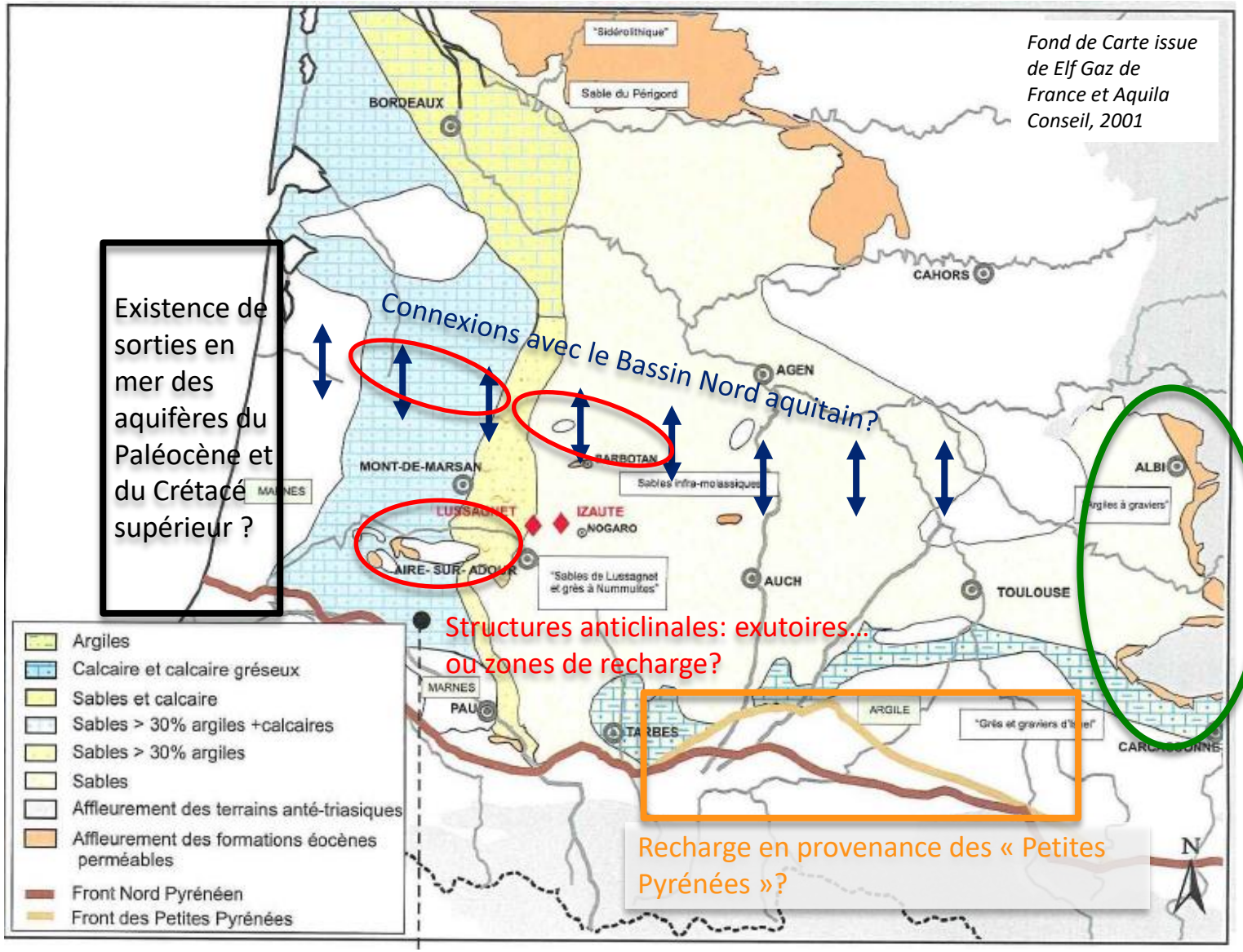
Géosciences pour une Terre durable
brgm

DES EXEMPLES

Le futur modèle Sud Aquitain (projet GAIA)

