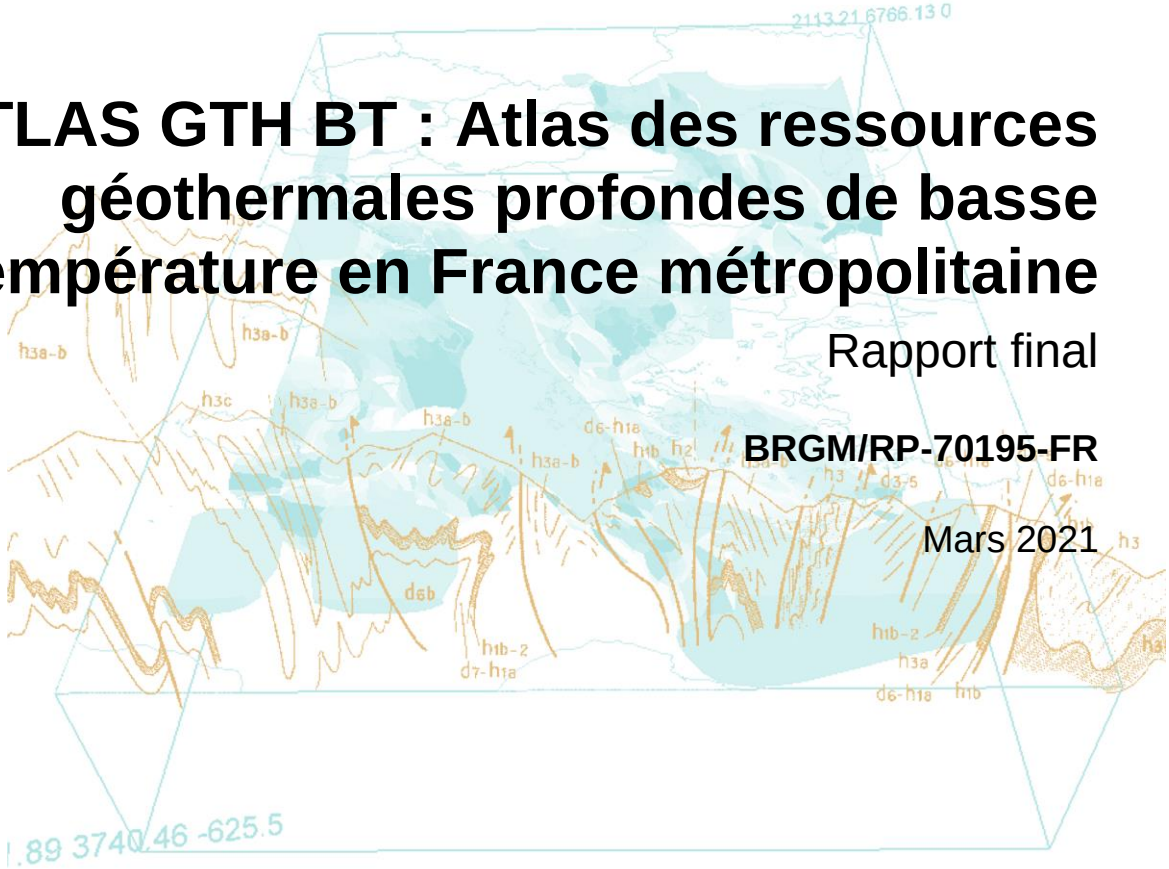
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public



ATLAS GTH BT : Atlas des ressources géothermales profondes de basse température en France métropolitaine

Rapport final

BRGM/RP-70195-FR

Mars 2021

Document public

ATLAS GTH BT : Atlas des ressources géothermales profondes de basse température en France métropolitaine

Rapport final

BRGM/RP-70195-FR

Mars 2021

Étude réalisée dans le cadre des actions d'appui aux politiques publiques du BRGM relatives à la convention ADEME-BRGM 2005C0030

Maurel C. avec la collaboration de C. Bonnefon

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Hamm V.	Nom : Philippe M.
Fonction : Hydrogéologue-Cheffe de projet expert en géothermie	Fonction : Responsable de l'unité « géothermies et stockages d'énergie » (DGR/GSE)
Date : 25/03/2021	Date : 02/04/2021
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Ressource, Potentiel, Géothermie profonde, Basse température, Bassin sédimentaire, Fossé d'effondrement, France métropolitaine.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Maurel C. avec la collaboration de C. Bonnefon (2021) – ATLAS GTH BT : Atlas des ressources géothermales profondes de basse température en France métropolitaine. Rapport final BRGM/RP-70195-FR, 98 p., 20 fig., 7 tab., 3 ann.

© BRGM, 2021, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport constitue le livrable du projet Atlas GTH BT relatif à la réalisation d'un atlas des ressources géothermales de basse température en France métropolitaine. Le projet a été mené dans le cadre de la convention nationale ADEME-BRGM 2020 n° 2005C0030.

Le projet Atlas GTH BT a pour objectif de venir en appui aux acteurs de la géothermie en vue de répondre aux besoins d'identification et de caractérisation de la ressource géothermale profonde de basse température – i.e. au-delà de 30 °C et située au-delà de plusieurs centaines de mètres de profondeur - sur le territoire métropolitain. Ce travail vient en complément du travail réalisé entre 2016 et 2018 de cartographie des cibles géothermales de moyenne température – au-delà de 90 °C - susceptibles d'être exploitées pour la production d'électricité, de chaleur ou bien la cogénération, en France métropolitaine (voir rapport RP-67853-FR (Caritg *et al*., 2018)).

Le projet s'inscrit également dans la continuité des actions menées par le BRGM, de valorisation des informations du sous-sol pour le développement de la géothermie en France et d'appui à l'exploration de nouveaux aquifères profonds (Darnet *et al.*, 2020; Hamm *et al*., 2020, 2019) .

Pour développer de nouveaux projets de géothermie profonde, il apparait nécessaire dès les toutes premières phases exploratoires et de pré-projet, d'identifier d'une part la présence de ressources disponibles au sein de formations ou d'aquifères profonds, leur géométrie, épaisseurs et paramètres pétrophysiques mais aussi de quantifier l'énergie stockée et l'énergie récupérable contenue dans ces formations.

Ainsi dans un premier temps, une synthèse des données cartographiques disponibles sur les réservoirs aquifères a été réalisée à partir des données bibliographiques et des données issues de projets internes au BRGM. Le projet réalisé en 2018 avait permis d'identifier trois grands types de données disponibles : des cartes papiers issues de grandes synthèses sur les bassins sédimentaires (Housse *et al*., 1977, 1976), des données numériques sous format SIG issues de différents projets auxquels le BRGM a participé, ainsi que des grilles 2D ou 3D issues de modèles géologiques réalisés au BRGM. Le projet courant a permis de recueillir de nouvelles grilles 2D et 3D sur les principaux bassins sédimentaires où se trouvent des ressources de basse température, exploitées ou non. Ces nouvelles données et les données recueillies en 2018 ont été intégrées à un SIG et une partie (cartes des formations et aquifères de basse température dans le Bassin parisien) a été diffusée sur l'espace cartographique du site web www.geothermies.fr géré par le BRGM en partenariat avec l'ADEME. La diffusion des cartes a pour objectif de rendre la connaissance du sous-sol accessible aux professionnels de la filière et de valoriser ainsi les travaux réalisés. Initiée en 2021, la diffusion doit se poursuivre en 2021 et 2022 via la convention ADEME-BRGM 2021.

La diffusion permet actuellement d'interroger les couches pour connaitre les valeurs de la carte affichée en un point. Les services peuvent également être utilisés par les usagers dans des outils SIG. Par la suite, le stockage en base de données des cartes devra permettre d'obtenir l'ensemble des informations et propriétés pour un aquifère ou formation donnée lors de l'interrogation des cartes de façon à améliorer la visibilité des informations disponibles.

Les grilles de propriétés diffusées doivent être manipulées et interprétées avec précaution. Dans un premier temps, seules les données brutes sont donc diffusées. Une description des couches est proposée sur le site avec également le renvoi vers le rapport BRGM décrivant les méthodes de construction, les données utilisées pour la construction et les limites d'usage. Ces informations permettent à l'utilisateur d'apprécier la traçabilité des cartes et donnent un premier niveau d'information sur la fiabilité de celle-ci. Lorsque la quantification des incertitudes est disponible, l'information est également fournie. Cependant, l'information est actuellement rarement disponible et les réflexions à ce sujet devront se poursuivre en 2021 pour mieux rendre compte des incertitudes associées aux représentations spatiales des différentes propriétés.

Les différentes méthodes de quantification du potentiel géothermique théorique au potentiel économique et de développement des formations et aquifères sont présentées dans le rapport. Ces estimations présentent toujours un certain nombre d'incertitudes liées à la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-sol qu'il est important de qualifier ou, lorsque l'on dispose de suffisamment d'informations de quantifier.

Dans le cas des estimations de potentiels géothermiques de ressources profondes, la profession utilise généralement la méthode volumétrique développée depuis les années 1970 pour les systèmes hydrothermaux convectifs (Muffler *et al.*, 1978; Nathenson *et al.*, 1975) qui a ensuite été élargie au domaine conductif et permet d'apprécier la quantité d'énergie stockée et la quantité d'énergie récupérable dans les réservoirs profonds. Selon les modèles des classifications de ressources réalisés dans le domaine pétrolier ou miniers et grâce également aux classifications des ressources géothermales établies par (Muffler *et al.*, 1977) puis (Rybach, 2010), un modèle de classification des ressources a été proposé en 2016 par les Nations Unies à partir de la classification éditée en 2009 pour les ressources minérales et pétrolières (United Nations, 2009) bien que ce modèle soit encore peu utilisé. Plusieurs pays développent des outils d'aide à l'exploration des ressources ou permettant d'identifier le potentiel théorique, technique voire économique des ressources profondes de façon à promouvoir le développement de la géothermie sur leur territoire. C'est le cas notamment de l'Allemagne (site web www.geotis.de), des Pays-Bas (www.thermogis.nl) ou des développements récents par l'ICGC en Espagne de l'outil 3D HIP. Ces outils sont présentés dans le rapport.

Sommaire

1. Présentation du projet 9

1.1. CONTEXTE ET ENJEUX 9

1.2. OBJECTIF DU PROJET 9

1.3. TÂCHES DU PROJET ET LIVRABLES 10

2. Données recueillies au niveau des formations ciblées pour l'exploitation géothermale en France métropolitaine 11

2.1. BASSIN PARISIEN : DONNÉES RECUEILLIES POUR LES CIBLES GÉOTHERMALES DE BASSE ET MOYENNE TEMPÉRATURE 12

2.1.1. Ressources de basse température du Bassin parisien 12

2.1.2. Ressources de moyenne température du Bassin parisien d'après (Caritg *et al.*, 2018) 15

2.1.3. Synthèses de données recensées 17

2.2. BASSIN AQUITAIN : DONNÉES RECUEILLIES POUR LES CIBLES GÉOTHERMALES DE BASSE ET MOYENNE TEMPÉRATURE 18

2.2.1. Ressources de basse température du Bassin aquitain 18

2.2.2. Ressources de moyenne température du Bassin aquitain d'après (Caritg et al., 2018) 27

2.2.3. Synthèse des données recensées 28

2.3. BASSIN DU SUD-EST, FOSSÉS RHODANIEN ET BRESSAN : DONNÉES RECUEILLIES POUR LES CIBLES GÉOTHERMALES 31

2.4. FOSSÉ RHÉNAN : DONNÉES RECUEILLIES POUR LES CIBLES GÉOTHERMALES 36

3. Revue des méthodologies de classification des ressources géothermales et expériences en France et en Europe 39

3.1. DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE THEORIQUE AU POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT 39

3.2. CLASSIFICATION CADRE DES NATIONS DES RESSOURCES UNFC-2009 DES RESSOURCES GÉOTHERMALES 43

3.3. RETOUR D'EXPÉRIENCE DES OUTILS DÉVELOPPÉS POUR L'ESTIMATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE 44

3.3.1. Outil ThermoGis (TNO) 45

3.3.2. Outil GeotIS (LIAG) 48

3.3.3. Outil cartographique Suisse 48

3.3.4. Logiciel d'estimation de chaleur en place 3D HIP (ICGC et UAB) 48

3.3.5. Démonstrateur Thermo2Pro (BRGM) et intérêt du développement d'outil d'aide à l'exploration et l'exploitation des ressources géothermales en France 50

4. État d'avancement et perspectives.....53

4.1. MÉTHODE DE MISE À DISPOSITION ET DE DIFFUSION DES DONNÉES SUR L'ESPACE CARTOGRAPHIQUE DU SITE WWW.GEOTHERMIES.FR.....53

4.2. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION 56

Bibliographie.....57

Liste des figures

Figure 1 : Coupe géologique générale du Bassin aquitain et localisation des formations aquifères, d'après (Housse et al., 1977). 19

Figure 2 : Aperçu des emprises des modèles hydrodynamiques couvrant le Bassin aquitain. 20

Figure 3 : Aperçu de la géométrie du Modèle Nord-Aquitain (Saltel et al., 2016). 21

Figure 4 : Atlas des ressources géothermiques profondes sur nappe en ex-région Aquitaine d'après (Durst et al., 2011) disponible sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr. 24

Figure 5 : Exemple d'interrogation de l'atlas des ressources géothermiques profondes sur nappe en ex-région Aquitaine disponible sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr. 25

Figure 6 : Atlas des ressources géothermiques profondes sur nappe en ex-région Midi-Pyrénées d'après (Durst et al., 2011) disponible sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr. 26

Figure 7 : Bassins sédimentaires ciblés pour le développement de la géothermie dans le quart sud-est de la France avec le Bassin du Sud-Est (a), le Fossé bressan (b) et le Fossé rhodanien (c), d'après Caritg et al., (2018) 31

Figure 8 : Illustration des données disponibles sur le site www.geopotenziale.eu avec la carte des températures au toit du Muschelkalk supérieur et écart-types d'après (Equipe de projet GeORG, 2013). 37

Figure 9 : Extension et représentation du modèle géologique 3D régional RGF Vosges - Fossé rhénan et pile géologique, d'après (Gabalda et al., 2013). 38

Figure 10 : Logigramme subdivisant les ressources géothermales d'après (Muffler et al., 1977). 40

Figure 11 : Diagramme de McKelvey pour la classification de l'énergie géothermal(Muffler et al., 1978). 40

Figure 12 : Diagramme de définition du potentiel pour les sources d'énergie renouvelable dont la géothermie d'après (Rybach, 2010). 41

Figure 13 : Classification cadre des Nations Unies pour l'énergie fossile et les réserves et ressources minérales UNFC-2009 et les spécifications pour son application aux ressources géothermales (source : publication des Nations Unies 2013). 44

Figure 14 : Workflow implémenté dans l'outil en ligne ThermoGIS d'après (Vrijlandt et al., 2019). 45

Figure 15 : Outil en ligne ThermoGIS, illustration des cartes obtenues par aquifères (https://www.thermogis.nl/en/map-viewer). 47

Figure 16 : Outil en ligne ThermoGIS, illustration des cartes de potentiel technique (https://www.thermogis.nl/en/map-viewer). 47

Figure 17 : Schéma de fonctionnement des étapes du script Matlab implémenté dans le logiciel 3DHIP d'après (Herms et al., 2021). 49

Figure 18 : Illustration de l'espace cartographique du site https://www.geothermies.fr/viewer/ et arborescense des cartes diffusées (Géothermie profonde (>200 m)/Propriétés des bassins/…). 54

Figure 19 : Illustration de l'affichage d'une couche (cote altimétrique du mur de l'Albien en mNGF) sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr et les métadonnées associées à cette couche. 55

Figure 20 : Illustration de l'affichage d'une couche (cote altimétrique du mur de l'Albien en mNGF) sur l'espace cartographique du site geothermies.fr, de l'interrogation en un point X,Y (cf icône noir sur la carte) de la valeur de la couche et de l'affichage de la légende de cette couche. ..55

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des données recensées pour les principaux aquifères ciblés pour l'exploitation et l'exploration de la ressource géothermale de basse et moyenne température du Bassin parisien. 17

Tableau 2 : Opérations de géothermie profonde répertoriées en 2019 dans la base de données SYBASE (Hamm et al., 2020) dans le Bassin aquitain. 18

Tableau 3 : Nombre de mailles et superficie des couches constituant le modèle MONA dans sa version v4 d'après (Saltel, 2016). 23

Tableau 4 : Synthèse des données recensées pour les principaux aquifères ciblés pour l'exploitation et l'exploration de la ressource géothermale de basse et moyenne température du Bassin aquitain (partie 1). 29

Tableau 5 : Synthèse des données recensées pour les principaux aquifères ciblés pour l'exploitation et l'exploration de la ressource géothermale de basse et moyenne température du Bassin aquitain (partie 2). 30

Tableau 6 : Synthèse des données recensées pour les principaux aquifères et formations ciblées pour l'exploration de la ressource géothermale de basse et moyenne température du Bassin du Sud-Est. 33

Tableau 7 : Synthèse des données recensées pour les principaux aquifères et formations ciblées pour l'exploration de la ressource géothermale de basse et moyenne température dans le Fossé rhodanien et le Fossé bressan. 35

Liste des annexes

Annexe 1. Cartographie des ressources géothermales de basse température du Bassin parisien d'après Caritg, 2018 61

Annexe 2. Cartographie des ressources géothermales de moyenne température du Bassin parisien d'après Caritg, 2018 83

Annexe 3. Cartographie des ressources géothermales de moyenne température du Bassin aquitain d'après Caritg, 2018 91

1. Présentation du projet

1.1. CONTEXTE ET ENJEUX

Le projet Atlas GTH-BT vise à présenter et diffuser les informations de cartographie des cibles géothermiques de basse température pour la production de chaleur en France métropolitaine. Il fait suite au projet Atlas Co-GTH de la convention nationale ADEME-BRGM de 2017 (Caritg *et al.*, 2018).

Ce projet s'inscrit dans la continuité des actions menées par le BRGM, en partenariat avec l'ADEME nationale, de valorisation des informations du sous-sol pour le développement de la géothermie en France et l'appui à l'exploration de nouveaux aquifères profonds (Darnet *et al.*, 2020). L'exploitation de la ressource en France était jusqu'à présent circonscrite en grande majorité à l'aquifère du Dogger dans la région Ile-de-France où on enregistre 50 opérations en activité en 2019 (Hamm *et al.*, 2019) soit plus de 70 % des opérations actives en France. Afin de soutenir le développement de la filière, il apparait primordial de poursuivre les efforts pour atteindre l'objectif minimal de 4 TWh (maximal de 5,2 TWh) soit +2,4 TWh de chaleur issue de la géothermie profonde d'ici 2028 fixé par la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

1.2. OBJECTIF DU PROJET

L'objectif de ce projet, réalisé dans le cadre de la convention nationale ADEME-BRGM 2020 n° 2005C0030, est d'appuyer la filière pour l'identifier des ressources géothermales sur le territoire métropolitain et de diffuser les connaissances existantes notamment pour l'exploration de la ressource. Ces informations sont notamment utiles, en amont des projets, afin d'identifier des secteurs d'intérêts potentiels pour le développement de la ressource dans les principaux bassins et fossés du territoire métropolitain.

Les cibles du projet sont les formations et aquifères profonds où la ressource géothermique de basse température (entre 30 °C et 90 °C) a été identifié sur le territoire métropolitain. Elles viennent ainsi compléter le travail de synthèse réalisé entre 2016 et 2018 de cartographie des cibles géothermales de moyenne température (90-150 °C) pour la cogénération d'électricité et de chaleur réalisée par (Caritg *et al.*, 2018).

Les données qui ont été recueillies et qui sont mises à disposition sur l'espace cartographique du site www.geothermie.fr proviennent de modélisations géologiques, hydrodynamiques ou de cartes d'interpolation de températures, de données pétrophysiques et d'autres propriétés des réservoirs issues d'études régionales ou de bassins réalisées par le BRGM. La description des ressources géothermiques profondes et formations se fait à l'échelle du bassin sédimentaire à partir des éléments bibliographiques disponibles. Ces modèles et cartes permettent d'identifier les profondeurs, les épaisseurs et températures des formations pour une grande majorité des cibles. Lorsque la connaissance est plus importante, grâce à l'exploitation géothermale ou à l'exploration pétrolière, d'autres propriétés des formations et des fluides ont été recueillies (e.g. perméabilité, transmissivité, viscosité, salinité). L'état d'exploitation des ressources profondes par des ouvrages géothermiques en 2019 a été spécifié pour chaque formation.

1.3. TÂCHES DU PROJET ET LIVRABLES

Les tâches du projet, qui se poursuit également sur l'année 2021 sont les suivantes :

- récolte des données disponibles à partir de la bibliographie pour les cibles de basses températures et des intervalles non différenciés lors du projet Atlas Co-GTH (inférieures à 90 °C) ;
- description des ressources géothermiques disponibles par bassin et synthèse de l'état d'exploitation de la ressource ;
- mise à disposition des données relatives aux cibles de moyenne température, produites lors du projet Atlas Co-GTH sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr ;
- mise à disposition des données relatives aux ressources de basse température sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr pour les ressources du Bassin parisien ;
- réflexion autour des méthodes d'estimation des potentiels géothermiques de la ressource pour la mise en place d'outil d'aide à l'exploitation et l'exploration de la ressource.