Les principales questions scientifiques du programme

Géométrie et bilan en eau des aquifères profonds



RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

Géosciences pour une Terre durable brgm

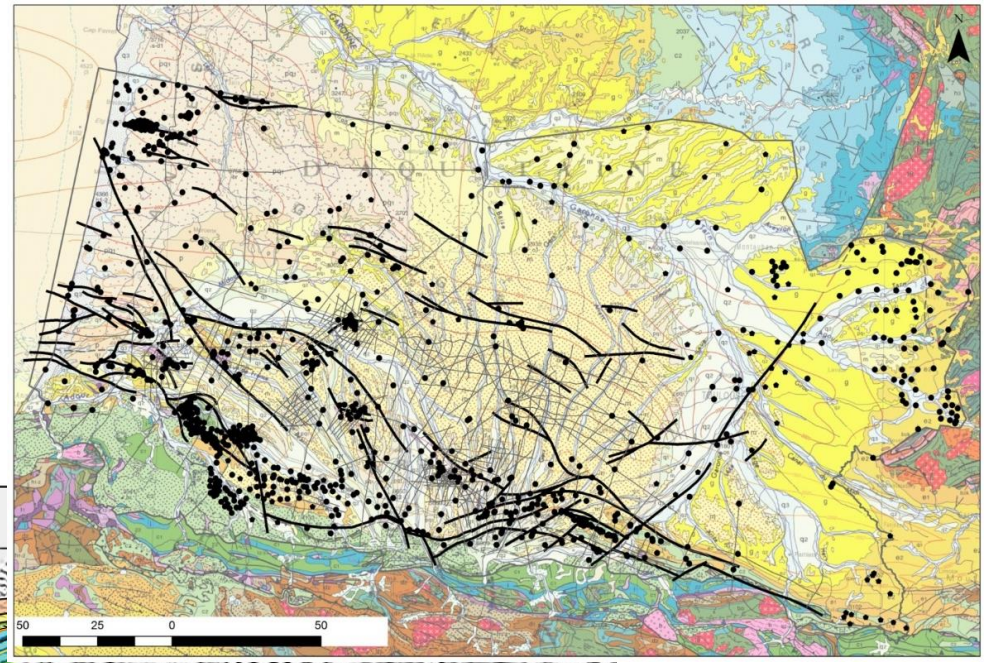
DES EXEMPLES

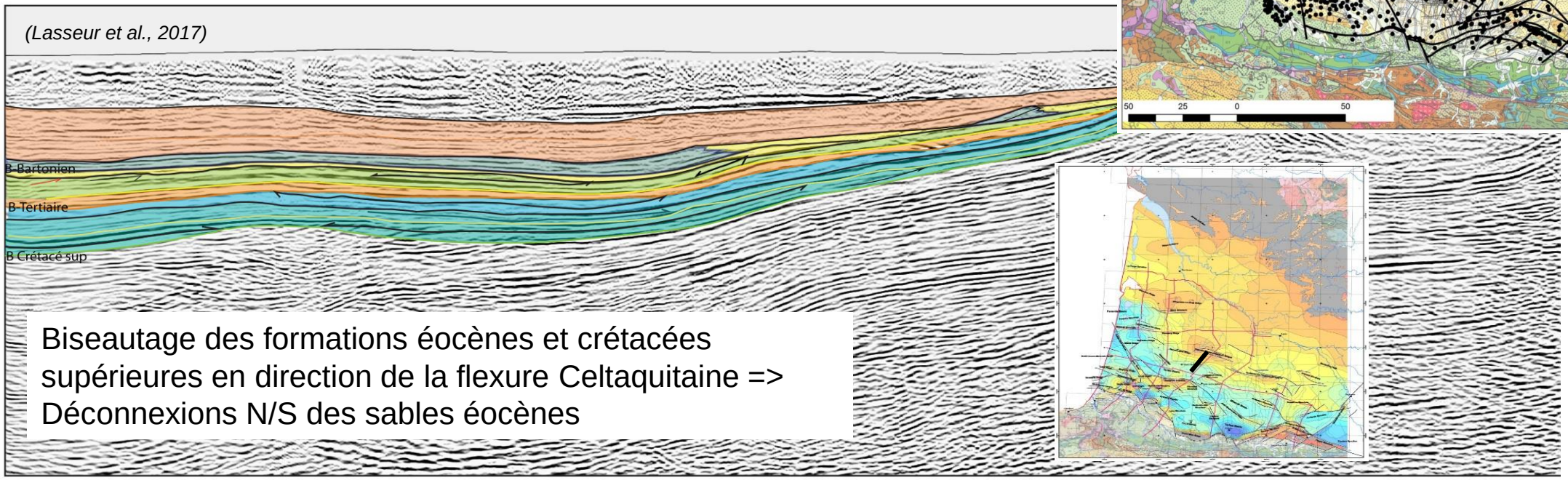
Le futur modèle Sud Aquitain (projet GAIA)

Des données géologiques pour établir une géométrie

Base de données géologiques

- 1 050 forages profonds réinterprétés
- Plus de 6 000 km de lignes sismiques





Biseautage des formations éocènes et crétacées supérieures en direction de la flexure Celtaquitaine => Déconnexions N/S des sables éocènes

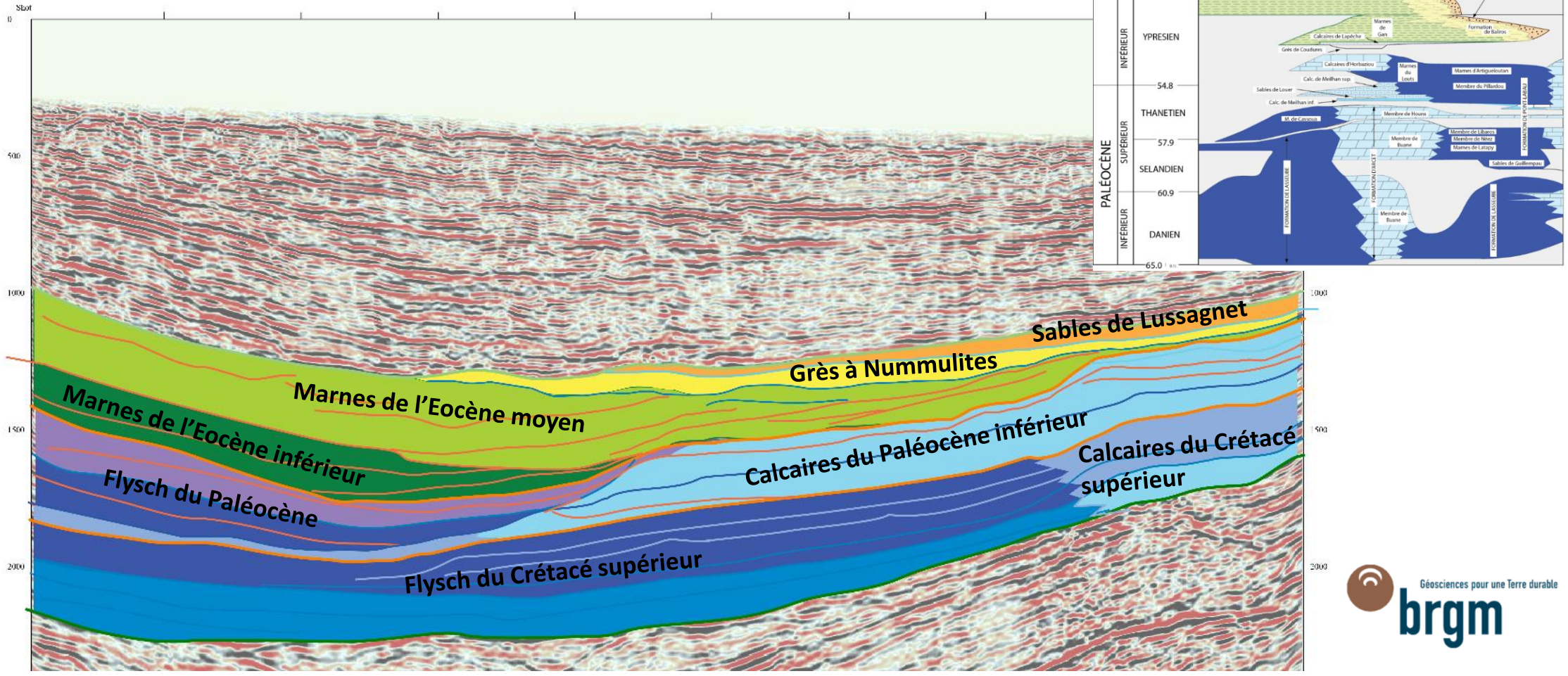
Géosciences pour une Terre durable