Le présent rapport expose les travaux réalisés en 2020 dans le projet. La section 2 présente ainsi les données disponibles et recueillies pour les aquifères et formations ciblées pour l'exploitation et l'exploration de la ressource géothermale de basse température sur le territoire métropolitain ainsi qu'un rappel des données recueillies par (Caritg, 2018) pour les ressources de moyenne température. Les cartes mises à disposition au premier semestre 2021 y sont également présentées. La section 3 présente les méthodes d'estimation du potentiel de la ressource géothermale dans la littérature ainsi que les outils d'aide à la décision développés à l'étranger pour l'exploration et l'exploitation de la ressource. Enfin, la section 4 présente l'organisation des formations diffusées sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr ainsi que les perspectives pour l'année à venir et la diffusion de nouvelles cartes recueillies jusqu'à présent sur le site.

Un SIG regroupant l'ensemble des couches identifiés en section 2 a été également mis en place.

2. Données recueillies au niveau des formations ciblées pour l'exploitation géothermale en France métropolitaine

Dans le cadre du projet Atlas GTH BT, les formations qui ont été recensées et dont les cartes de propriétés ont été recueillies sont des aquifères et formations géologiques réparties sur de grand espace régionaux et dont la qualité pour l'exploitation de ressources géothermales profondes a pu être éprouvée dans le passé (notamment lors des explorations des ressources d'hydrocarbures ou géothermales). Les ressources ciblées sont situées à plusieurs centaines de mètres de profondeur et pour des températures au-delà de 30 °C. Elles peuvent ainsi être exploitées principalement pour l'usage direct de la chaleur par échangeur, avec ou non l'assistance d'une pompe à chaleur. Pour les températures plus importantes la ressource peut éventuellement être utilisée pour la cogénération de chaleur et d'électricité.

Les incertitudes associées aux cartes présentées n'ont pas toujours été quantifiées pour l'ensemble des cartes, cependant il est important de prendre en considération les limites d'interprétation des cartes lors de leur consultation. En effet, l'interprétation des profils sismiques, des données de forages et d'autres informations utilisées pour la définition des géométries, des propriétés hydrodynamiques et thermiques comportent un certain nombre d'incertitudes qui peuvent varier suivant la qualité des informations utilisées mais aussi suivant la quantité d'information et leur répartition spatiale lors des interpolations réalisées par méthode géostatistique.

Ces cartes, à considérer à l'échelle du bassin, donnent donc des indications sur les différentes propriétés du sous-sol mais ne peuvent en aucun cas se substituer à une étude locale pour le dimensionnement de nouveau projet de géothermie profonde.

Pour la majeure partie des formations recensées, les cartes de profondeur, d'épaisseur et de température ont été recueillies. Pour les formations dont la connaissance est plus avancée, ces informations ont été complétées avec des cartes de propriétés hydrodynamiques du réservoir ou des propriétés du fluide géothermal (perméabilité, transmissivité, viscosité, salinité, etc.).

Les informations recueillies dans le présent projet ainsi qu'une synthèse des informations recueillies par (Cartig *et al.*, 2018) relatives aux ressources de moyenne température sont présentées ci-après pour les principaux bassins sédimentaires en France métropolitaine.

2.1. BASSIN PARISIEN : DONNÉES RECUEILLIES POUR LES CIBLES GÉOTHERMALES DE BASSE ET MOYENNE TEMPÉRATURE

2.1.1. Ressources de basse température du Bassin parisien

Les cartes présentées ici ont été mises à disposition sur l'espace cartographique https://www.geothermies.fr/viewer/.

Suite à l'étude des cibles de moyenne température dans le Bassin parisien par (Caritg *et al.*, 2018) cf. section 2.1.2, de nouvelles données ont été recueillies pour les ressources de basse température relatives aux aquifères de l'Albien, du Néocomien, du Lusitanien et du Dogger.

Les données relatives aux **formations sableuses de l'Albien et du Néocomien** proviennent des modélisations géologiques et hydrogéologique d'après (Seguin *et al.*, 2015). Ce modèle géologique a été construit à partir du modèle réalisé en 1997 et l'intégration de nouveaux logs géologiques, des données issues du référentiel hydrogéologique BDLISA pour définir l'extension des couches du modèle et du modèle géologique du Tertiaire du Bassin parisien de 2010. En tout, ce sont 1 950 sondages qui ont été utilisés pour la construction du modèle en 2015 dont 1 094 déjà utilisés pour la construction du modèle de 1997. Ce modèle représente l'étendu totale de l'Albien et du Néocomien, depuis les affleurements en bordure de bassin. Les informations ont été intégrées dans le logiciel GDM et interpolées par krigeage sur une grille de 2 km par 2 km pour construire une carte du toit et du mur de l'Albien et du Néocomien. Le modèle hydrogéologique fait suite au modèle construit en 1999 par le Bureau d'étude Hydroexpert (aujourd'hui EGIS). Il a été construit à la demande de la DRIEE et de l'Agence de l'Eau Seine Normandie pour simuler différents scénarios de prélèvements dans la nappe captive de l'Albien et pour simuler le fonctionnement de doublets géothermiques dans l'Albien. Le nouveau modèle construit en 2015 a été calibré en régime transitoire (sur la période 1841 à 2012) et intègre les prélèvements sur cette même période, des chroniques piézométriques de 24 piézomètres (extrait de la Banque nationale des eaux souterraines ADES), de deux forages exploités pour l'AEP dans le Néocomien et de quatre forages de l'Albien avec mesures dynamiques. Le travail réalisé a permis d'obtenir une distribution de la perméabilité pour les deux aquifères après calibration des données dynamiques. Les valeurs varient pour les deux ensembles de l'ordre de 10^{-5} m/s à 10^{-4} m/s au centre du bassin. Le champ de température au sein de l'aquifère de l'Albien a été obtenues en régime permanent à l'échelle régionale à partir des données de températures disponibles dans la base ADES. La corrélation température profondeur des données utilisées est bonne et le gradient de température moyen calculé à partir de ces données est estimé à 0,27 °C/km pour l'Albien. Ce gradient a été considéré uniforme sur l'ensemble de la zone modélisée compte tenu des incertitudes liées aux conditions de mesures (puits artésien, mesure en pompage, en tête ou fonde de puits, etc.). Le modèle de température a été calibré en régime permanent dans l'Albien dans un premier temps, avant d'être utilisé en régime transitoire pour réaliser des simulations hydrothermales de doublets.

En 2020, cinq opérations ciblent l'aquifère de l'Albien dont trois sont actuellement en fonctionnement (doublet des tours AGF à Paris, doublet d'Issy-les-Moulineaux et doublet de Clichy-Batignolles). Les opérations de la ZAC du Moulon et la ZAC Polytechnique à Saclay font actuellement l'objet d'études complémentaires pour restaurer l'injectivité des ouvrages. On dénombre une opération ciblant les formations du Néocomien au Plessis-Robinson (Hamm *et al.*, 2020; Maurel *et al.*, 2020).

Pour les aquifères de l'Albien et du Néocomien, les cartes suivantes ont ainsi été recueillies pour être mises à disposition sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr :

- **cote altimétrique du toit et du mur des formations en m NGF** (Seguin, 2015) ;
- **épaisseur des formations en m**, calculée par différence entre le toit et le mur des formations ;
- **perméabilité en m/s**, issue de la calibration du modèle hydrodynamique (Seguin, 2015) ;
- **transmissivité en m²/s**, calculée à partir de l'épaisseur et de la perméabilité des formations ;
- **température des formations en °C**, calculée en régime permanent à partir d'un gradient uniforme de 2,7 °C/ 100 m.

Les cartes de l'Albien et du Néocomien énumérées ci-dessus sont présentées en Annexe 1.a et 1.b respectivement du rapport.

Les données recueillies pour l'**aquifère carbonaté du Lusitanien** (Jurassique supérieur) proviennent de la synthèse réalisée par (Housse *et al.*, 1976) et de l'étude réalisée par (Caritg *et al.*, 2014). L'aquifère du Lusitanien reste actuellement peu connu puisque non exploité pour la ressource géothermale. L'étude de 2014 a ainsi permis de réaliser un état des lieux les connaissances géologiques et hydrogéologiques de l'aquifère à partir des synthèses géologiques (Housse *et al.*, 1976) et des données de forages ayant atteint ou traversant cet horizon (pétroliers et géothermiques) et de produire ainsi un modèle géologique 3D actualisé du Lusitanien dans le secteur de la région Île-de-France. L'étude a également permis d'estimer la chaleur en place et la chaleur exploitable du Lusitanien et de croiser ces estimations avec des informations de surface (consommation d'énergie prédictive et densité de population) pour apprécier le potentiel de développement de la ressource. Le modèle géologique a été réalisé à partir de l'interpolation des données géologiques recueillies dans les rapports de fin de sondages de 213 ouvrages pétroliers et de 78 ouvrages géothermiques de la région Île-de-France. Ces données ont ensuite été interpolées à l'aide du logiciel *GDM-Multilayer* à la maille de 250 mètres de côté. Les failles de Bray et de Banthelu ont été intégrées au modèle puisqu'elles ont une influence majeure sur la géométrie de l'aquifère. La température au toit du Lusitanien a été estimée par krigeage avec dérive externe en profondeur à partir du modèle thermique du Bassin de Paris réalisé par méthode géostatistique dans le cadre du projet Clastiq 1 (Bonté *et al.*, 2010; Bouchot, 2008) et des mesures de température dans le bassin. Les mesures utilisées sont de température en fond de forage (BHT) corrigées des effets de boue de forages et des mesures de diagraphie des ouvrages traversant la formation (soit plus de 460 puits pétroliers et une centaine de mesures sur puits géothermiques).

Pour le Lusitanien, les cartes suivantes ont ainsi été recueillies pour être mises à disposition sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr :

- **cote altimétrique du toit des formations en m NGF** issue du modèle géologique d'après (Caritg, 2014) ;
- **épaisseur totale du réservoir en m**, issue du modèle géologique d'après (Caritg, 2014) ;
- **température au toit du réservoir en °C**, issue du modèle de température interpolé d'après (Bouchot, 2008) et du krigeage avec dérive externe en profondeur des données de BHT corrigées et de diagraphie de température d'ouvrages du Bassin parisien ;
- **écart-type de température en °C**, issue du krigeage de la température au toit du réservoir.

Les cartes du Lusitanien énumérées ci-dessus sont présentées en Annexe 1.c du rapport.

Les données recueillies pour la **formation calcaire du Dogger** proviennent des cartes réalisées par (Hamm *et al.*, 2017) pour l'étude du potentiel géothermique de l'aquifère. Les principales propriétés de l'aquifère ont été obtenues par krigeage des données de puits de 155 ouvrages géothermiques à la maille 250 m par 250 m et sur un secteur limité à la région de l'Île-de-France, où l'aquifère est ciblé pour l'exploitation et l'exploration de la ressource géothermale profonde. L'extension du modèle englobe ainsi la région Île-de-France et l'ensemble des forages géothermiques exploitant la ressource dans ce secteur en 2017. En 2019, on dénombre 50 opérations au niveau de l'aquifère du Dogger dans le Bassin parisien, principalement via des doublets ou bien des triplets. Les opérations sont essentiellement localisées en Île-de-France, à l'exception de l'opération en puits simple de Châteauroux (Hamm *et al.*, 2020).

Les cartes suivantes ont ainsi été recueillies pour être mises à disposition sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr :

- **cote altimétrique du toit calcaire du Dogger en m NGF**, issue de modélisation géologique BRGM ;
- **cote altimétrique du toit du réservoir (premier niveau producteur en m NGF)** obtenue par krigeage géostatistique en utilisant le toit calcaire comme dérive externe. Cette méthode de krigeage permet d'estimer la surface du toit du réservoir par rapport à une surface de référence qui est, ici, le toit des calcaires du Dogger. Ainsi, ce n'est pas directement la variable toit du réservoir coïncidant au toit des niveaux producteurs, qui est krigée, mais la différence, appelée aussi « résidu », entre le toit du réservoir et le toit calcaire. Le toit du réservoir est donc obtenu en additionnant ce résidu à la surface du toit calcaire ;
- **épaisseur totale du réservoir en m,** correspondant à la différence entre le toit du premier niveau producteur et le mur du dernier niveau producteur, calculée par krigeage géostatistique des données aux puits ;
- **cote altimétrique du mur du réservoir (dernier niveau producteur en m NGF)** calculée par différence entre le toit du réservoir et l'épaisseur du réservoir ;
- **épaisseur cumulée productive (utile) en m,** calculée à partir du krigeage du ratio entre l'épaisseur productive et l'épaisseur totale aux puits ;
- **température du réservoir en °C,** calculée par krigeage géostatistique des résidus en utilisant comme dérive externe le gradient géothermique moyen dans le bassin de Paris d'après (Bonté *et al.*, 2010). La valeur krigée est le résidu entre la température mesurée au puits pendant les essais en fin de forage et la température calculée sur la base du gradient géothermique moyen ;
- **pression du réservoir en bar,** calculée par krigeage géostatistique des résidus en utilisant la relation entre la pression de gisement et la profondeur comme dérive externe ;
- **salinité du fluide en g/l**, calculée par krigeage géostatistique des données aux puits ;
- **masse volumique du fluide en kg/m^3,** calculée en utilisant la loi de Haas (1976) et Battistelli (1997) en fonction de la température, de la pression et de la salinité du fluide ;
- **viscosité du fluide en Pa.s,** calculée en utilisant la loi de Islam et Carlson (2012) en fonction de la température, de la pression et de la salinité du fluide ;
- **transmissivité intrinsèque en Dm**, estimée par krigeage géostatistique des données aux puits (aptitude du milieu à l'écoulement d'un fluide) ;
- **transmissivité hydraulique en m²/s**, calculée à partir de la transmissivité intrinsèque, de la masse volumique et de la viscosité du fluide ;

- **transmissivité intégrant sillon marneux à l'ouest de l'IDF en m²/s,** calculée à partir de la transmissivité intrinsèque, de la masse volumique et de la viscosité du fluide. Cette transmissivité intègre la présence du sillon marneux passant à l'ouest de l'Île de France et qui entraine une dégradation progressive de la transmissivité dans cette zone. Le krigeage intègre ainsi une limite de transmissivité nulle à l'ouest du modèle ;
- **température de réinjection dans le réservoir en °C**, calculée à partir de la température du réservoir, en considérant un delta de température équivalent à la moitié de la température initiale du réservoir.

Les cartes du Dogger énumérées ci-dessus sont présentées en Annexe 1.d du rapport.

À l'échelle régionale, un atlas des ressources géothermiques a été réalisé en 2007 sur l'ancienne région de la Lorraine par (Bourgine *et al.*, 2007). Cette étude a permis de réaliser un modèle géologique multicouche 2,5D (avec le logiciel GDM) des formations dont la ressource géothermale semble intéressante pour la très basse et basse énergie *i.e.* les quatre aquifères carbonatés du Tithonien, de l'Oxfordien, du Dogger (Jurassique supérieur à moyen) et du Muschelkalk (Trias moyen) et pour les grès du Buntsandstein du Trias inférieur. Cet aquifère du Trias inférieur constitue la cible principale pour l'exploitation et l'exploration de la ressource de basse température dans ce secteur. Les autres formations sont en effet de faibles profondeurs et constituent ainsi une cible pour l'exploitation de la ressource de très basse température. En 2019, on dénombre trois opérations de géothermie de basse température en fonctionnement sur les communes de Nancy, Lunéville et Dieuze. Toutes ciblent la formation du Trias inférieur à profondeurs entre 400 et 700 mètres et à des températures variant entre 25 et 33 °C (Hamm *et al.*, 2019). La cote altimétrique du toit et mur du formation issue des travaux de (Bourgine *et al.*, 2007) sont consultables sur l'espace cartographique du SIGES Rhin-Meuse[1].

2.1.2. Ressources de moyenne température du Bassin parisien d'après (Caritg *et al.*, 2018)

L'atlas des ressources profondes de moyenne température (Caritg *et al.*, 2018) a fait état des données géologiques et hydrothermales issues des synthèses du Bassin parisien réalisées par (Housse *et al.*, 1976), des données plus spécifiques du Trias (Chaunoy et Donnemarie) à partir des modèles stratigraphiques issues de l'étude CLASTIQ-2 (Bouchot *et al.*, 2012) et du modèle de température issue des travaux de thèse de (Bonté *et al.*, 2010).

Les travaux de (Housse *et al.*, 1976) donnent des informations sur la lithologie, la profondeur et l'épaisseur des formations aquifères, déterminées par corrélations des logs fondamentaux et des diagraphies différées des sondages, mais aussi à partir de l'interprétation de profils sismiques. La fiabilité des cartes définies dépend donc de la qualité et du nombre de données interprétées. L'aquifère du Trias a été ciblé pour l'exploration et l'exploitation pétrolière dans les années 70-80 et a ainsi été traversé par un grand nombre de forage.

[1] http://sigesrm.brgm.fr/?page=carto

Les formations ainsi recensées par l'atlas des cibles géothermiques de moyenne température dans le Bassin parisien sont :

- l'aquifère du Rhétien (Keuper supérieur, Trias supérieur) caractérisé par des faciès gréseux et limité principalement à l'est du bassin ;
- l'aquifère des Grès de Chaunoy (Keuper moyen, Trias supérieur), composé de grès moyens à grossiers d'âge Norien. Les cartes disponibles sont issues des travaux du projet CLASTIQ-2 d'après (Bouchot *et al.*, 2012) sur la zone réduite entre Meaux et Coulommiers ;
- l'aquifère des Grès de Donnemarie (Keuper moyen, Trias supérieur à moyen), composé de grès moyens à grossiers à l'ouest du bassin et d'âge Ladinien et Carnien. Les cartes disponibles sont issues des travaux du projet CLASTIQ-2 d'après (Bouchot *et al.*, 2012) entre Château-Thierry et Nemours avec correction des températures d'après les travaux de (Bonté et al, 2010) ;
- les aquifères des Grès bigarrés et Grès Vosgiens du Buntsandstein (Trias inférieur), uniquement déposés à l'est du bassin et des Grès de Donnemarie sur la partie centre-ouest du bassin (Trias supérieur à moyen) d'après (Housse *et al.*, 1976) ;
- l'interface socle antétriasique avec la couverture sédimentaire, caractérisé par une possible perméabilité de fracture. Les éléments sont issus de l'étude sismo-tectonique en France (Grellet *et al.*, 1993) pour les profondeurs et du modèle 3D ISATIS de température des bassins sédimentaires d'après (Bonté *et al.*, 2010) pour les cartes de température.

Les cartes ainsi numérisées sont présentées en Annexe 2 du rapport.

(Caritg *et al.*, 2018) précisent certaines limites à l'analyse des travaux de synthèse d'après (Housse et Maget, 1976). Ainsi, les niveaux potentiellement perméables mais dont l'épaisseur et la composition étaient mal définis lors des études n'ont pas été pris en compte. Les unités peu perméables au sein d'ensemble perméable ont en revanche été intégrées. Le niveau de fracturation généralement associé aux faciès carbonatés qui peut par secteur augmenter considérablement la perméabilité des formations n'a pas été renseigné dans les cartes. Aussi, la température au toit des aquifères du Bassin parisien a été évaluée à partir d'un gradient géothermique « approché » pour lequel la valeur moyenne de 0,3 °C/km classiquement utilisée pour les bassins sédimentaires du globe en 1975 a été réajustée de manière régionale avec les données de température mesurées sur forages (tests hydrogéologiques dans le Dogger, mesures de type « *Bottom Hole Temperature* » de la boue de forage en fond de forage). La validité des données de température BHT est à considérer avec prudence sachant que la nécessaire correction des « effets de boue » sur ces mesures n'a pas été pratiquée. La lecture des cartes de température doit donc prendre en compte le fait que les gradients géothermiques utilisés ne sont que des moyennes. Au sujet de l'étude réalisé par (Bouchot *et al.*, 2012), il est a noté que l'emprise des cartes est limitée à la partie centrale du bassin. Les cartes de températures produites ont été réalisées à partir d'un travail de cohérence avec les données issues de (Bonté *et al.*, 2010) et le lecteur doit donc considérer avec prudence l'interprétation de telles cartes.

En 2019, 4 forages ciblent les grès du Trias et exploitent la ressource géothermale de basse température avec un ouvrage au sud du Bassin parisien à Châteauroux et trois dans l'ancienne région de Lorraine (Hamm *et al.*, 2020).

2.1.3. Synthèses de données recensées

La connaissance des formations de l'Albien, du Néocomien et du Dogger bénéficie des informations acquises lors de l'exploration et l'exploitation géothermale mais aussi pour l'alimentation en eau potable pour les aquifères moins profonds de l'Albien-Néocomien. Cependant, la connaissance reste limitée aux secteurs d'exploitation ou aux secteurs traversées par des ouvrages d'exploration et des lignes sismiques ayant fait l'objet d'interprétation. L'étude réalisée par (Darnet *et al.*, 2020) présente une analyse technico-économiques des solutions pouvant être mises en œuvre pour dé-risquer les projets d'exploration de nouveaux aquifères ou des zones actuellement peu connues du Dogger aussi bien à l'échelle régionale qu'à l'échelle plus fine des locales ou du projet.

Le Tableau 1 synthétise les différentes cibles de basse et moyenne température du Bassin parisien recueillies. Les informations relatives aux formations de l'Albien, du Néocomien, du Lusitanien et du Dogger sont disponibles sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr. Les formations plus profondes seront diffusées à l'horizon 2021/2022. L'ensemble des formations cartographiées a été rassemblé dans un SIG.

Formation et lithologie	***Série***	***Données disponibles***	***Échelle***
Albien : formation silico-clastique (sable et argile)	Crétacé inférieur	Paramètres géologiques, hydrogéologiques et thermiques issus d'un modèle MARTHE d'après (Seguin *et al.*, 2015) : toit, mur, épaisseur totale et utile, perméabilité, transmissivité, température. Piézométrie synchrone (Dupaigne *et al.*, 2019)	Bassin parisien, maille de 2 km de coté
Néocomien : formation silico-clastique (sable et argile)	Crétacé inférieur	Paramètres géologiques, hydrogéologiques et thermiques issus d'un modèle MARTHE (Seguin *et al.*, 2015) : toit, mur, épaisseur totale et utile, perméabilité, transmissivité, température.	Bassin parisien, maille de 2 km de coté
Lusitanien : formation carbonatée	Malm (Jurassique supérieur)	Paramètres géologiques issus du GDM-Multilayers d'après (Caritg *et al.*, 2014) : profondeur et épaisseur. Cartes de température interpolée au toit de la formation et écart-types issues du modèle 3D ISATIS de température des bassins sédimentaires (Bonté *et al.*, 2010).	Région Ile-de-France, maille 250 m de coté
Dogger : formation carbonatée (calcaires oolithiques)	Jurassique moyen	Paramètres géologiques et hydrogéologiques issus du krigeage des données de puits (profondeur toit, mur, épaisseur totale et utile, transmissivité hydraulique et intrinsèque, salinité, pression de gisement) d'après (Hamm *et al.*, 2017). Carte de température issue du krigeage des données de température en utilisant le gradient de température d'après (Bonté *et al.*, 2010)	Région Ile-de-France, maille 250 m de coté
Rhétien (Keuper supérieur) : formation silico-clastique (grès)	Trias supérieur	Paramètres géologiques et hydrogéologiques issus des études de (Housse *et al.*, 1976) à partir des interprétations géologiques et géophysiques (logs fondamentaux, diagraphies différées des ouvrages pétroliers et géothermiques)	Bassin parisien (secteur est du bassin)
Chaunoy, Donnemarie (Keuper moyen) : formation silico-clastique (grès)	Trias supérieur	Paramètres géologiques et propriétés pétrophysiques issus du modèle stratigraphique 3D sous PETREL (Bouchot *et al.*, 2012) et de la synthèse réalisée par (Housse *et al.*, 1976) pour Donnemarie à l'échelle du bassin (à l'ouest). Cartes de la température au toit des aquifères issues du modèle 3D ISATIS de température (Bonté *et al.*, 2010). Modélisation thermo-hydrodynamique (TH) (Bouchot *et al.*, 2012; Hamm *et al.*, 2016, 2012)	Centre du Bassin parisien, maille 500 m de coté Échelle du bassin pour cartes d'après (Housse et Maget, 1976) à l'ouest du bassin
Buntsandstein : formation silico-clastique (grès vosgiens et bigarrés)	Trias inférieur	Paramètres géologiques et hydrogéologiques issus des études de (Housse *et al.*, 1976) à partir des interprétations géologiques et géophysiques (logs fondamentaux, diagraphies différées des ouvrages pétroliers et géothermiques)	Bassin parisien (secteur est du bassin)
Socle antétriasique	Antétriasique	Paramètres géologiques issus de l'étude sismo-tectonique en France (Grellet *et al.*, 1993). Carte de température issues du modèle 3D ISATIS de température des bassins sédimentaires (Bonté *et al.*, 2010)	Bassin parisien

Tableau 1 : Synthèse des données recensées pour les principaux aquifères ciblés pour l'exploitation et l'exploration de la ressource géothermale de basse et moyenne température du Bassin parisien.

2.2. BASSIN AQUITAIN : DONNÉES RECUEILLIES POUR LES CIBLES GÉOTHERMALES DE BASSE ET MOYENNE TEMPÉRATURE

2.2.1. Ressources de basse température du Bassin aquitain

Les ressources disponibles dans le sous-sol du Bassin aquitain ont été largement étudiées depuis les années 70 pour l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures (Bilotte, 1991; BRGM *et al.*, 1974; Curnelle *et al.*, 1986) mais aussi pour la caractérisation des ressources en eaux souterraines et des ressources géothermales (Durst *et al.*, 2011; Housse *et al.*, 1977; Saltel *et al.*, 2016).

La géothermie de basse température s'est développée dans le Bassin aquitain, à partir des années 1970, avec l'exploitation des aquifères de l'Éocène, du Crétacé supérieur, du Jurassique et du Trias (secteur Charente-Maritime). On comptabilise en 2019 d'après (Hamm *et al.*, 2020), 15 opérations en fonctionnement (cf. Tableau 2), majoritairement en puits de production unique ou multiple, avec rejet des eaux de production en surface. Seule l'exploitation de Bègles fonctionne suivant le principe du doublet. Un nouveau doublet a été réalisé à Bordeaux (opération Plaine de Garonne Énergie) a été réalisé entre juillet 2019 et mars 2020. Cette nouvelle opération vise les formations sableuses et calcaires du Crétacé supérieur à 750 m de profondeur et des températures moyennes de 45 °C.

Nom de l'opération	Etat de l'opération	Année de forages	Aquifère captée	Type de fonctionnement	Commune
BLAGNAC 1 RAMIER	**Fonctionnement**	1967	Eocène	puits simple	BLAGNAC
BLAGNAC 2 RITOURET	**Fonctionnement**	1976	Eocène	puits simple	BLAGNAC
LAMAZERE	**Arrêté**	1981	Yprésien - Paléocène	puits simple	LAMAZERE
BEGLES	**Fonctionnement**	1982	Eocène	doublet	BEGLES
LIBOURNE GEYROSSE	**Arrêté**	1981	Eocène moy.	puits simple	LIBOURNE
HAGETMAU	**Fonctionnement**	1980	Yprésien - Paléocène (Eocène inf.)	deux puits producteurs	HAGETMAU
NOGARO 2	**Fonctionnement**	1982	Yprésien (Eocène inf.)	puits simple	NOGARO
SAINT-PAUL-LES-DAX	**Fonctionnement**	1994	Danien - Paléocène inf.	puits simple	SAINT-PAUL LES DAX
GUJAN MESTRA LA HUME	**Non connu**	1979	Eocène inférieur - Maastrichtien (Eocène inf., Crétacé sup.)	deux puits producteurs	GUJAN-MESTRE
BORDEAUX MÉRIADECK	**Fonctionnement**	1981	Turonien - Cénomanien (Crétacé sup.)	puits simple	BORDEAUX
MERIGNAC - BA 106	**Fonctionnement**	1984	Turonien - Cénomanien (Crétacé sup.)	puits simple	MÉRIGNAC
MONT-DE MARSAN	**Fonctionnement**	1975	Sénonien - Turonien (Crétacé sup.)	deux puits producteurs	MONT-DE-MARSAN
PESSAC - SAIGE FORMANOIR	**Fonctionnement**	1982	Sénonien - Cénomanien - Turonien (Crétacé sup.)	puits simple	PESSAC
PESSAC - STADIUM	**Fonctionnement**	1961	Maastrichtien - Campanien (Crétacé sup.)	puits simple	PESSAC
BORDEAUX BENAUGE	**Arrêté**	1981	Turonien - Cénomanien (Crétacé sup.)	puits simple	BORDEAUX
BORDEAUX GRAND PARC	**Non exploité**	1985	Turonien - Cénomanien (Crétacé sup.)	puits simple	BORDEAUX
Bordeaux PGE	**En développement**		Turonien - Cénomanien (Crétacé sup.)	doublet	BORDEAUX
LORMONT GENICART	**Non exploité**	1969	Turonien - Cénomanien (Crétacé sup.)	puits simple	LORMONT
TIRE-GANACHE	**Arrêté**	1979	Cénomanien (Crétacé sup.)	puits simple	DAX
CHASSELOUP-LAUBAT	**Fonctionnement**	1984	Dogger : Bathonien-Bajocien (Jurassique sup.)	puits simple	LA ROCHELLE
ARGELOUSE - SORE	**Non connu**	1959	Tithonien (Jurassique sup.)	puits simple	ARGELOUSE
MIOS LE TEICH	**Fonctionnement**	1964	Portlandien - Purbecko - Wealdien (Jurassique sup. et Crétacé sup.)	puits simple	LE TEICH
LA BARTERE	**Fonctionnement**	1990	Kimmeridgien - Oxfordien - Dogger (Jurassique sup. et moy.)	puits simple	CASTELJALOUX
JONZAC	**Fonctionnement**	1980	Trias	deux puits producteurs	JONZAC

Tableau 2 : Opérations de géothermie profonde répertoriées en 2019 dans la base de données SYBASE (Hamm et al., 2020) dans le Bassin aquitain.

Plusieurs autres projets de géothermies profondes sont également à l'étude, notamment au niveau de l'ancien doublet non exploité de Grand Parc à Bordeaux foré en 1985, mais aussi à Talence, à Lormont et au niveau des opérations de Mont-de-Marsan avec la possible création d'un nouvel ouvrage de réinjection.

L'étude des ressources géothermales profonde a été synthétisée dans les travaux de (Housse *et al.*, 1977) à l'échelle du Bassin aquitain, dans les travaux de (Durst *et al.*, 2011) sur l'ancienne région Aquitaine et Midi-Pyrénées via également les travaux de (Ghyselinck-Bardeau *et al.*, 2017) et dans les travaux de (Bichot *et al.*, 2009) sur le département de Charente-Maritime. Ces études présentent les différentes formations aquifères, l'histoire géologique des dépôts, les faciès qui les constituent, leur extension et profondeur. La Figure 1 présente une coupe géologique sud-ouest nord-est du Bassin aquitain identifiant les principales formations aquifères.

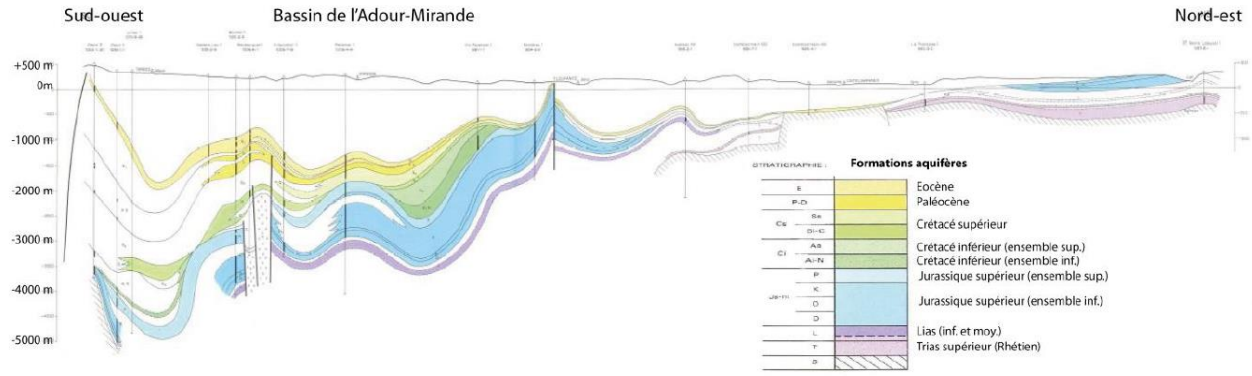


Figure 1 : Coupe géologique générale du Bassin aquitain et localisation des formations aquifères, d'après (Housse et al., 1977).

Plusieurs modèles géologiques et hydrogéologiques ont été produits au niveau du Bassin aquitain (Figure 2) afin d'améliorer la connaissance et la gestion des ressources en eaux. On distinguera pour l'identification des cibles la partie nord (secteur Charente-Maritime), la partie centrale de l'actuelle région Nouvelle-Aquitaine avec le modèle nord-aquitain (MONA) et la partie sud du Bassin avec le modèle GAIA.

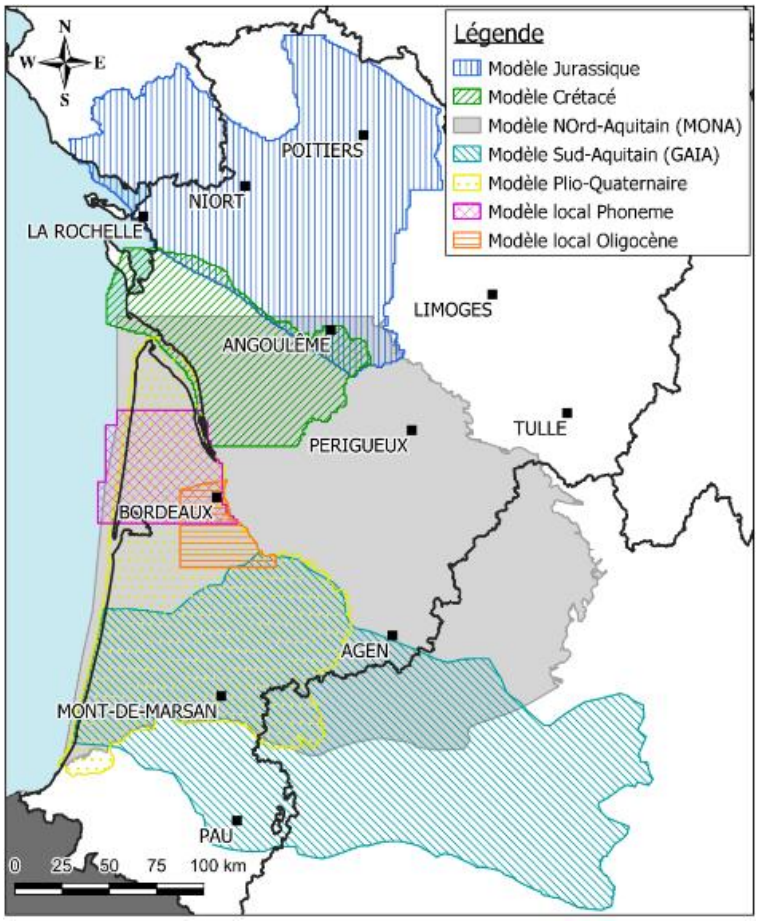


Figure 2 : Aperçu des emprises des modèles hydrodynamiques couvrant le Bassin aquitain.

Dans la partie nord du bassin, au niveau du département de la Charente-Maritime, l'étude de (Bichot *et al.*, 2009) indique un potentiel géothermique de basse température intéressant pour les aquifères multicouches calcaires du Dogger et de l'infra-Toarcien dont les faciès peuvent être variés (sables, calcaires, dolomies). Il apparait souvent difficile de distinguer le Lias du Trias sous-jacent dans la partie sud du département. Cet aquifère, actuellement exploité par des forages géothermaux (Jonzac), est profond sur la partie sud du département (au-delà de 1 000 m) avec des températures pouvant dépasser 60 °C. L'atlas des ressources de moyenne température (Caritg, 2018) a permis de recueillir les cartes de profondeur et température réalisés par (Housse *et al.*, 1977) pour les formations du Jurassique inférieur et Rhétien (Trias supérieur) dans ces secteurs (cf. section 2.2.2).

Le modèle MONA (modèle nord-aquitain, Figure 2 et Figure 3), recouvre une grande partie du centre-nord du Bassin aquitain. Construit initialement pour répondre aux problématiques de l'effondrement des niveaux de la nappe de l'Éocène, le modèle présente plus de 20 ans de développement et apporte aujourd'hui des informations sur 30 couches (15 aquifères et 15 épontes) du Plio-Quaternaire au Jurassique moyen à la maille de 500 m de côté dans sa version v.4 (Saltel *et al.*, 2016). Pour la constitution de cette version, le modèle géométrique est utilisé dans le logiciel Marthe pour réaliser des simulations hydrodynamiques en régime permanent. Les simulations prennent en considération les recharges et prélèvements des forages d'eau avant d'ajuster le champ des perméabilités du modèle précédent (version 3.3b) pour calibrer le modèle actuel.

Le modèle MONA constitue une source d'information très intéressante pour la caractérisation de la ressource géothermale de basse température et la géométrie peut être consultée sur l'espace cartographique du SIGES Aquitaine[2]. Ces informations ont également été recueillies au cours du projet Atlas GTH BT dans un SIG (mur et toit des formations du modèle MONA V4 d'après (Saltel *et al.*, 2016) avec également le champ de perméabilité du modèle dans sa version V3.3b à la maille plus grossière de 2 km de côté. La version actualisée du modèle de perméabilité sera intégrée par la suite au SIG du projet.

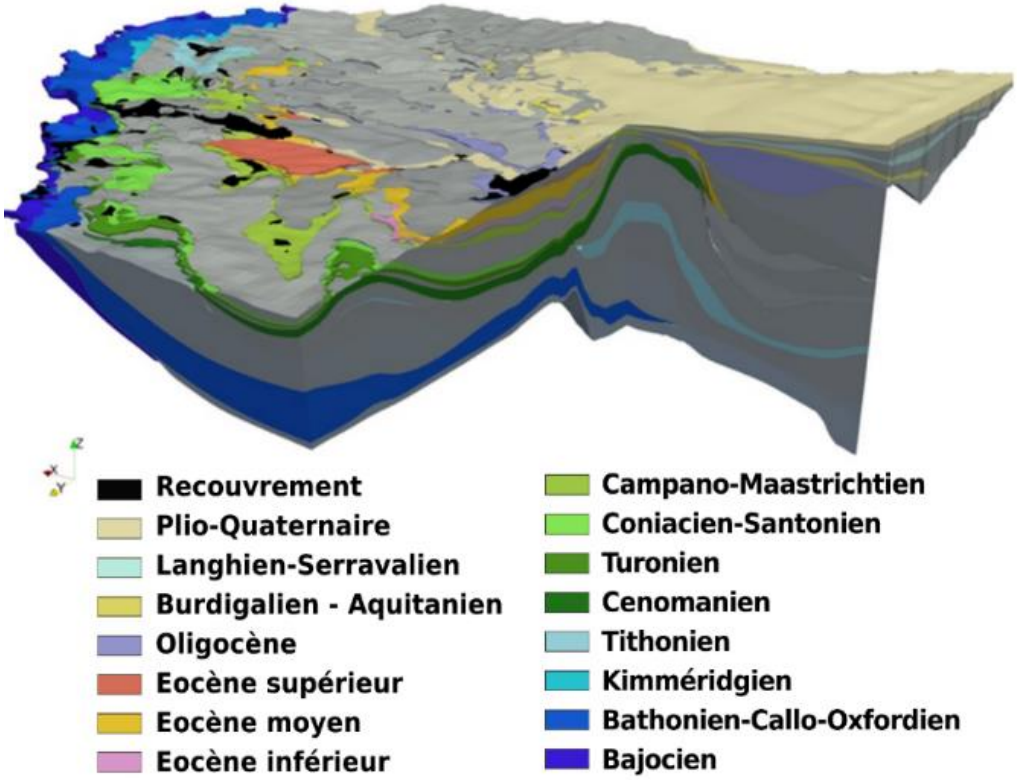


Figure 3 : Aperçu de la géométrie du Modèle Nord-Aquitain (Saltel et al., 2016).

Le modèle MONA de la partie nord du Bassin aquitain permet de distinguer plusieurs aquifères ciblés pour l'exploration et l'exploitation géothermales de basses températures (cf. Figure 3 et Tableau 3). On distingue ainsi les formations listées ci-après. Le contexte géologique et hydrogéologue de ces formations sont décrits en détails sur le SIGES Aquitaine ou encore dans les travaux de (Durst *et al.*, 2011) :

- les formations aquifères de l'Éocène avec :
  - l'aquifère de l'Éocène supérieur, caractérisé par des faciès sableux et argileux dont la profondeur est relativement faible sur la majeure partie du bassin,
  - l'aquifère de l'Éocène moyen, caractérisé d'est en ouest par (1) les sables de l'Éocène inférieur à moyen depuis l'affleurement à l'est jusqu'au Médoc dans le nord et la Garonne à l'ouest (formation de Guizengeard, sables inférieurs du Bordelais) et par (2) les facies calcaires du domaine de plateforme marine de l'Éocène moyen (calcaires de Blaye, de Listrac et de Couguègues par exemple),

[2] http://sigesaqi.brgm.fr/?page=carto

- l'aquifère de l'Éocène inférieur, caractérisé par des faciès sableux de type fluviatiles depuis les affleurements à l'est jusqu'au Bordelais puis vers l'ouest par des faciès de plate-forme marine.

Comme identifié en Tableau 2, une opération à Bègles cible l'aquifère de l'Éocène moyen à supérieur *via* un doublet atteignant des profondeurs de 250 mètres et des températures d'environ 28 °C dans la partie nord du bassin.