brgm

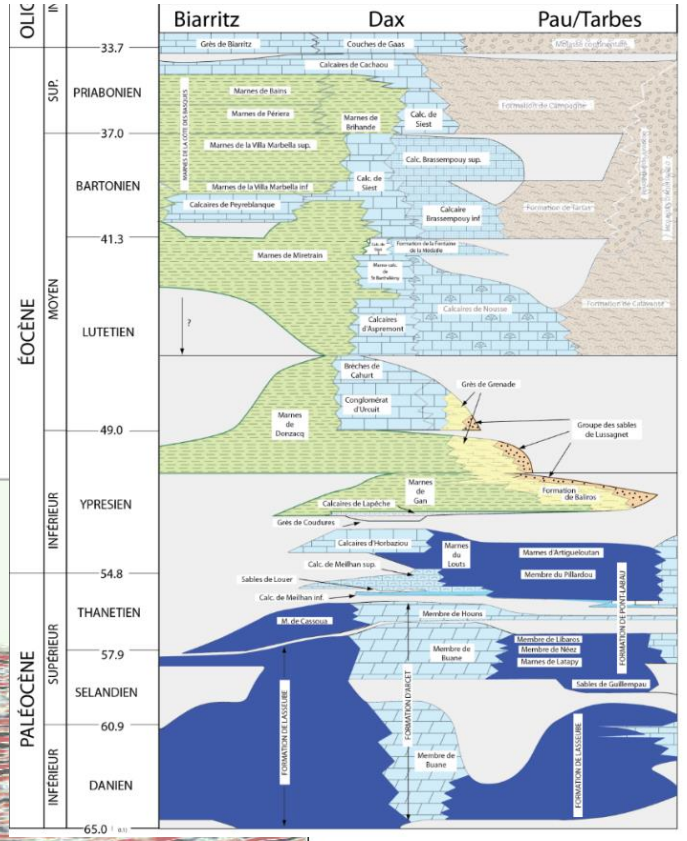
DES EXEMPLES

Le futur modèle Sud Aquitain (projet GAIA)

Vers un modèle géologique 3D

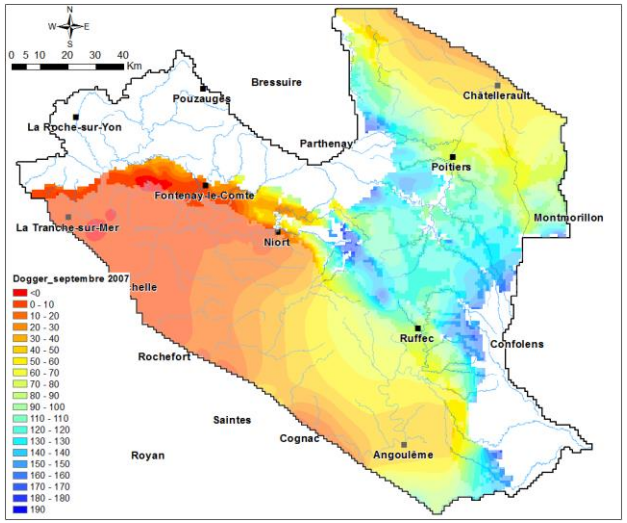
Sur la base de coupes transversales et l'établissement de schémas litho-stratigraphiques de référence, élaboration d'une représentation simplifiée du système aquifère multicouche