- les formations du Crétacé supérieur :
  - l'aquifère du Campanien supérieur - Maastrichtien, caractérisé par des calcaires bioclastiques plus ou moins fissurés et karstifiés avec des passages gréseux (en Dordogne) ou dolomitiques (secteurs du bassin d'Arcachon, sud Médoc et ouest des Landes),
  - l'aquifère du Coniacien-Santonien, caractérisé par des calcaires, grès et sables avec des variations verticales et latérales de faciès dans les calcaires (à porosité de fissures et conduits karstiques) et dans les assises gréso-sableuses (à porosité interstitielle, souvent séparées par des craies et marnes). À noter que l'aquifère est en communication avec l'aquifère du Turonien dans le nord-ouest de la Dordogne et l'ouest de la Gironde. Ils sont séparés au sud de Périgueux et en Bergeracois, par les marnes au sommet du Turonien et celles du Coniacien inférieur. Dans le centre et le sud du bassin, les faciès sont moins individualisés et plus en continuités avec ceux du Turonien,
  - l'aquifère du Turonien, caractérisé par des faciès calcaires crayeux et des faciès gréseux dans l'est de la Dordogne et le nord-est du Lot-et-Garonne. L'aquifère est absent dans le sud-est et le sud suite à l'érosion anté-tertiaire et sur la partir sud-Gironde dû à une lacune d'érosion (Miocène reposant sur le Cénomanien),
  - l'aquifère du Cénomanien, caractérisé par un multicouche complexe de réservoirs sablo-gréseux à orbitolinidés à la base (Cénomanien inférieur), de réservoirs carbonatés et par endroit, par des réservoir gréseux (Cénomanien supérieur). Des parties dolomitisées et profondément karstifiées sont visibles dans le centre et sud du bassin. Dans l'extrême sud du bassin, près de Pau, le réservoir est imperméable (flyschs).

  N.B : plusieurs ouvrages exploitent ces aquifères du Crétacé supérieur dans la région de Bordeaux (Bordeaux Mériadeck, Mérignac et Pessac Saige Formanoir, autour de 1 000 et 1 200 m de profondeur et à des températures entre 48°C et 53°C). L'aquifère est absent dans la moitié orientale de la Dordogne et la majorité du Lot-et-Garonne.

- les formations du Jurassique supérieur avec :
  - les aquifères du Tithonien, caractérisés par des formations géologiques sur trois secteurs déconnectés par une érosion post-jurassique (anciennement nommés Portlandien) :
    - dans le secteur du Périgord-Quercy, caractérisés par deux formations carbonatées d'âge Tithonien avec à la base la Formation de Salviac (quasi équivalent de la Formation de Peyrilles), au sommet la Formation de Cazals,
    - dans le secteur des Charentes, caractérisés par les formations affleurantes de La Marteille et de Cercles, reconnues au cœur de l'anticlinal de Chapdeuil, d'âge Tithonien inférieur-Kimméridgien terminal,
    - dans le sous-bassin de Parentis, caractérisés par la formation de Mano, d'âge Tithonien à Berriasien, et de puissance variable en fonction de la dolomitisation. Elle constitue localement un très bon réservoir lorsqu'elle est fracturée et en position structurale favorable (Cazaux, Parentis). Dans certains gisements pétroliers il existe deux niveaux différents, qui peuvent être séparés (Cazaux, Tamaris) ou non (Parentis, Lugos),
    - dans le sous-bassin de l'Adour-Mirande (ou sous-bassin d'Arzacq), sur presque tout le sud du Bassin aquitain, c'est la zone la plus grande, mais aussi la plus structurée où existe la dolomie de Mano, surmontée par les faciès des brèches de Garlin,

- l'aquifère du Kimméridgien, caractérisé par des brèches plus ou moins cimentées à la base et des faciès calcaires micritiques de plate-forme interne au sommet, des calcaires micritiques à oncolites puis bioturbés ;

- les formations du Jurassique moyen :
  - l'aquifère du Bathonien-Callovo-Oxfordien, composé des formations de Cajarc (partie supérieure, Bathonien moyen à supérieur), de Rocamadour (Bathonien supérieur à Callovien), de Saint-Géry et de Vers (Oxfordien). Ces formations sont caractérisées par des faciès de calcaires oolithiques et de calcaires dolomitiques fortement karstifiés ;
  - l'aquifère du Bajocien, caractérisé par des calcaires oolitiques et de dolomie, des calcaires granulaires.

Formation	N° de couche	Codification MONA	Nombre de mailles	Superficie en km²
Formations de recouvrement et alluvions flandriennes	1	RECO	8 451	2 113
Aquifère du Plio-Quaternaire	2	QUAT	66 821	16 705
Éponte au sommet du Langhien-Serravallien	3	EPLS	49 862	12 466
Aquifère du Langhien-Serravallien	4	LASE	39 857	9 964
Éponte au sommet de l'Aquitanien	5	EPAQ	59 732	14 933
Aquifère de l'Aquitanien	6	AQUI	51 643	12 911
Éponte Chattien-Miocène	7	EPCM	100 683	25 171
Aquifère de l'Oligocène	8	OLNP	58 673	14 668
Éponte à la base de l'Oligocène	9	EPOL	93 847	23 462
Aquifère de l'Éocène supérieur	10	EOCS	38 156	9 539
Éponte à la base de l'Éocène supérieur	11	EPES	88 724	22 181
Aquifère de l'Éocène moyen	12	EOCM	79 163	19 791
Éponte à la base de l'Éocène moyen	13	EPEO	81 167	20 292
Aquifère de l'Éocène inférieur	14	EOCI	62 964	15 741
Éponte au sommet du Campanien	15	EPCA	93 016	23 254
Aquifère du Campanien	16	CAMP	69 592	17 398
Éponte au sommet du Coniacien Santonien	17	EPCS	95 941	23 985
Aquifère du Coniacien-Santonien	18	COST	96 370	24 093
Éponte au sommet du Turonien	19	EPTU	71 417	17 854
Aquifère du Turonien	20	TURO	102 018	25 505
Éponte au sommet du Cénomanien	21	EPCE	108 764	27 191
Aquifère du Cénomanien	22	CENO	86 186	21 547
Éponte au sommet du Tithonien	23	EPTI	58 380	14 595
Aquifère du Tithonien	24	TITH	37 483	9 371
Éponte au sommet du Kimméridgien	25	EPKI	123 820	30 955
Aquifère du Kimméridgien	26	KIMM	54 756	13 689
Éponte au sommet du réservoir du Bathonien-Callovo-Oxfordien	27	EPCX	118 402	29 601
Aquifère du Bathonien-Callovo-Oxfordien	28	BACX	149 946	37 487
Éponte au sommet du Bajocien	29	EPBJ	134 177	33 544
Réservoir du Bajocien	30	BAJO	102 824	25 706

Tableau 3 : Nombre de mailles et superficie des couches constituant le modèle MONA dans sa version v4 d'après (Saltel, 2016).

Les travaux d'atlas des ressources géothermales réalisés par (Durst *et al.*, 2011) concernant la ressource de basse température sur le territoire de l'ancienne région Aquitaine sont actuellement diffusés sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr. L'atlas repose, pour la partie nord du territoire, sur les données du modèle MONA dans sa version de 2011 (v3.3) à la maille de 2 km de côté (Figure 4). L'interrogation de ces couches, illustrée en Figure 5, permet d'identifier les formations disponibles sur un secteur donnée, leur profondeur, une estimation de leur température et de leur productivité.

Il est important de noter que l'atlas d'après (Durst, 2011) comporte un certain nombre de limites d'interprétation puisqu'il a été réalisé à partir d'une version du modèle MONA qui a depuis été mise à jour à une maille plus fines avec un certain nombre d'évolution, notamment en ce qui concerne la géométrie et le champ de perméabilité des différentes formations qui le compose. Aussi, l'atlas est limité à l'ancienne région Aquitaine tandis que l'extension du modèle MONA dans sa version actuelle dispose d'une extension plus vaste (cf. Figure 3).

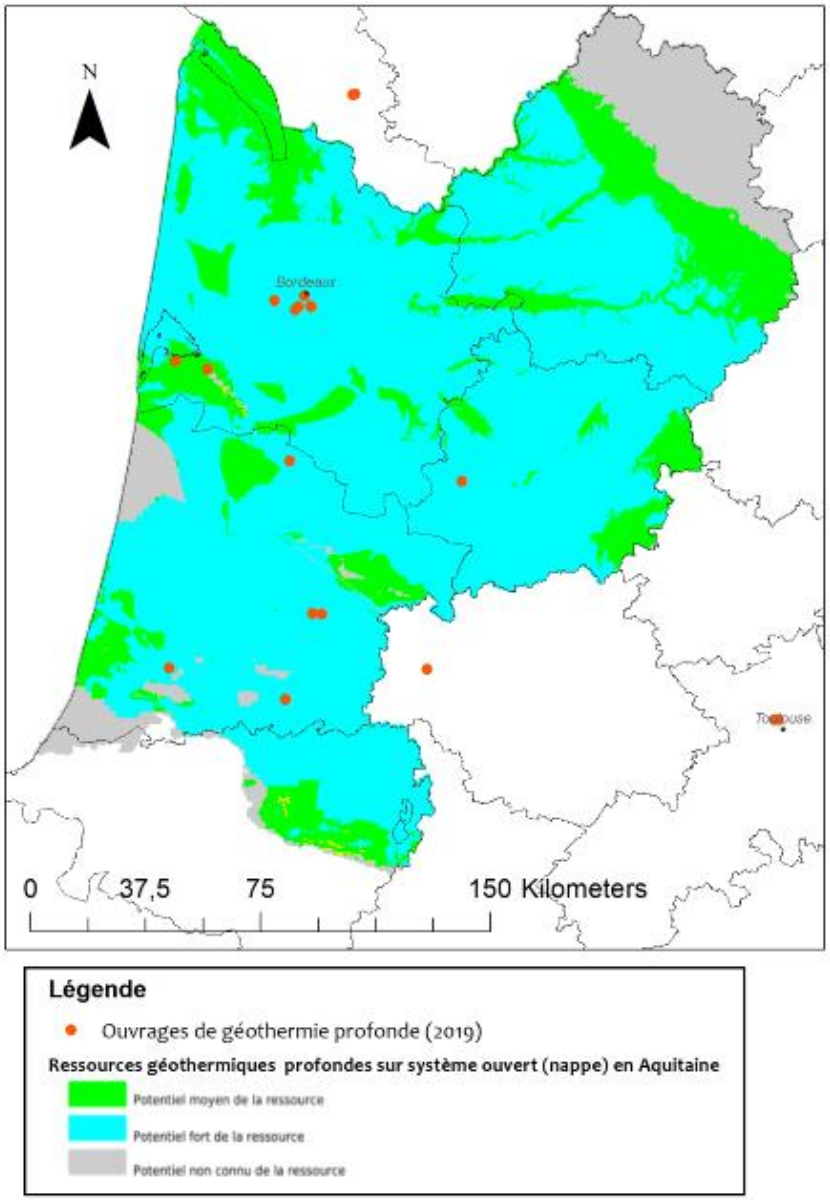
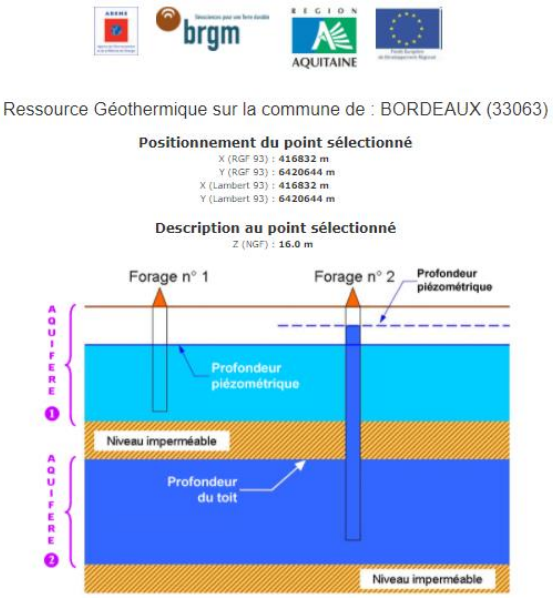


Figure 4 : Atlas des ressources géothermiques profondes sur nappe en ex-région Aquitaine d'après (Durst et al.*, 2011) disponible sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr.*



Aquifère	Toit (Côte NGF)	Mur (Côte NGF)	Piézométrie (Côte NGF)	Profondeur d'accès (m)	Température °C	Débit exploitable	Chimie	Ouvrage AEP (*)	Type d'aquifère	Potentiel TBE	Potentiel BE
Plioquaternaire	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Non défini	Inconnue	Non	Non artésien	Potentiel inconnu	Potentiel inconnu
Oligocène	9	-10	7	8	14	Supérieur à 100		Oui	Non artésien	Fort potentiel	Potentiel inconnu
Eocène-supérieur	-102	-124	1	118	17	0 à 5		Non	Non artésien	Potentiel faible	Potentiel inconnu
Eocène-moyen-SIM	-176	-351	-13	192	22	Supérieur à 100		Oui	Non artésien	Fort potentiel	Fort potentiel
Eocène-inférieur	-412	-460	-11	428	26	50 à 100		Non	Non artésien	Potentiel inconnu	Potentiel moyen
Campano-Maastrichtien	-572	-626	2	588	33	5 à 10	Inconnue	Non	Non artésien	Potentiel inconnu	Potentiel moyen
Coniacien-Santonien	-858	-879	16	874	36	0 à 5	Inconnue	Non	Artésien	Potentiel inconnu	Potentiel moyen
Turonien	-884	-938	18	900	44	10 à 50	Inconnue	Non	Artésien	Potentiel inconnu	Potentiel moyen
Cénomanien	-938	-1097	18	954	51	Supérieur à 100	Inconnue	Non	Artésien	Potentiel inconnu	Fort potentiel
Bathonien-Oxfordien	-1380	-1627	30	1396	56	50 à 100		Non	Artésien	Potentiel inconnu	Potentiel moyen

(*) Présence d'un captage exploitant la nappe pour l'alimentation en eau potable dans un rayon de 2km.

Figure 5 : Exemple d'interrogation de l'atlas des ressources géothermiques profondes sur nappe en ex-région Aquitaine disponible sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr.

Dans la partie sud du Bassin aquitain, le modèle Sud Adour Garonne (Seguin, 2003) a été utilisé lors de la réalisation de l'atlas des ressources géothermales d'après (Durst, 2011). Ce modèle a notamment permis de caractériser les murs et toits des formations de l'Éocène moyen (Sables Infra-Molassiques) qui représentent dans le secteur la principale cible pour l'exploration et l'exploitation de la ressource.

En effet, cinq opérations de géothermie profonde exploitent actuellement (état 2019 d'après (Hamm, 2019)) les formations de l'Éocène sur la partie sud du bassin : deux opérations en Haute-Garonne (Blagnac 1 et Blagnac 2), une opération dans le Gers (Nogaro) ainsi qu'une opération dans les Landes (Hagetmau).

L'atlas des ressources issu des travaux de (Durst, 2011) a permis de présenter les informations relatives à l'aquifère de l'Éocène moyen en région Midi-Pyrénées (profondeur, température, cote piézométrique, transmissivité) et de proposer une caractérisation du potentiel géothermique (en termes de favorabilité) sur la région. Le potentiel a ainsi été identifié comme fort sur une majeure partie de la zone étudiée (cf. Figure 6). Ces informations sont consultables sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr. De la même façon que pour la partie nord de l'atlas, la carte peut être interrogée afin d'identifier la profondeur des formations et de nombreuses propriétés associées à cet aquifère de l'Éocène inférieur à moyen. Il est en revanche important de noter que l'atlas des ressources géothermales sur l'aquifère des Sables Infra-Molassiques (Durst, 2011) comporte un certain nombre de limites d'interprétation puisqu'il a été réalisé à partir d'un modèle datant de 2003.

Ainsi, depuis la réalisation de cet atlas, de nouvelles modélisations ont été entreprises en 2015 *via* le projet GAIA (André *et al.*, 2020) qui doit se poursuivre en 2021 et 2022 (cf. contour illustré en Figure 2). Le projet GAIA a pour objectif d'améliorer la connaissance géologique, hydrogéologique et géochimique des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain de l'Éocène au Crétacé supérieur, et en particulier celui des formations aquifères de l'Éocène moyen : les Sables Infra Molassiques (SIM). Le modèle géométrique et les caractéristiques des aquifères seront intégrées au SIG du projet Atlas GTH BT pour la valorisation des données sur l'espace cartographique en ligne une fois le projet finalisé.

Le modèle géologique GAIA bénéficie notamment d'une base de données constituée de plus de 1 000 ouvrages profonds réinterprétés et de plus de 6 000 km de lignes sismiques également re-traitées et permet ainsi une meilleure appréciation de la géométrie des SIM ciblés pour l'exploration et l'exploitation de la ressource de basse température dans le sud du bassin. Ce modèle constitue ainsi une évolution par rapport au modèle Sud-Adour-Garonne d'après (Ghyselinck-Bardeau *et al.*, 2017) et repris par (Durst, 2011) et devrait permettre une meilleure appréciation des ressources disponibles dans le sud du Bassin aquitain.

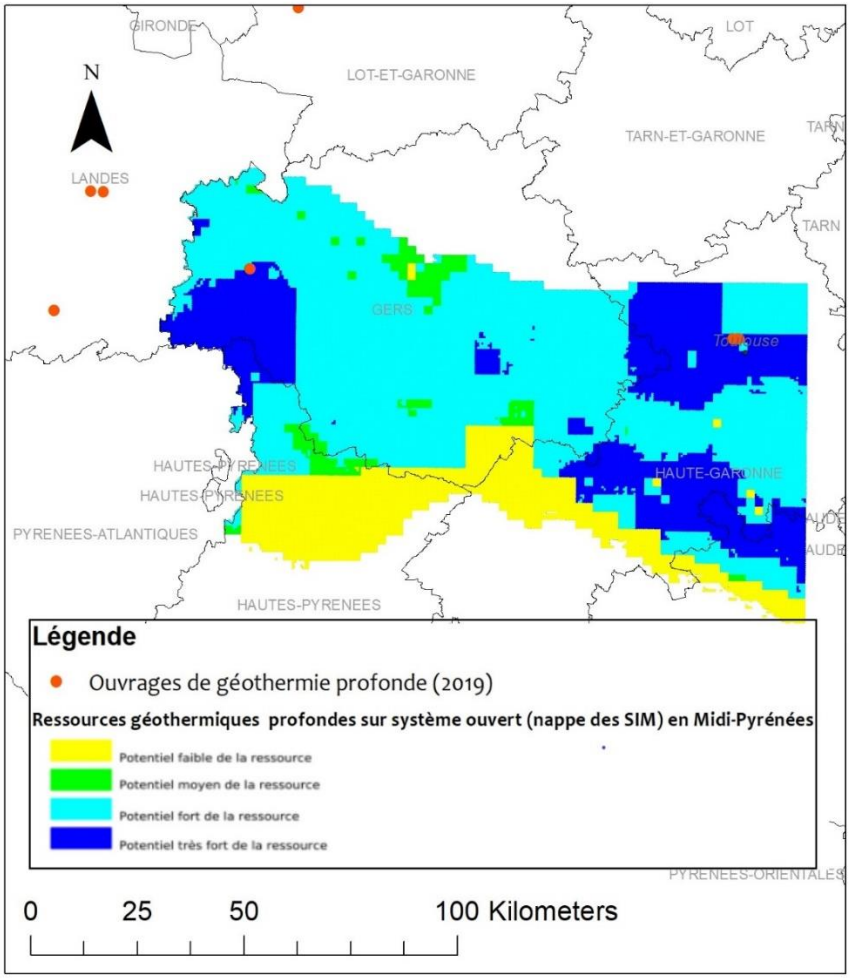


Figure 6 : Atlas des ressources géothermiques profondes sur nappe en ex-région Midi-Pyrénées d'après (Durst et al., 2011) disponible sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr.

On distingue également dans cette partie sud du Bassin aquitain l'**aquifère du Paléocène** sur une bande large de 100 à 50 km environ, entre les Landes, les Pyrénées-Atlantiques et l'Ariège (Durst, 2011). L'aquifère, plus communément appelé Dano-Paléocène est constitué en majorité de calcaires. La qualité du réservoir est assez variable à cause de la présence de réseaux karstiques. Les faciès se répartissent en formations carbonatées et détritiques, dont la disposition schématique est, selon un alignement ouest-est, pratiquement limitée, au nord, par les structures anticlinales de Roquefort, Créon, d'Armagnac et Cézan-Lavardens. À l'ouest, le réservoir se ferme par leur inter-stratification dans les faciès marneux marins. Cet aquifère est actuellement exploité pour la ressource géothermale de basse température à Saint-Paul-lès-Dax où un forage capte des eaux à des températures de 65 °C à 1 600 mètres de profondeur environ. Le projet GAIA devrait également permettre pour cette aquifère du Paléocène d'améliorer la compréhension et la caractérisation des ressources disponibles dans la partie sud du Bassin aquitain.