DES EXEMPLES

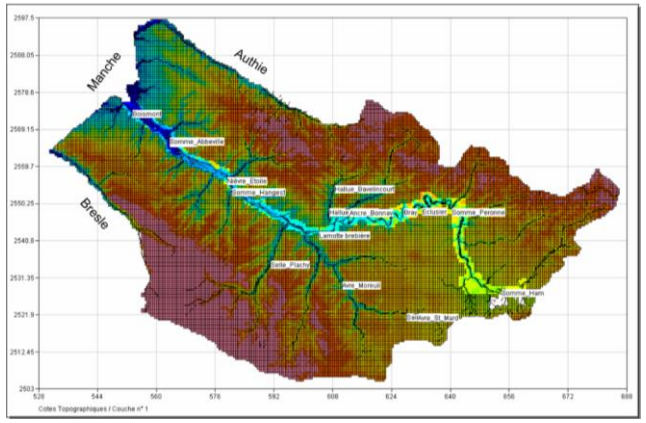
Des modèles hydrodynamiques et des applications



Douez et al., 2015

Le modèle Jurassique de Poitou-Charentes (8 couches)

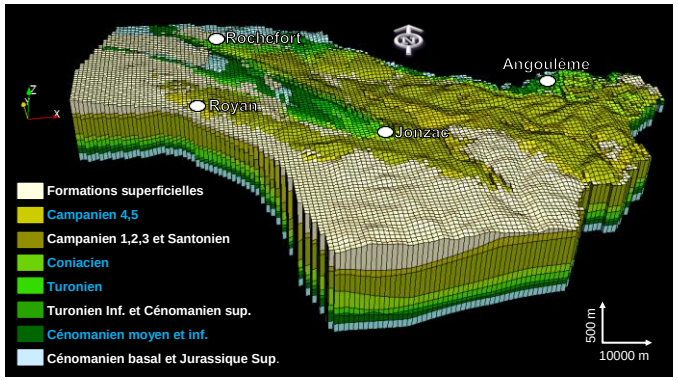
Problématiques principales : étiages, relations nappes rivières, ressources, impacts des prélèvements et volumes prélevables agricoles.



Amraoui et Seguin, 2012

Le modèle de la nappe de craie - Bassin de la Somme (monocouche)

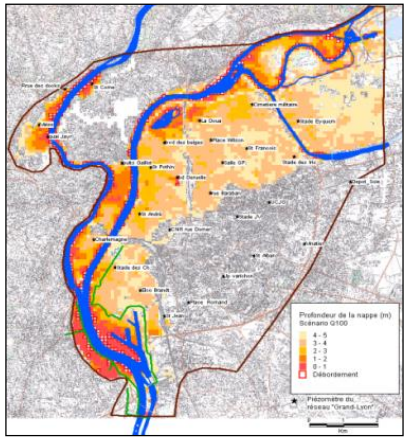
Problématiques principales : initialement → comprendre les mécanismes de la crue de 2001 (remontée de nappes) / Evolution vers la gestion de la ressource



Douez et al., 2013

Le modèle Crétacé de Poitou-Charentes (8 couches)

Problématiques principales : étiages, relations nappes rivières, ressources, impacts des prélèvements et volumes prélevables agricoles.



Seguin, 2008

Le modèle du Grand Lyon (9 couches)