2.2.2. Ressources de moyenne température du Bassin aquitain d'après Caritg et al., 2018

L'atlas des ressources profondes de moyenne température (Caritg *et al.*, 2018) a fait état des données géologiques et hydrothermales issues des synthèses du Bassin aquitain réalisées par (Housse *et al.*, 1977) en vue d'identifier le potentiel de la ressource. Les informations recueillies sont relatives d'une part aux formations homogènes et perméables dans leur ensemble et aux formations hétérogènes présentant de fortes variabilités lithologiques d'autre part. La lithologie, la profondeur et l'épaisseur des formations considérées dans ces synthèses sont issues d'un travail de corrélation de logs fondamentaux, des diagraphies et grâce à l'interprétation de profils sismiques. La fiabilité des cartes définies dépend donc de la qualité et du nombre de données interprétées.

Les six formations ainsi recensées par l'atlas des cibles géothermiques de moyenne température dans le Bassin aquitain sont :

- l'aquifère carbonaté du Crétacé inférieur, caractérisé essentiellement par des faciès carbonatés (calcaires, calcaires gréseux et dolomies) et plus rarement gréseux d'environnements marins et présent dans les deux bassins de Parentis et de l'Adour-Mirande. On distingue deux séries communes aux deux sous-bassins :
    - la série supérieure (Aptien supérieur-Albien), caractérisée par les réservoirs carbonatés dans le domaine de plate-forme et par des réservoirs gréseux hétérogènes au centre du sous-bassin de Parentis. Dans le sous-bassin d'Adour-Mirande, la série est caractérisée par des calcaires bioclastiques plus ou moins dolomitisés et souvent fracturés et karstifiés (principalement dans la partie occidentale du bassin) et par des calcaires bioclastiques et récifaux de domaine de plate-forme externe de part et d'autre du sillon marneux sous-pyrénéen (formation de Clèdes, calcaires de Lacq). Au sud-ouest, on trouve des faciès gréseux (côtiers) perméables et des passages de calcaires gréseux dans le domaine de plate-forme,
    - la série inférieure (Berriasien à Barrémien), caractérisée dans le secteur de Parentis par des formations carbonatées du domaine de plate-forme (exclusivement au sud et à l'est du domaine) et des dépôts détritiques (grès et calcaires gréseux) au niveau du domaine côtier de la bordure nord du bassin. Les aquifères sont souvent en continuité avec ceux du Jurassique supérieur. Dans le sous-bassin d'Adour-Mirande, la série est caractérisée par des calcaires bioclastiques du Barrémien (réservoir potentiel important au nord du sous-bassin). La série sous-jacente à celle du Barrémien (Néocomien) présente de nombreuses inter-strates d'épontes argilo-marneuses, peu intéressantes en termes de réservoir.

N.B : les travaux de synthèse des données de sismique et pétrolière du Bassin aquitain d'après (Serrano et al.*, 2006) donnent des informations détaillées sur les deux sous-bassins et les séries du Crétacé inférieur.*

- l'aquifère du Jurassique supérieur, composé d'une unité supérieure datant du Kimméridgien, est constitué de brèches et dolomies anhydritiques et de la Dolomie de Mano dans le bassin de l'Adour-Mirande et uniquement de la Dolomie de Mano dans le bassin de Parentis. La partie inférieure de l'aquifère date du Kimméridgien inférieur au Bajocien et se compose de calcaires argileux, calcaires, dolomies à oolithes plus ou moins graveleux et dolomies anhydritiques dans le bassin de l'Adour-Mirande, et uniquement de calcaires oolithiques dans le bassin de Parentis ;
- l'aquifère du Lias moyen (Jurassique inférieur), caractérisé par des calcaires dolomitiques et oolitiques dans les bassins de l'Adour-Mirande et de Parentis ;
- l'aquifère du Lias inférieur (Jurassique inférieur), caractérisé par la dolomie de Carcan dans le bassin de l'Adour-Mirande et par la dolomie de Carcan associée à des faciès gréseux dans le bassin de Parentis ;
- l'aquifère silico-clastique du Rhétien (Trias inférieur), caractérisé par des faciès essentiellement gréseux ;
- l'interface entre le socle antétriasique avec la couverture sédimentaire.

Les cartes numérisées sont présentées en Annexe 3 du rapport.

Caritg *et al.*, 2018 précisent certaines limites à l'analyse des travaux de synthèse d'après (Housse et Maget, 1976). Ainsi, les niveaux potentiellement perméables mais dont l'épaisseur ou la composition étaient mal définis lors des études n'ont pas été pris en compte. Les unités peu perméables au sein d'ensembles perméables ont en revanche été intégrées. Le niveau de fracturation généralement associée aux faciès carbonatés qui peut par secteur augmenter considérablement la perméabilité des formations n'a pas été renseigné dans les cartes. Au plus proche de la chaîne des Pyrénées, dans la partie sud du Bassin aquitain, les formations ont été largement affectées par les plissements, les failles et les remontées diapiriques engendrées par la formation de la chaîne. L'interprétation des épaisseurs et profondeurs dans ce secteur est donc moins précises. La température au toit des aquifères du Bassin aquitain a été évaluée en 1976 à partir du calcul du gradient géothermique du bassin. Pour ce faire, une corrélation entre les mesures de température sur forage de type tests hydrogéologiques et BHT a été établie puis réajustée à partir des données de la carte des températures à - 2 500 m d'après (Coustau, 1976). La validité de ces données est à considérer avec prudence sachant que la nécessaire correction des « effets de boue » sur les mesures de température BHT n'a pas été pratiquée.

2.2.3. Synthèse des données recensées

Les Tableau 4 et Tableau 5 synthétisent les différentes cibles de basse et moyenne température du Bassin aquitain dont les informations ont été recueillies et sont rassemblées dans un SIG. La diffusion des données cartographiques sur le site www.geothermies.fr est prévue pour 2021/2022.

Comme identifié dans l'étude réalisée par (Darnet *et al.*, 2020), les programmes de recherche MONA et GAIA ont permis la création de modèles géologiques et hydrogéologiques, à l'échelle du bassin, dont la précision et la prédiction évoluent d'année en année. La poursuite des efforts pour améliorer la compréhension des aquifères profonds s'inscrit donc dans le continuum de ces projets (mise à jour des modèles avec nouvelles données, raffiner le maillage, la structure, identifier les incertitudes). Pour les aquifères profonds, l'amélioration de la connaissance doit se baser sur l'analyse des données disponibles de forages profonds (hydrocarbures, géothermie, stockage de gaz), des carottes et sur l'acquisition ou retraitement de données sismiques.

Formation	Série	Données disponibles	Échelle	Profondeur du mur	Puissance
Éocène (supérieur à inférieur) partie nord	Éocène	Modélisations géologiques et hydrodynamiques des formations des formations de l'Éocène(Saltel *et al.*, 2016) : MOdèle Nord-Aquitain (à la maille de 500 m de côté).	Bassin aquitain partie nord	De -200 jusqu'à - 1 000 mNGF	Entre 20 et 50 m en Dordogne, jusqu'à 200 m dans le nord et l'ouest des Landes
Éocène (supérieur à inférieur) partie sud		Modèle géologique et étude du fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique des sables infra-molassiques (projet GAIA).		Jusqu'à -2400 mNGF au sud de la Haute Garonne.	Entre 40 et 100 m environ et jusqu'à 500 m dans le sud
Dano-Paléocène	Paléocène	Paramètres géologiques et hydrogéologiques issus des études de (Housse *et al.*, 1977) à partir des interprétations géologiques et géophysiques (logs fondamentaux, diagraphies différées des ouvrages pétroliers et géothermiques). La piézométrie de l'aquifère a fait l'objet d'un suivi en 1998 (Benhammouda *et al.*, 1998)	Bassin aquitain partie sud (Landes, Pyrénées-Atlantiques, Ariège)	Autour de -1500 à -2000 mNGF (Adour)	De moins de 40 m et jusqu'à 400 m (bassin d'avant pays pyrénéen)
Campanien	Crétacé supérieur	Modélisations géologiques et hydrodynamiques des formations du Crétacé supérieur (Saltel *et al.*, 2016) : MOdèle Nord-Aquitain (à la maille de 500 m de côté).	Bassin aquitain partie nord	Jusqu'à -1 200 mNGF	Entre 40 et 60 m, jusqu'à 120 m au nord de Bordeaux
Coniacien-Santonien				Jusqu'à -1 200 mNGF dans la partie nord. Jusqu'à -300 m dans les zones sud-aquitaine	Entre 30 et 40 m dans les nord-ouest de la Dordogne, au-delà de 100 m en Gironde, entre 20 et 120 m dans les Landes
Turonien				Jusqu'à -1 200 mNGF (secteur ouest Bordeaux). Jusqu'à 3000 m dans le bassin d'avant-pays pyrénéen	Entre 40 et 60 m, au-delà de 70-100 m en Dordogne, Médoc, nord Gironde
Cénomanien				Jusqu'à -2250 mNGF dans les Landes et sud-Gironde, autour de -1200 mNGF	Jusqu'à 250-450 m dans le sud Gironde, entre 20 et 40 m dans le nord-est. Au-delà de 140/200m sur Bordeaux
Aptien supérieur Albien (série supérieure) **Berriasien à Barrémien** (série inférieure)	Crétacé inférieur	Paramètres géologiques et hydrogéologiques issus des études de (Housse *et al.*, 1977) à partir des interprétations géologiques et géophysiques (logs fondamentaux, diagraphies différées des ouvrages pétroliers et géothermiques)	Bassin aquitain partie sud	De -1000 à -2000 mNGF (sous-bassin de Parentis). De -1500 à -4000 mNGF (sous-bassin Adour-Mirande).	De 250 à 800 m (sous-bassin de Parentis). De 500 à 1000 m (sous-bassin Adour-Mirande).

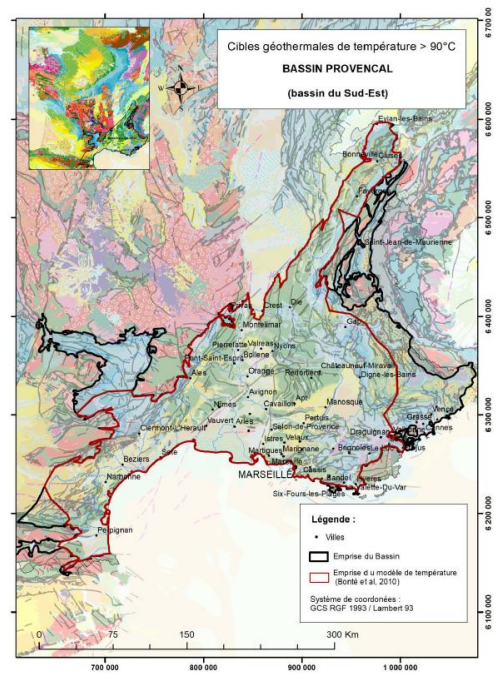
Tableau 4 : Synthèse des données recensées pour les principaux aquifères ciblés pour l'exploitation et l'exploration de la ressource géothermale de basse et moyenne température du Bassin aquitain (partie 1).

Formation	Série	Données disponibles	Échelle	Profondeur du mur	Puissance
Tithonien **Kimméridgien**	Jurassique supérieur	Modélisations géologiques et hydrodynamiques des formations du Crétacé supérieur (Saltel *et al.*, 2016) : MOdèle Nord-Aquitain (à la maille de 500 m de côté) pour la partie nord. Paramètres géologiques et hydrogéologiques issus des études de (Housse *et al.*, 1977) à partir des interprétations géologiques et géophysiques (logs fondamentaux, diagraphies différées des ouvrages pétroliers et géothermiques)	Bassin aquitain partie nord (MONA), et partie sud (Housse, 1977)	Jusqu'à -2500 mNGF (partie nord), au-delà de -5000 mNGF (extrême sud du bassin) De -70 mNGF (Périgueux) et au-delà de -3500 mNGF (bassin Arcachon)	30 à 50 m dans le nord, autour de 70 m (bassin de Parentis) et au-delà de 450 m dans secteur karstifié (sud faille de la Leyre) De 30 à 80 m, jusqu'à 140 m dans secteur karstifié ou dans le Lot
Bathonien-Callovo-Oxfordien **Bajocien**	Jurassique moyen	Modélisations géologiques et hydrodynamiques des formations du Jurassique moyen (Saltel *et al.*, 2016) : MOdèle Nord-Aquitain (à la maille de 500 m de côté).	Bassin aquitain partie nord	Au-delà de -1500 mNGF à l'ouest de Bergerac et sud Médoc De -300 mNGF (Périgueux, Cahors) à plus de -1000 mNGF à l'ouest (Bergerac, Villeneuve)	Entre 50 m (Médoc) et 200 m (Quercy) à 500 m (Marmande) De 60 à 90 m (Quercy), 40 m à l'est et l'ouest
Lias moyen et inférieur	Jurassique inférieur	Paramètres géologiques et hydrogéologiques issus des études de (Housse *et al.*, 1977) à partir des interprétations géologiques et géophysiques (logs fondamentaux, diagraphies différées des ouvrages pétroliers et géothermiques)	Bassin aquitain (sous-bassins de l'Adour-Mirande et de Parentis)	Au-delà de -4000 mNGF (bassin Adour-Mirande)	NC
Rhétien	Trias supérieur	Paramètres géologiques et hydrogéologiques issus des études de (Housse *et al.*, 1977) à partir des interprétations géologiques et géophysiques (logs fondamentaux, diagraphies différées des ouvrages pétroliers et géothermiques)	Bassin aquitain partie nord	Jusqu'à -3500 mNGF (secteur Arcachon)	NC
Socle antétriasique	Anté-triasique	Paramètres géologiques issus de l'étude sismo-tectonique en France (Grellet *et al.*, 1993). Carte de température issues du modèle 3D ISATIS de température des bassins sédimentaires (Bonté *et al.*, 2010)	Bassin aquitain	Au-delà de -8000 mNGF (extrême sud du bassin)	NC

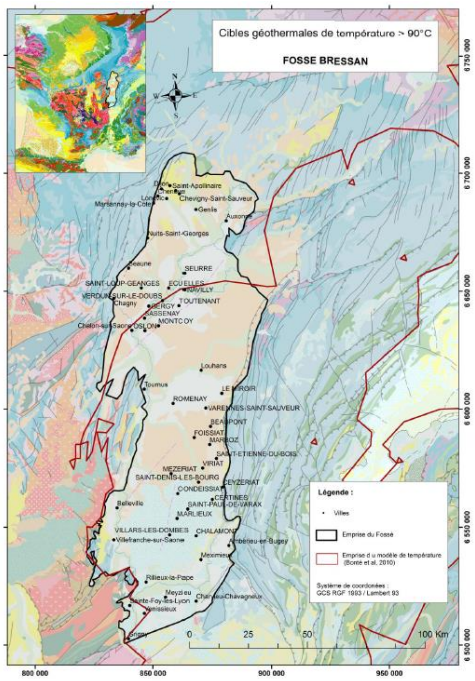
Tableau 5 : Synthèse des données recensées pour les principaux aquifères ciblés pour l'exploitation et l'exploration de la ressource géothermale de basse et moyenne température du Bassin aquitain (partie 2).

2.3. BASSIN DU SUD-EST, FOSSÉS RHODANIEN ET BRESSAN : DONNÉES RECUEILLIES POUR LES CIBLES GÉOTHERMALES

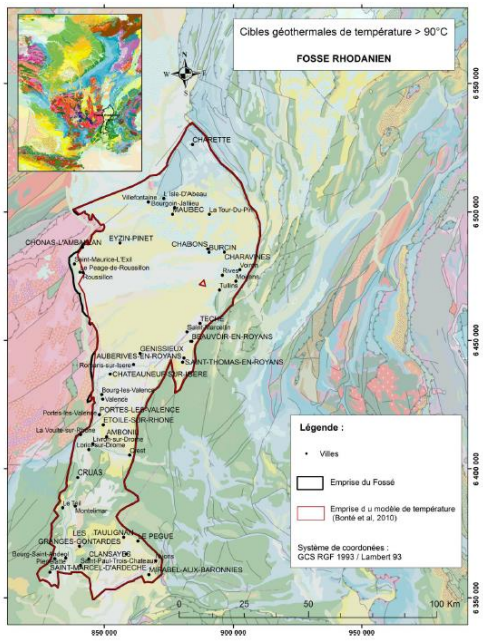
Seules les informations recueillies lors de l'étude Atlas Co-GTH des ressources de moyenne température d'après (Caritg *et al.*, 2018) ont été considérées dans ces secteurs puisqu'aucun autres modèles ou études d'extension régionale n'ont été recensés sur ce secteur. Les cartes présentées en 2018 illustraient les ressources au-delà de 90 °C. L'affichage prévu dans le site www.geothermies.fr illustrera également les zones où les ressources sont en-deçà de 90 °C. L'étude a distingué dans la partie sud-est de la France, trois principaux bassins propices au développement de la géothermie profonde : le Bassin provençal (ou Bassin du Sud-Est), le Fossé bressan et le Fossé rhodanien (Figure 7).



(a)



(b)



(c)

Figure 7 : Bassins sédimentaires ciblés pour le développement de la géothermie dans le quart sud-est de la France avec le Bassin du Sud-Est (a), le Fossé bressan (b) et le Fossé rhodanien (c), d'après Caritg et al., (2018)

Dans ce secteur, la géothermie profonde s'est assez peu développée jusqu'à présent, avec seulement 10 forages répertoriés. Deux opérations sont encore en activités, en 2019, au niveau de Montpellier (doublet de Mas Rouge) et de Pézenas (puits simple). Ces opérations ciblent les aquifères calcaires et dolomitiques du Jurassique supérieur et moyen. Deux opérations au niveau de Lodève ont été également répertoriées mais leur statut reste à ce jour inconnu (Grand champ et Saint-Fulcran qui cible les calcaires et dolomies du Jurassique supérieur) et une opération sur la commune de Montagnac est à l'arrêt (ciblant également les calcaires et dolomies du Jurassique inférieur). Des ouvrages d'exploration ont également été foré à Avignon et Valence cependant, ils ne sont actuellement pas exploités.

L'atlas des ressources profondes de moyenne température (Caritg *et al.*, 2018) a fait état des données géologiques issues des travaux de synthèse de bassin d'après (Debrand-Passard *et al.*, 1984) dans le Bassin du Sud-Est, combinées aux études de (Grellet *et al.*, 1993) et du modèle 3D ISATIS de température des bassins sédimentaires d'après (Bonté *et al.*, 2010) pour l'ensemble des fossés et bassins.

Ce sont ainsi huit formations et aquifères cibles pour l'exploration et l'exploitation de la ressource géothermale profonde qui ont été répertorié sur le Bassin du Sud-Est :

- la formation du Jurassique supérieur, constituée de faciès carbonatés ayant une perméabilité de fracture et datant du Tithonien ;
- les quatre formations du Lias (Jurassique inférieur) :
  - la formation du Domérien (Pliensbachien supérieur) caractérisée par des faciès argileux eu centre du bassin, par des calcaires bioclastiques aux passes gréseuses au nord-ouest et par des calcaires bioclastiques aux passes marneuses au nord-est et par des calcaires bioclastiques au sud-est et sud-ouest,
  - la formation du Carixien (Pliensbachien inférieur) caractérisée par des faciès calcaires argileux à l'ouest, au centre et au nord du bassin et par des calcaires bioclastiques à l'est du bassin,
  - la formation du Sinémurien, caractérisée majoritairement par des calcaires bioclastiques et de calcaires argileux sur l'ensemble du bassin,
  - la formation de l'Hettangien, caractérisée majoritairement par des faciès dolomitiques à l'ouest et au sud du bassin, par des calcaires bioclastiques et calcaires argileux au nord et à l'est du bassin ;
- la formation silico-clastique et carbonatée du Muschelkalk (Trias moyen), caractérisée par deux ensembles distincts. La partie supérieure est constituée de carbonates, de grès et argilites gréseuses, de carbonates à sulfates de calcium (anhydrite), ayant de potentielles perméabilités de fracture, dans la partie ouest du bassin et de faciès carbonatés et de carbonatés à sulfates de calcium à l'est. La partie inférieure est constituée majoritairement d'argilites sulfatées et de rares passages gréseux et argilites gréseuses à l'extrémité ouest du bassin ;
- la formation silico-clastique du Buntsandstein (Trias inférieur à moyen), composée de faciès gréseux ;
- l'interface socle antétriasique avec la couverture sédimentaire.

Le Tableau 6 synthétise les différentes cibles de moyenne température du Bassin du Sud-Est recueillies par (Caritg *et al.*, 2018). Les cartes peuvent être consultées dans le rapport BRGM RP-67853-FR[3].

[3] https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67853-FR.pdf

Formation	*Série*	*Données disponibles*
Tithonien	Jurassique supérieur	Paramètres géologiques (profondeur, épaisseur, faciès) issus de la synthèse de bassin réalisée par (Debrand-Passard *et al.*, 1984) et cartes de température issues du modèle 3D ISATIS de température des bassins sédimentaires (Bonté *et al.*, 2010) à l'échelle du Bassin du Sud-Est
Domérien (Pliensbachien supérieur) **Carixien** (Pliensbachien inférieur) **Sinémurien** **Hettangien**	Lias – Jurassique inférieur	
Muschelkalk	Trias moyen	
Buntsandstein	Trias inférieur à moyen	
Socle antétriasique	Antétriasique	Paramètres géologiques issus de l'étude sismo-tectonique en France (Grellet *et al.*, 1993) ou de la synthèse de bassin réalisée par (Debrand-Passard *et al.*, 1984) puis associés au modèle de température 3D ISATIS des bassins sédimentaires d'après (Bonté *et al.*, 2010) à l'échelle du Bassin du Sud-Est

Tableau 6 : Synthèse des données recensées pour les principaux aquifères et formations ciblées pour l'exploration de la ressource géothermale de basse et moyenne température du Bassin du Sud-Est.

Caritg *et al.*, 2018 précisent certaines limites à l'analyse des travaux de synthèse géologique d'après (Debrand-Passard *et al.*, 1984). Ces travaux ont en effet été réalisés à l'échelle du million, à partir de l'ensemble des données géologiques et géophysiques (*i.e.* ouvrages, études, forages, sismiques, …) disponibles au moment de l'étude. Les cartes mises à disposition ne comportent aucune notion d'aquifère et ne fournissent que très rarement l'épaisseur et la profondeur de ces formations. Lors de l'étude de synthèse en 2018 pour le projet Atlas Co-GTH, le choix a été fait de garder les termes « formation » et « aquifère » tels que présentés dans les travaux de 1984. Seules les cotes altimétriques du toit du socle antétriasique (en m NGF), les tracés des failles affectant ce socle et les iso-paques des formations du Trias, Jurassique et Crétacé étaient disponibles (i.e. les isohypses de ces formations n'étant pas fournies). La construction des cartes de cotes altimétriques du toit de ces formations par (Caritg, 2018) a donc été réalisée à partir de la cote du toit du socle antétriasique en ajoutant les épaisseurs de formations successives. Pour obtenir la température au toit des formations, les grilles de cotes altimétriques issues de l'étude sismo-tectonique de (Grellet *et al.*, 1993) et de la synthèse géologique de (Debrand-Passard *et al.*, 1984) ont été croisées avec celles du modèle de température 3D (Bonté *et al.*, 2010) à l'aide du logiciel GDM. Les cartes de température au toit des formations dépendent donc directement des cartes de profondeur pour lesquelles des approximations fortes ont dû être réalisées. Il est donc important de noter que la fiabilité est limitée, aussi bien pour les cartes de cote altimétrique des toits que pour les cartes de température des formations du Trias, Jurassique et Crétacé qui sont présentées dans l'atlas de 2018. Deux représentations des cartes de profondeurs et de températures ont été produites lors des travaux de (Caritg *et al.*, 2018). L'une de ces représentations correspond au traitement SIG réalisé à partir de la synthèse de (Debrand-Passard *et al.*, 1984) et du modèle de température issu de (Bonté *et al.*, 2010), l'autre représentation correspond au traitement SIG réalisé à partir de l'étude de (Grellet *et al.*, 1993) et du modèle de température issu de (Bonté *et al.*, 2010). Les résultats sont cohérents entre les deux traitements.

L'atlas des ressources profondes de moyenne température (Caritg *et al.*, 2018) a fait état des données géologiques issues d'une part du modèle GDM MultiLayer des domaines de la Bresse, du Dombes, du Bas-Dauphiné et du Fossé rhodanien d'après (Couëffé *et al.*, 2008) pour les formations du Jurassique supérieur et moyen sur le Fossé rhodanien, mais aussi des travaux de synthèse de bassin d'après (Debrand-Passard *et al.*, 1984) dans le Fossé rhodanien et bressan pour les formations du Jurassique, du Trias et du socle antétriasique, combinées aux études de (Grellet *et al.*, 1993) et au modèle 3D ISATIS de température des bassins sédimentaires d'après (Bonté *et al.*, 2010). Ce sont ainsi huit formations et aquifères cibles pour l'exploration et l'exploitation de la ressource géothermale profonde qui ont été répertorié sur ces secteurs géologiques :

- les formations du Jurassique moyen et moyen ;
- les quatre formations du Lias (Jurassique inférieur) :
  - la formation du Domérien (Pliensbachien supérieur) caractérisée par des faciès calcaires bioclastiques aux passes marneuses sur la majeure partie est du Fossé bressan et de calcaires bioclastiques sur le quart ouest et par des faciès calcaires bioclastiques aux passes marneuses de plus en plus importantes vers le sud du Fossé rhodanien,
  - la formation du Carixien (Pliensbachien inférieur) caractérisée par des facies calcaires fins et marnes au centre du Fossé bressan et des calcaires fins aux extrémités nord et sud du Fossé. La formation est caractérisée par des faciès calcaires fins au nord du Fossé rhodanien devenant marneux vers la moitié sud du Fossé rhodanien avec des faciès gréseux localisé au sud de Valence,
  - la formation du Sinémurien, caractérisée par des faciès calcaires bioclastiques répartis sur la moitié nord et l'extrême sud du Fossé bressan. La formation est caractérisée par calcaires bioclastiques sur la moitié nord du Fossé rhodanien et calcaires argileux sur la moitié sud,
  - la formation de l'Hettangien, caractérisée par des faciès de calcaires fins à passées argileuses dans le Fossé bressan. La formation est caractérisée par des faciès calcaires fins à l'extrémité nord du fossé rhodanien et de calcaires marneux et argileux au nord et au sud de Valence, de faciès dolomitiques à l'extrême sud-ouest du Fossé rhodanien ;
- la formation silico-clastique et carbonatée du Muschelkalk (Trias moyen) :
  - on distingue deux ensembles dans le Fossé bressan : (1) l'unité supérieure caractérisée par des faciès de types carbonates à sulfate de calcium (anhydritiques) sur une large bande orientée nord-sud au centre du fossé, de faciès carbonatés à l'est et de carbonates à grés et argilites gréseuses à l'ouest et (2) l'unité inférieur formée d'argilites gréseuses occupant la moitié ouest et d'argilites sulfatées occupant la moitié est du fossé et de quelques passes gréseuses la partie sud-ouest,
  - on distingue également deux ensembles dans le Fossé rhodanien : (1) l'unité supérieure est principalement caractérisée par des faciès carbonates à sulfate de calcium et de quelques faciès de carbonates à grés et argilites gréseuses au nord-ouest du fossé et (2) l'unité inférieur est caractérisée par des argilites sulfatées sur une large bande nord-sud, de grès au nord et à l'ouest et d'argilites gréseux à l'extrême nord.
- la formation silico-clastique du Buntsandstein (Trias inférieur) caractérisée par des faciès gréseux sur le Fossé bressan et sur le Fossé rhodanien (où elle se limitée à la partie centrale et nord du Fossé rhodanien) ;
- l'interface socle antétriasique avec la couverture sédimentaire.

Le Tableau 7 synthétise les différentes cibles de moyenne température du Bassin du Sud-Est recueillies par (Caritg *et al.*, 2018). Les cartes peuvent être consultées dans le rapport BRGM RP-67853-FR[4].

Les points de vigilance concernant les informations recueillies pour le Fossé bressan et rhodanien sont similaires à ceux évoqués pour le Bassin du Sud-Est. Pour les formations du Jurassique supérieur et moyen du Fossé bressan, seules les cartes de profondeur et d'épaisseur sont disponibles, le croisement avec les données issues des travaux de (Bonté *et al.*, 2010) n'a pas été réalisé. Deux représentations des cartes de profondeurs et de températures ont été produites lors des travaux de (Caritg *et al.*, 2018) dans chacun des fossés. L'une de ces représentations correspond au traitement SIG réalisé à partir de la synthèse de (Debrand-Passard *et al.*, 1984) et du modèle de température issu de (Bonté *et al.*, 2010), l'autre représentation correspond au traitement SIG réalisé à partir de l'étude de (Grellet *et al.*, 1993) et du modèle de température issu de (Bonté *et al.*, 2010). Les résultats sont relativement différents et il convient donc de considérer l'incertitude relative à chaque carte lors de la lecture de celle-ci.

Formation et lithologie	***Série***	***Données disponibles***	***Échelle***
Formation carbonatée	Jurassique supérieur et moyen	Paramètres géologiques issus du modèle GDM MultiLayer des domaines de la Bresse, du Dombes, du Bas-Dauphiné et du fossé rhodanien d'après (Couëffé *et al.*, 2008)	Fossé rhodanien
Domérien (Pliensbachien supérieur) **Carixien** (Pliensbachien inférieur) **Sinémurien** **Hettangien**	Lias – Jurassique inférieur	Paramètres géologiques (profondeur, épaisseur, faciès) issus de la synthèse de bassin réalisée par (Debrand-Passard *et al.*, 1984) et du modèle de température 3D ISATIS des bassins sédimentaires d'après (Bonté *et al.*, 2010)	Fossé bressan et Fossé rhodanien
Muschelkalk	Trias moyen		
Buntsandstein	Trias inférieur à moyen		
Socle antétriasique	Antétriasique	Paramètres géologiques issus de l'étude sismo-tectonique en France (Grellet *et al.*, 1993) ou de la synthèse de bassin réalisée par (Debrand-Passard *et al.*, 1984) puis associés au modèle de température 3D ISATIS des bassins sédimentaires d'après (Bonté *et al.*, 2010)	Fossé bressan et Fossé rhodanien

Tableau 7 : Synthèse des données recensées pour les principaux aquifères et formations ciblées pour l'exploration de la ressource géothermale de basse et moyenne température dans le Fossé rhodanien et le Fossé bressan.

[4] https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67853-FR.pdf

2.4. FOSSÉ RHÉNAN : DONNÉES RECUEILLIES POUR LES CIBLES GÉOTHERMALES

Le Fossé rhénan supérieur est un fossé tectonique complexe, qui possède une histoire longue et mouvementée. Il s'est formé, il y a 45 millions d'années. Des fractures et des zones de failles sont apparues. L'intérieur du fossé s'est affaissé de 4,5 kilomètres de profondeur et s'est rempli de sédiments.

En 2020, deux opérations exploitent la ressource géothermale profonde dans le Fossé : l'opération de Rittershoffen, qui exploite un réservoir hydrothermal entre 163 et 177 °C située jusqu'à 2 700 m de profondeur, à l'interface entre le socle et la couverture Mésozoïque, pour la production de chaleur industrielle, et l'opération de Soultz-Sous-Forêts, qui exploite les fluides contenues dans un système hydrothermal fracturé granitique à 5 km de profondeur, pour la production d'électricité exclusivement.

Les travaux de (Munck *et al.*, 1979) présentent une synthèse des cibles de géothermie établie à partir des logs fondamentaux de nombreux forages, des résultats de campagnes géophysiques et des cartes et publications géologiques. L'étude a permis de cartographier la profondeur, la puissance des aquifères du Rauracien-Séquanien, de la Grande Oolithe, du Muschelkalk supérieur et du Buntsandstein, ainsi que la base du Tertiaire.

Le projet Interreg GeORG (Beccaletto *et al.*, 2013) a permis d'évaluer le potentiel géologique, au niveau du Fossé rhénan supérieur. Il s'agit d'un projet collaboratif entre l'Allemagne, la Suisse et la France qui a abouti à la création d'un modèle géologique 3D, avec le logiciel GoCAD, depuis les formations du Tertiaire jusqu'au toit du socle granitique. Le projet a permis également de créer une base de données numériques de la structure du sous-sol, de la distribution des températures, afin d'évaluer le potentiel géothermique profond du Fossé rhénan (cf. illustration en Figure 8). Les données produites sont consultables sur le site www.geopotenziale.eu. Les profondeurs et épaisseurs des formations ont été estimées à partir de l'interprétation géologique et géophysique des données de forages et profils sismiques. Les données de température sont issues des données de forages. L'incertitude associée aux données (en fonction du type de mesures) a été estimée dans le cadre du projet et les incertitudes liées à la propagation spatiale des propriétés et géométries ont également été estimées via à l'analyse de l'écart type entre les données modélisées et les mesures effectives.

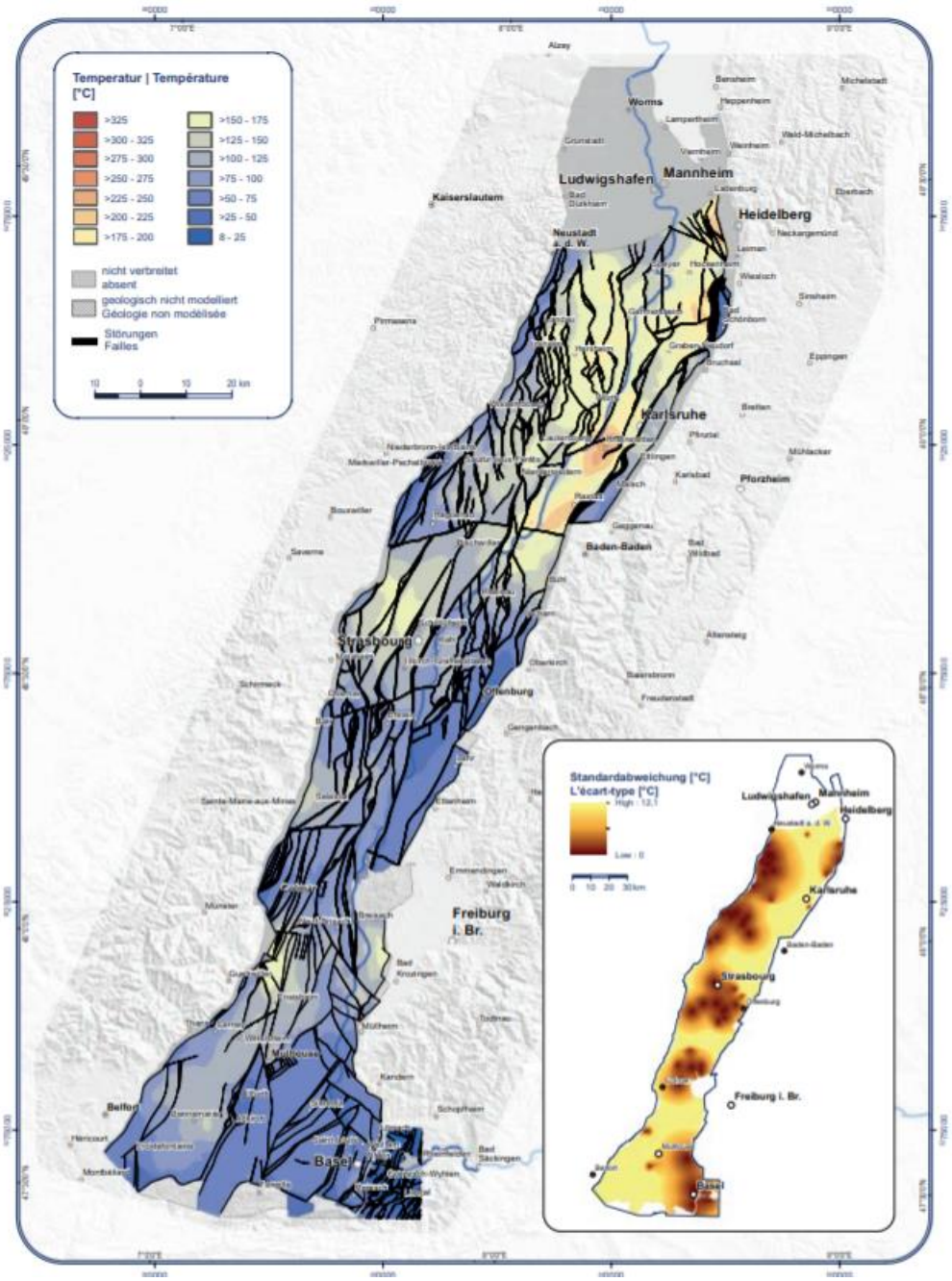


Figure 8 : Illustration des données disponibles sur le site www.geopotenziale.eu avec la carte des températures au toit du Muschelkalk supérieur et écart-types d'après (Equipe de projet GeORG, 2013).

Un démonstrateur du référentiel géologique de France (RGF) a été réalisé sur le massif des Vosges et le Fossé rhénan (Gabalda *et al.*, 2013). L'objectif du démonstrateur est de représenter la géologie de façon cohérente et homogène et de proposer une représentation en 3D des formations du sous-sol du Tertiaire jusqu'au socle granitique. L'extension du modèle, sa représentation en 3D et la pile stratigraphique représentée dans le modèle sont présentées en Figure 9. Ces informations ont été recensées dans le SIG du projet et seront mises à disposition sur l'espace cartographique du site www.geothermie.fr en 2021/2022.

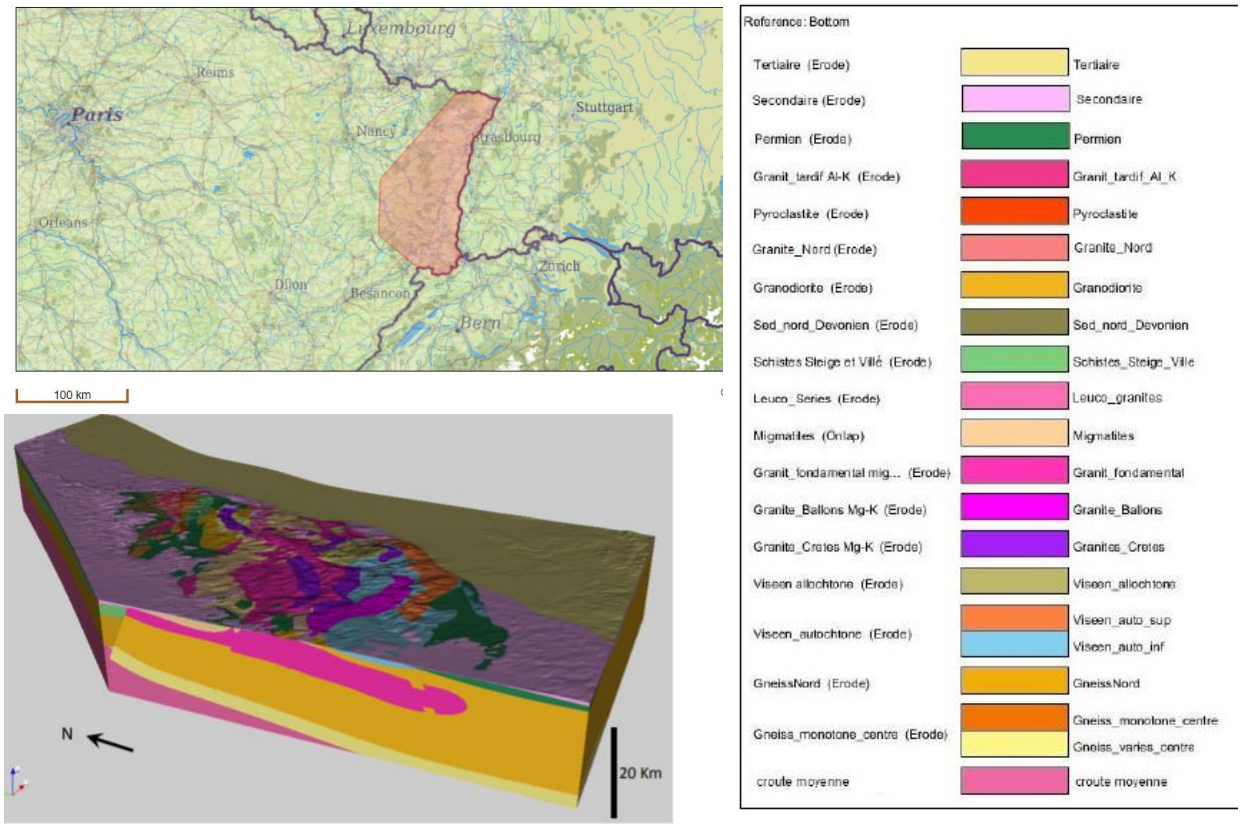


Figure 9 : Extension et représentation du modèle géologique 3D régional RGF Vosges - Fossé rhénan et pile géologique, d'après (Gabalda et al., 2013).

3. Revue des méthodologies de classification des ressources géothermales et expériences en France et en Europe

3.1. DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE THEORIQUE AU POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT

L'estimation des ressources est largement utilisée dans l'industrie minière et pétrolière pour pouvoir estimer d'une part la quantité de minerais et d'hydrocarbures connue et prouvée (par un forage par exemple) mais aussi afin d'estimer la quantité potentiellement extractible. Ces valeurs intéressent fortement les investisseurs et propriétaires de gisement et peuvent grandement impacter les filières industrielles nécessitant des matières premières en grande quantité.

Les termes généralement utilisés - ressources, réserve, potentiel, etc.- peuvent avoir des définitions différentes d'une industrie à l'autre ou suivant les conventions définies dans différents projets, pays ou contextes. De nombreuses classifications ont ainsi été éditées au cours des années (exemple de PRMS en 2007 pour les pétroliers, JORC en 1989 pour les miniers) et on conduit les Nations Unies à proposer une classification standardisée en 2009 (United Nations, 2009) pour les ressources minérales et pétrolières qui a ensuite été déclinée pour les ressources géothermales en 2016 (Falcone, 2016).

Avant l'édition de ces standards, de nombreuses classifications ont été proposées dans la profession en se basant sur différents critères : température, usage, potentiel, chaleur stockée dans le sol, etc. (Falcone, 2016) propose une revue non exhaustive des approches proposées jusqu'ici en géothermie. Dans le cas des ressources géothermales en aquifères profonds, la profession s'est majoritairement appuyée sur les travaux de (Muffler *et al.*, 1977) dans lesquels ils présentent l'estimation du potentiel géothermique suivant une subdivision séquentielle (Figure 10) ainsi que sur les travaux de (Rybach, 2010).