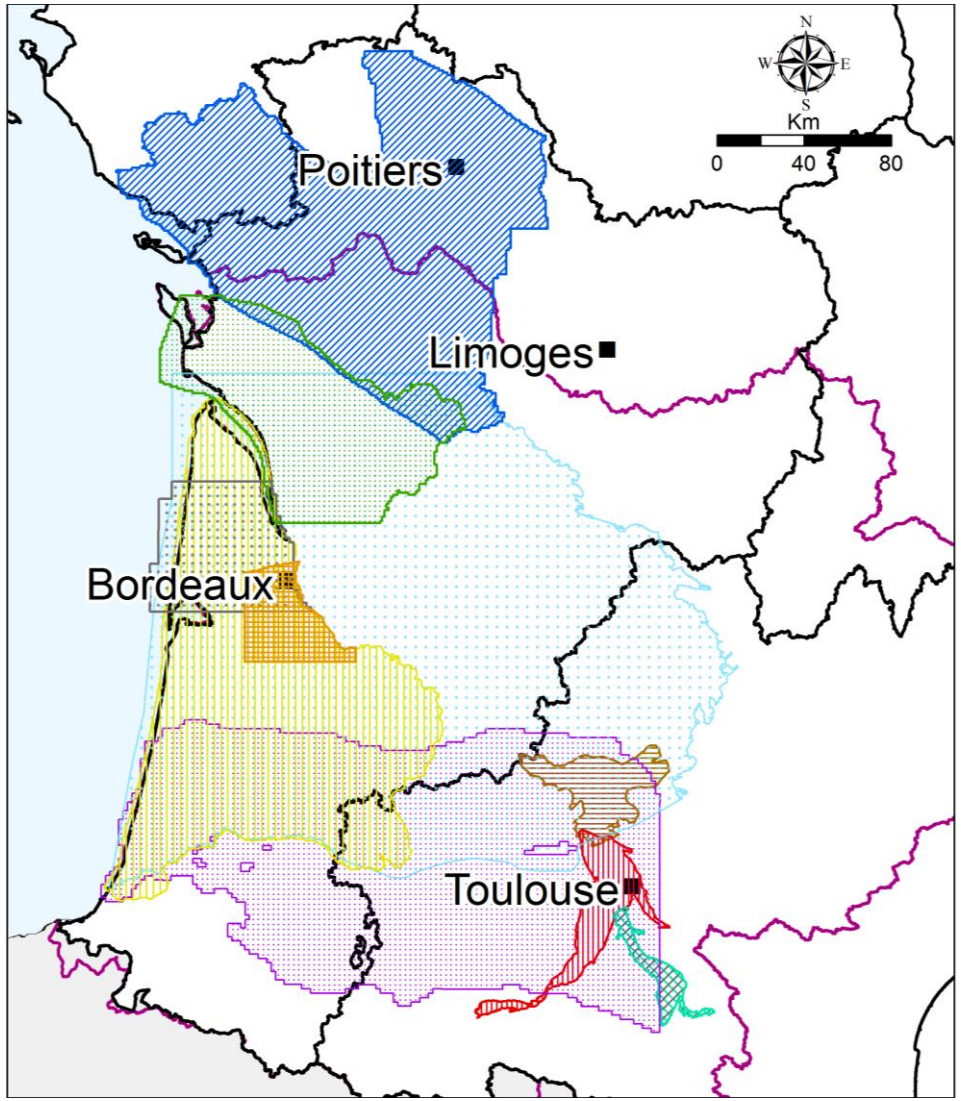
Problématiques principales : impact des crues du Rhône et de la Saône sur la nappe alluviale / sur les infrastructures souterraines (parkings)

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

Géosciences pour une Terre durable brgm

DES EXEMPLES

Les modèles hydrodynamiques du Sud-Ouest



Modèles qui contribuent notamment à :

- La gestion des ressources en eau souterraine,
- La détermination des volumes prélevables,
- Validation de stratégies d'exploitation,
- L'évaluation de l'impact de nouvelles ressources de substitution (AEP, irrigation),
- L'évaluation de l'impact du changement climatique pour initier des réflexions sur les stratégies d'adaptation.

Légende

- Crétacé du Poitou-Charentes
- Jurassique du Poitou-Charentes
- Oligocène
- PHONEME
- Plio-Quaternaire
- MONA
- Sud Adour-Garonne
- Alluvions de l'Ariège
- Alluvions de la Garonne
- Alluvions du Tarn et Garonne
- Nouvelle-Aquitaine
- Limites bassins

RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

Géosciences pour une Terre durable brgm