À la base de la subdivision proposé par (Muffler *et al.*, 1977) on retrouve l'ensemble de la chaleur présente dans la croûte terrestre dans une zone donnée qui peut alors être suffisamment superficielle (par rapport à l'ensemble de la croûte) pour être une ressource accessible par forage de production. Cette ressource accessible peut ensuite être utile *i.e.* pouvant être extraite à un coût raisonnable, en comparaison d'autres énergies à un instant donné. (Muffler *et al.*, 1977) la dénomme **ressource géothermale**. Cette ressource est ensuite classifiée et peut être subdivisée entre une partie commerciale et une partie sub-commerciale suivant les contraintes existantes à l'instant où se fait l'estimation et pour une zone donnée. Ces contraintes correspondent généralement à la maturité des technologies disponibles, à la réglementation en vigueur et aux contraintes économiques d'un projet.

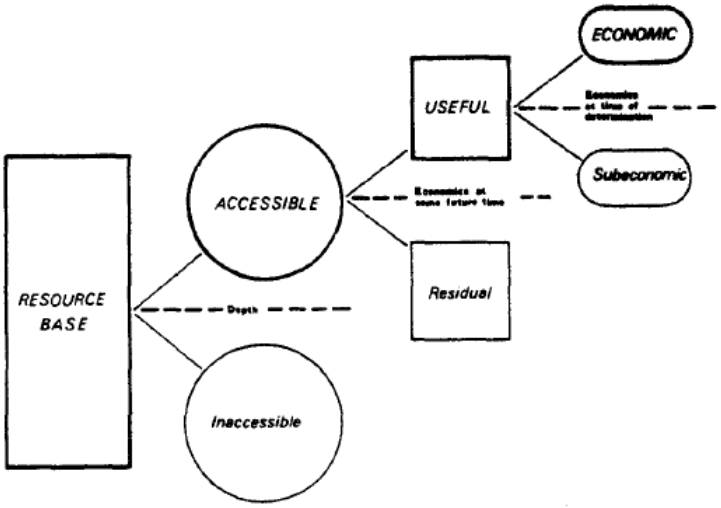


Figure 10 : Logigramme subdivisant les ressources géothermales d'après (Muffler et al., 1977).

On retrouve également ce type de logigrammes pour la classification des ressources fossiles et minérales dans les travaux de (McKelvey, 1972) avec une classification suivant deux axes : l'état de découverte de la ressource (axe horizontal) et l'accessibilité (axe vertical) comme illustré en Figure 11. Cependant cette classification se fait sans considération des éléments économiques ou des technologies disponibles et donne donc une image seulement partielle du potentiel d'une ressource donnée.

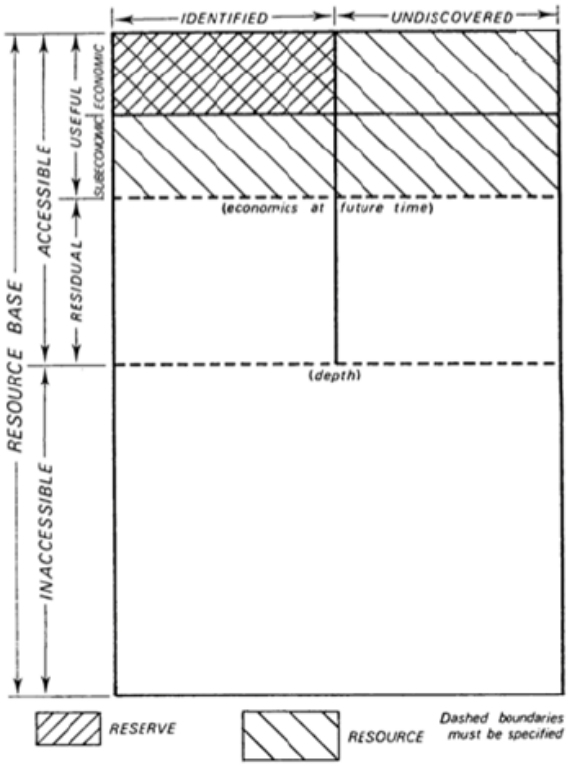


Figure 11 : Diagramme de McKelvey pour la classification de l'énergie géothermal(Muffler et al., 1978).

(Rybach, 2010) propose une définition du terme « potentiel » utilisé communément dans l'industrie géothermale et propose de distinguer le **potentiel théorique, technique, économique, durable et de développement**.

La quantité estimée à chacune de ces étapes va se raffiner au fur et à mesure de cette évolution graduelle depuis le potentiel théorique, qui est une estimation généralement faite à grande échelle et à partir de peu d'information en début d'exploration, jusqu'au potentiel de développement qui est estimé de façon plus locale, à l'échelle du site, de la concession. De même, la faisabilité économique et la faisabilité technique sont de plus en plus fortes au fur et à mesure de cette l'évolution graduelle du potentiel théorique jusqu'au potentiel de développement (cf. Figure 12).

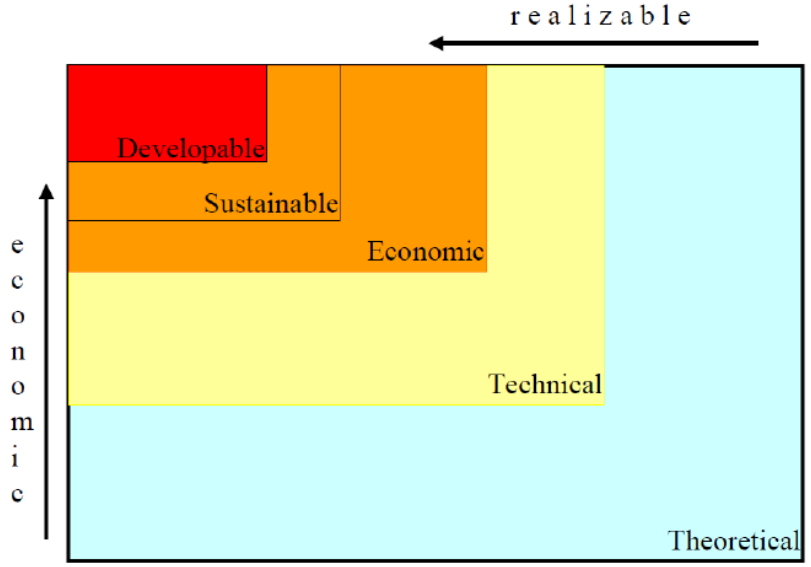


Figure 12 : Diagramme de définition du potentiel pour les sources d'énergie renouvelable dont la géothermie d'après (Rybach, 2010).

D'après (Rybach, 2010), le **potentiel théorique** correspond à une quantité d'énergie thermique présente dans un réservoir (constitué de roche et d'eau) pour un secteur et un horizon temporel donné. Ce potentiel est seulement défini par les limites physiques d'un réservoir, il ne prend pas en considération les limitations techniques, économiques ou administratives qui font que seule une partie de la chaleur présente dans le sous-sol sera par la suite utilisée, ni les propriétés hydrauliques du réservoir (perméabilité). L'estimation du potentiel théorique géothermal passe par l'évaluation de la **chaleur en place dans le sous-sol** (*Heat in Place* en anglais, HIP). Cette grandeur s'exprime en Joules et a été étudié notamment par (Nathenson, 1975, White et William, 1975 et Muffler et Cataldi, 1978). Elle est évaluée de la façon suivante :

(1) **Chaleur en place** (J) : $HIP\ [J] = \gamma_t.(T_t - T_{inj}).V =$

$$HIP = (\rho_w.c_w.\emptyset + \rho_r.c_r.(1-\emptyset)).(T_t - T_0).A.\Delta z$$

γ_t correspond à la capacité thermique volumétrique du réservoir (kJ/m3.°C) est fonction de la porosité effective $\emptyset$, de la densité $\rho_{r/w}$ (kg/m^3) et de la capacité thermique $c_{r/w}$ (J/kg/°C) des roches et du fluide respectivement, $T_{t/inj}$ à la température au toit de l'aquifère et la température de réinjection respectivement (°C) et V le volume de l'aquifère (m^3 aussi exprimé par le produit du la surface de l'aquifère A en m² et de son épaisseur Δz en m). Lorsqu'aucune technologie n'est encore disponible pour produire la chaleur présente dans le sous-sol, la chaleur en place est la seule estimation qui peut être avancée. La cartographie de chaleur en place, exprimée en J/km², représente la somme verticale des volumes aquifères répartis sur la surface des mailles d'une grille donnée en km².

Le **potentiel technique** représente une fraction du potentiel théorique qui peut être utilisée suivant les restrictions techniques courantes et les technologies disponibles. Ce potentiel intègre également les restrictions réglementaires, environnementales et besoins exprimés qu'il convient de prendre en considération dans un temps et un lieu donné bien que les restrictions techniques représentent le principal verrou d'après (Rybach, 2010). Dans le cas d'une exploitation géothermale dans un système hydrothermal convectif, la profession estime généralement une faction du potentiel théorique reprenant donc la méthode des volumes (Limberger *et al.*, 2018; Muffler *et al.*, 1978) appelée la chaleur récupérable. Il s'agit ainsi du produit entre la chaleur en place (HIP) et d'un facteur de récupération (R). Ce facteur peut varier entre 0 et 100 % et dépend des hypothèses relatives aux mécanismes de production, aux propriétés des formations considérées, du différentiel de températures entre le réservoir et la température de réinjection.

Dans un système hydrothermal convectif, le facteur de récupération est estimé par (Muffler *et al.*, 1978) autour de 25 % mais semble être considérablement plus faible dans la majorité des formations géologiques, voire proche de 0 % dans le cas de formation imperméables. Ce paramètre est généralement inconnu et il peut donc être difficile de conclure sur la représentativité de ce type d'estimation. D'après (Beardsmore *et al.*, 2010), dans le cas des EGS, le facteur de récupération R correspond au produit entre un facteur de récupération lié à la surface disponible, un facteur technique final limité pour le réservoir basé sur la récupération de chaleur à partir du système de fracture et un facteur limitant résultant de l'abaissement des températures. Dans le projet GEOELEC (2011 à 2013) relatif à l'estimation des ressources géothermales en Europe pour la production d'électricité, (van Wees *et al.*, 2013) fait état de plusieurs niveaux de potentiel technique avec (1) un potentiel théorique pour lequel le facteur de récupération est de 1 et qui correspond à la quantité maximale théorique du potentiel technique, (2) un potentiel technique réaliste, qui prend en considération une approche empirique et dont le facteur de récupération final est estimé par (Beardsmore *et al.*, 2010; Williams *et al.*, 2008) en deçà de 0,2-0,3 ou autour de 0,33 pour les formations ciblées par la géothermie profonde dans les aquifères Néerlandais, voire (3) un potentiel conservateur avec un facteur de récupération de 0,001 dans les formations où la connaissance est limitée.

La chaleur en place récupérable est estimée en introduisant dans la relation précédente (1) le facteur de récupération R. Comme le facteur R n'est pas estimé à partir des propriétés intrinsèques du réservoir et ne considère pas directement les débits réellement extractibles, le calcul de la chaleur récupérable constitue une étape intermédiaire entre la quantification du potentiel théorique et technique.

(2) **Chaleur récupérable potentielle** (J) :

$$R.HIP\ [J] = \gamma_t.(T_t - T_{inj}).V.R$$

Le **potentiel économique** représente une fraction du potentiel technique identifiée comme économiquement rentable étant donnée les hypothèses prises à un instant donné et pour une localisation précise. Dans ce cas, les contraintes du système géothermal dans son ensemble sont prises en compte tels que les coûts d'investissement (CAPEX), de maintenance (OPEX) et d'abandon des ouvrages. Ces éléments permettent ainsi d'attester de la compétitivité des systèmes vis-à-vis d'autres énergies renouvelables ou fossiles. L'évaluation de ce potentiel dépend entièrement des paramètres considérés pour le modèle économique du système et des hypothèses concernant par exemple l'évolution des prix de l'électricité ou de matières premières, des tarifs de rachats et des taxes. Le projet GEOELEC avait permis l'élaboration d'un outil de calcul économique (CAPEX, OPEX, etc.) pour les projets de géothermie électrogène[5].

[5] http://www.geoelec.eu/software/

Le **potentiel durable** représente une fraction du potentiel économique qui permet une exploitation pérenne de la ressource. Une exploitation durable peut être atteinte par différent moyen tels que l'espacement optimal des ouvrages suivant les caractéristiques du réservoir, une optimisation des débits d'exploitation ou encore grâce aux choix des matériaux et du design des ouvrages afin d'accroitre la longévité des exploitations. Ces mesures peuvent en revanche avoir un coût et donc modifier le temps de retour sur investissement d'un projet.

Le **potentiel de développement** représente une fraction du potentiel économique qui considère les contraintes réglementaires, environnementales, sociales, logistiques ou encore les systèmes de garanties permettant d'accompagner les développeurs de projets.

Pour un doublet géothermique, la puissance thermique produite peut être estimée par le produit de la différence entre température de production et d'injection en K, le débit d'exploitation Q en m^3/h, Cp la chaleur spécifique massique (4184 J/kg/K) et $\boldsymbol{\rho}$ la masse volumique du fluide en kg/m^3 tel que :

$$(3) \qquad \boldsymbol{E}\,[\boldsymbol{MWth}] = \Delta \boldsymbol{T}.\boldsymbol{Q}.\boldsymbol{\rho}.\boldsymbol{C_p}/3{,}6.10^9$$

Le débit d'exploitation dépend bien évidement des propriétés de l'aquifères ainsi que des paramètres du doublet. En effet les débits augmentent avec la perméabilité et l'épaisseur des formations et la différence de pression imposée par la pompe. Le débit peut être calculé par la formule suivante :

$$(4) \qquad \boldsymbol{Q} = \Delta \boldsymbol{p}\,\frac{2\pi\, kH}{\mu\left(ln\left(\frac{L}{r_w}\right)-S\right)}$$

Où k représente la perméabilité en D, H l'épaisseur de la formation en mètre, L la distance entre puits, rw le diamètre des ouvrages en mètre, Δp la différence de pression entre le puits injecteur et producteur en Pa, S le skin factor et µ la viscosité du fluide géothermal en Pa.s.

3.2. CLASSIFICATION CADRE DES NATIONS DES RESSOURCES UNFC-2009 DES RESSOURCES GÉOTHERMALES

À partir de 2016, des définitions standardisées ont été produites par les Nations Unies à partir des travaux de classification UNFC-2009 : la classification des Nations Unies pour les énergies fossiles et réserves minérales et son application aux ressources géothermales *(UNFC-2009 Specification, 2016, CCNU en français)*.

La classification est fondée sur des principes génériques, elle dérive des classifications éditées en 2009 pour les énergies fossiles et réserves minérales et a ensuite été déclinée pour la classification des ressources géothermales (Falcone, 2016) comme illustré en Figure 13. Elle permet d'aller un peu plus dans le détail en comparaison de la classification proposée par (Rybach, 2010) bien que cette classification unidimensionnelle couvre en grande partie les éléments présentées la classification tridimensionnelle UNFC-2009.

La ressource géothermale est ainsi classée suivant trois critères que sont la viabilité économique et sociale (E), l'état d'avancement et la faisabilité des projets sur le terrain (F) et les connaissances géologiques (G). La combinaison de ces critères permet de produire un système de classification tridimensionnel présenté ci-dessous.

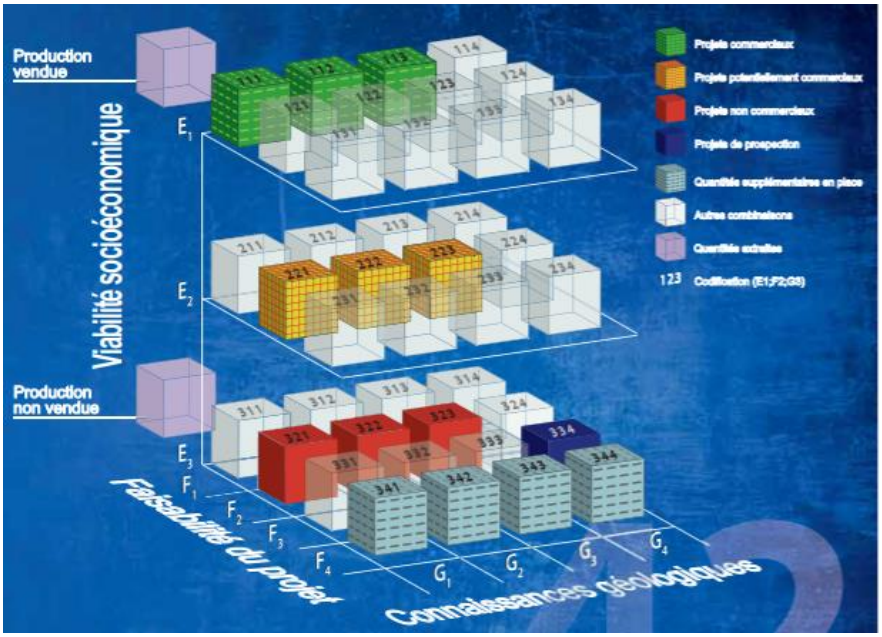


Figure 13 : Classification cadre des Nations Unies pour l'énergie fossile et les réserves et ressources minérales UNFC-2009 et les spécifications pour son application aux ressources géothermales (source : publication des Nations Unies 2013).

On retrouve dans les définitions trois éléments principaux : la source d'énergie géothermale, les ressources d'énergie géothermique et enfin le produit d'énergie géothermique. La source correspond alors aux accumulations et dépôts dans la croute terrestre, les ressources d'énergie correspondent à la quantité cumulée d'énergie qui peut être extraite des accumulations et enfin, le produit énergétique représente la partie pouvant être vendu dans un marché établi, qu'il s'agisse de chaleur ou d'électricité.

Cette classification est également conforme avec les systèmes utilisés à grande échelle dans les milieux pétrolier et minier (CRIRSCO, SPE, PRMS, AAPG, WPC). Son application dans le domaine de la géothermie reste encore limitée à ce jour.

3.3. RETOUR D'EXPÉRIENCE DES OUTILS DÉVELOPPÉS POUR L'ESTIMATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE

L'outil principal en France pour la dissémination d'information relative à l'énergie géothermal correspond au site www.geothermies.fr, développé depuis 2005 par le BRGM en partenariat avec l'ADEME. Les informations diffusées sur l'espace cartographie ont été principalement centrées sur les opérations, ressources et potentiel géothermique liés à la géothermie de très basse énergie pour les échangeurs en boucle ouverte ou fermée. Depuis 2018 et la diffusion des informations relatives aux opérations et ouvrages de géothermie profonde (Hamm, 2019) issue de la base de données SYBASE, l'ambition du BRGM et de l'ADEME est de développer d'avantage la diffusion d'information liée à la géothermie de basse et moyenne température (profonde). Les informations recueillies pour le Bassin parisien (cf. section 2.1.1) relatives aux ressources de basse température sont les premières couches diffusées dans le cadre du projet Atlas GTH BT. Les informations relatives aux autres formations et autres bassins géologiques seront diffusées courant 2021/2022 (i.e. données relatives aux formations de moyenne température sur l'ensemble du territoire et de basse température en dehors du Bassin parisien). Le détail des formations mises à disposition sur l'espace cartographique du site au premier semestre 2021 et des évolutions prévues est donné en section 4.

Actuellement en Europe, quelques systèmes d'information dédiés aux systèmes géothermaux profonds ont pu être répertorié (liste non exhaustive). On retrouve notamment le site ThermoGIS (www.thermogis.nl/en) développé par TNO (Vrijlandt *et al.*, 2019), le site GEOTIS (www.geotis.de), développé par par le *Leibniz Institute for Applied Geophysics* (LIAG) (Pester *et al.*, 2010), le site https://map.geo.admin.ch en Suisse.

3.3.1. Outil ThermoGis (TNO)

ThermoGis est un outil d'aide à la décision à l'échelle du territoire Néerlandais mis en place pour la publication des informations du sous-sol disponibles (du Paléogène jusqu'au Carbonifère à plus de 5 000 m de profondeur) et fournit une évaluation des ressources géothermiques à l'échelle régionale pour le public et les parties prenantes. L'outil dispose d'une interface utilisateur (www.thermogis.nl/en) permettant d'identifier les formations géologiques, leurs profondeurs, épaisseurs, propriétés pétrophysiques et leurs incertitudes mais aussi les informations réglementaires (permis), la position des forages, la position des lignes sismiques 2D et des blocs 3D. La version initiale a été mise en place en 2012. L'outil permet actuellement d'identifier les performances technico-économiques pouvant être utiles lors d'étude de faisabilité et d'identification des sites de prospection. ThermoGis fonctionne d'après le workflow présenté en Figure 14.

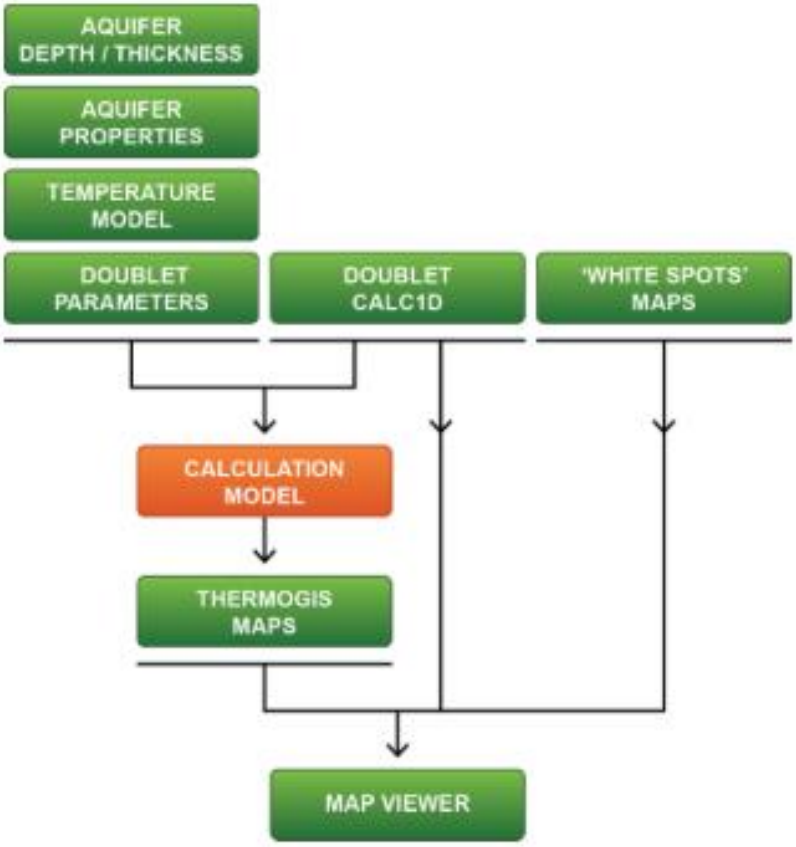


Figure 14 : Workflow implémenté dans l'outil en ligne ThermoGIS d'après (Vrijlandt et al.*, 2019).*

En premier lieu, un modèle géologique 2,5D donnant des informations sur la profondeur des formations, leur épaisseur, porosité, perméabilité et net-to-gross et un modèle thermique permettant d'identifier les températures dans le sous-sol sont utilisés comme données d'entrée pour le modèle technico-économique. La propriété des réservoirs qui présente le plus d'incertitude est la transmissivité. Les cartes de la propriété sont donc déclinées en valeurs P10, P50 et P90 afin de retranscrire l'incertitude associée.

Sur le territoire Néerlandais, l'estimation des potentiels géothermiques des aquifères a été réalisée pour 29 horizons. Les épaisseurs et profondeurs des formations sont calculées à partir d'interprétations sismiques calibrées par 800 ouvrages pour une partie des données et sur les informations issues de 3 855 puits. Les cartes de profondeur et d'épaisseur disposent d'estimation des incertitudes liées à l'interpolation surfacique des données. Un ratio de NTG est ensuite utilisé pour chaque formation et multiplié par les cartes d'épaisseur pour estimer l'épaisseur nette (utile) des aquifères. Les cartes de porosité et perméabilité ont été définies par méthode géostatistique à partir des données pétrophysiques de forage, de log calibré, de données de carotte mais aussi d'essais de forage pour les valeurs de perméabilité. Les incertitudes associées aux cartes de perméabilité définies sont calculées à partir de l'écart type de krigeage des cartes de porosité et de la quantification des incertitudes relatives à la relation entre porosité et perméabilité. Le modèle thermique a été réalisé à partir de plus de 1 300 mesures de températures (Békési *et al.*, 2020) comprenant notamment des mesures de fond de forage (BHT), de tests de formation.

La faisabilité technique de la production géothermale est estimée grâce à un logiciel de modélisation des écoulements d'un doublet - DoubleCalc1D, développé par TNO - pour chaque aquifère et à la maille de 1 km de côté. Cette étape permet d'estimer, à partir des paramètres de doublets spécifiés, des données issues du modèle géométrique et du modèle thermique, la puissance produite par un doublet (cf. équations (3) et (4)).

À partir de ces informations, des hypothèses relatives aux conditions de surface et suivant les paramètres économiques formulés dans le modèle économique, l'outil va ensuite calculer un coût unitaire technique (i.e. la valeur actuelle nette de l'ensemble des coûts dont les intérêts, l'inflation, les taxes, etc.). (Vrijlandt *et al.*, 2019) considère une vie économique d'une durée de 15 ans. Étant donnée l'incertitude liée à la perméabilité, les cartes résultantes de l'étude économique sont calculées pour les valeurs P10, P50 et P90 des valeurs de transmissivités.

Les potentiels techniques et économiques ont été estimés pour deux scénarios additionnels, en plus du cas de base d'exploitation par doublet géothermique : le cas où les ouvrages recourent à de la stimulation (afin d'améliorer la productivité) et le cas où la récupération de la chaleur se fait par pompe à chaleur (afin d'extraire plus d'énergie à partir des eaux produites en augmentant la température de production ou bien en abaissant la température de réinjection). Dans le premier cas de figure, le skin est alors abaissé et le coût de l'opération de stimulation est pris en considération dans le calcul technico-économique. Dans le second cas de figure, la température de réinjection est réduite de 10 °C et les coûts opérationnels sont pris en considération dans le calcul technico-économique. Pour les deux cas de figure, la puissance extractible sera plus importante et ainsi le potentiel technique sera plus important.

Le résultat du workflow permet ainsi de présenter pour chaque aquifère :

- la géométrie des formations : épaisseur et incertitudes associées, profondeur ;
- les propriétés des formations et du fluide géothermal : perméabilité et incertitudes associées, net-to-gross, transmissivité (calculée par le produit de l'épaisseur et de la perméabilité) et incertitudes associées, température (e.g. Figure 15) ;
- les paramètres opérationnels : débit de production et d'injection et incertitudes associées pour les trois scénarios (cas de base, stimulation et pompe à chaleur), puissance géothermale d'un doublet et incertitudes associées pour les trois scénarios ;
- les cartes de chaleurs en place (GJ/m²), de chaleur potentiellement récupérable (GJ/m²), de potentiel technique (e.g. illustré en Figure 16) et le potentiel économique pour les trois scénarios et la carte des zones blanche (indiquant la disponibilité des données du sous-sol).

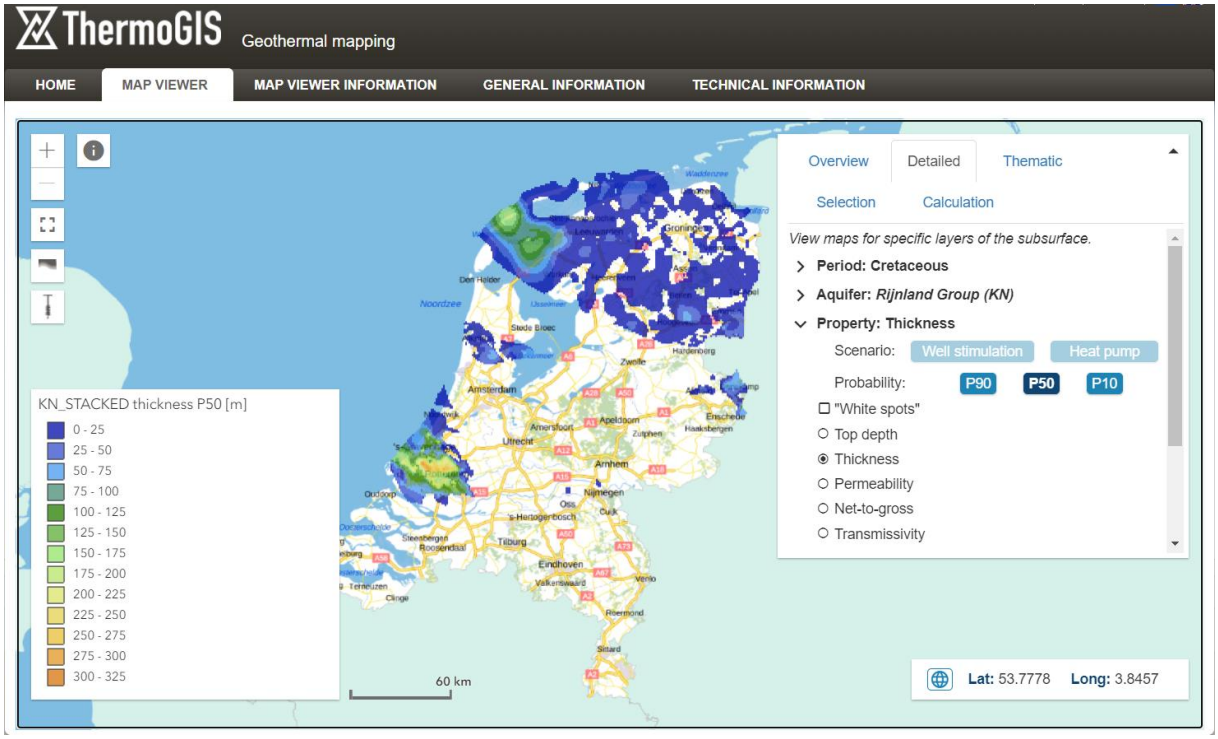


Figure 15 : Outil en ligne ThermoGIS, illustration des cartes obtenues par aquifères (https://www.thermogis.nl/en/map-viewer).

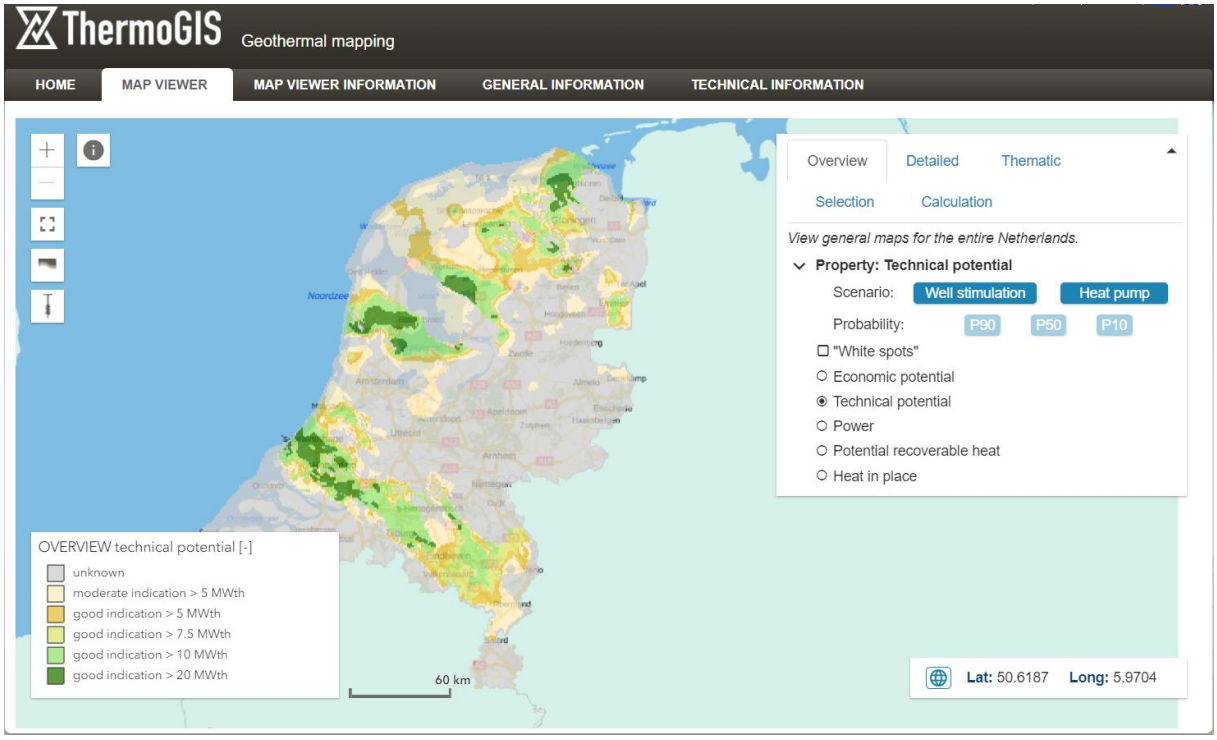


Figure 16 : Outil en ligne ThermoGIS, illustration des cartes de potentiel technique (https://www.thermogis.nl/en/map-viewer).

3.3.2. Outil GeotIS (LIAG)

En Allemagne, l'outil GeotIS (www.geotis.de) développé par le *Leibniz Institute for Applied Geophysics* (LIAG) (Pester *et al.*, 2010) est principalement un atlas géothermique pour la production d'électricité. Il affiche des cartes thématiques et des informations socio-économiques. Bien qu'elles couvrent l'ensemble du territoire allemand, les informations sont principalement fournies dans le Fossé rhénan, le Bassin molasse, et le Bassin de l'Allemagne du Nord. Des modèles géologiques 3D sont disponibles sur certains secteurs. Le système d'information a pour objectif de compiler les propriétés hydrodynamiques, la géométrie et l'extension des failles profondes.

3.3.3. Outil cartographique Suisse

La Suisse dispose également d'un système d'information pour la diffusion des informations relatives à l'énergie géothermique sur le site https://map.geo.admin.ch/. On distingue notamment une couche reportant les zones d'études régionales du potentiel géothermique par canton et les informations relatives à ces études, la position des ouvrages géothermiques profonds (au-delà de 500 m), des informations géologiques et de température du sous-sol.

3.3.4. Logiciel d'estimation de chaleur en place 3D HIP (ICGC et UAB)

L'institut cartographique et géologique de Catalogne (ICGC) en partenariat avec l'université autonome de Barcelone a développé en 2019 un logiciel, écrit en code Matlab, pour l'évaluation du potentiel géothermique profond via le calcul de la chaleur en place (HIP d'après la méthode volumétrique USGS (Muffler *et al.*, 1978)) et de l'énergie thermique récupérable à partir de modèles géologique et thermique 3D *via* une approche probabiliste ou stochastique (Herms *et al.*, 2021). Le logiciel 3DHIP est téléchargeable sur la plateforme de l'ICGC[6].

Le fonctionnement du script Matlab implémenté dans le logiciel est décrit en Figure 17. L'utilisateur va ainsi utiliser un modèle géologique 3D ainsi qu'un modèle thermique 3D permettant d'identifier la géométrie, la densité et la lithologie des formations, la distribution de température dans une formation donnée ainsi que les incertitudes associées. Ensuite, le code va utiliser ces informations provenant des modèles géologiques et thermique pour estimer la chaleur en place (« Heat in place » ou HIP) d'après la méthode proposée par (Muffler *et al.*, 1978).

L'étape de calcul de la chaleur en place consiste premièrement à introduire les paramètres permettant le calcul pour la ou les formations choisies (i.e. porosité, densité du fluide, chaleur spécifique de la roche et du fluide) ainsi qu'une valeur moyenne et un écart type pour chacun de ces paramètres (étape 1 à 2 cf. Figure 17). Le code de calcul Matlab va automatiquement estimer les valeurs de HIP en appliquant la méthode de simulation de Monte-Carlo pour chaque cellule (étape 3). Ainsi, un tirage aléatoire des valeurs est opéré suivant une distribution de loi normale pour les paramètres considérés dans le calcul. L'utilisateur peut alors définir le nombre de calcul à réaliser.

[6] https://www.icgc.cat/en/Public-Administration-and-Enterprises/Services/Geothermics/Deep-Geothermal-Potential-Assessment-3DHIP-Calculator

Le script va ensuite sommer les valeurs de l'ensemble des cellules constituant le réservoir pour chaque calcul de HIP réalisé (cf. étape 4) et fournir en sortie une courbe de probabilité cumulée et donc les estimations P10, P50 et P90 des chaleurs en place par réservoir en PJ. Pour visualiser le résultat sous forme de carte, en PJ/km² (cf. étape 5), le script compile les P10, P50 et P90 pour chaque cellule et additionne toutes les valeurs de HIP suivant l'axe Z pour une cellule (i.e. même X Y). La chaleur récupérable surfacique est estimée en kW/m² d'après la formule suivante :

$$H_{recupérable} = \frac{HIP \cdot C_e \cdot R}{T_{live} \cdot L_f} \quad (5)$$

Où C_e est un coefficient de conversion (efficacité de l'échange de chaleur du fluide géothermal vers le système en surface), R le facteur de récupération, T_{live} la durée de vie de la centrale, et L_f un facteur relatif à l'installation (considère la fraction du temps total de fonctionnement de la centrale). La chaleur récupérable est estimée pour les valeurs P10, P50 et P90.

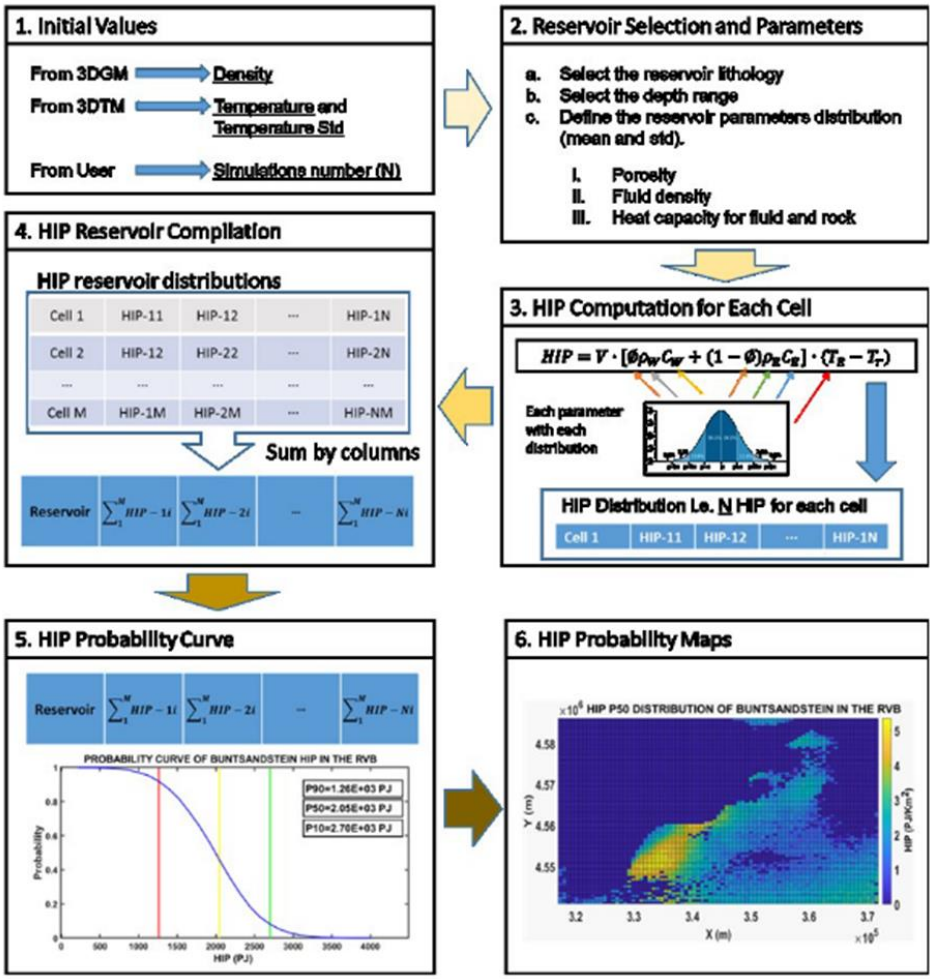


Figure 17 : Schéma de fonctionnement des étapes du script Matlab implémenté dans le logiciel 3DHIP d'après (Herms et al., 2021).

3.3.5. Démonstrateur Thermo2Pro (BRGM) et intérêt du développement d'outil d'aide à l'exploration et l'exploitation des ressources géothermales en France

Un démonstrateur d'outil d'aide à la décision à destination des professionnels de la géothermie avait été initié en France en 2011 dans le cadre des projets cofinancés par l'ADEME Thermo2Pro puis TRANS-CLAS en 2014 (Calcagno *et al.*, 2013, 2014). Le projet Thermo2pro avait pour objectif de partager les informations géologiques et pétrophysiques avec les professionnels de l'industrie géothermale en France afin de favoriser les développements de projets exploratoires. Ce projet a notamment permis d'interroger les professionnels, les collectivités locales et bureaux d'étude sur leurs attentes et intérêts en ce qui concerne le développement d'outil d'aide à la décision et de diffusion d'information du sous-sol. Ainsi, d'après (Calcagno *et al.*, 2013), plusieurs attentes en fonction des utilisateurs ont pu être identifiées. Le premier intérêt est celui de la promotion de la géothermie, d'une part auprès des communes souhaitant se lancer dans le développement de projet. L'outil peut alors être utilisé comme support de communication par les organismes étatiques (ADEME, DREAL, DRIEE), par les maitres d'ouvrage (e.g. AGEMO) ou par des sociétés d'exploitant pour démarcher de nouveaux clients. Un deuxième intérêt de l'outil, identifié par les bureaux d'étude sous-sol principalement, est celui d'aide considérable à la prospection grâce aux informations mises à disposition mais aussi lors du suivi des dossiers par les autorités (notamment pour la vérification des éléments produits par les bureaux d'étude). Il peut également permettre aux collectivités ayant déjà des solutions de géothermie en opération de connaitre le potentiel d'ouverture et de développement des réseaux existants via de nouveaux ouvrages et l'exploitation de nouvelles ressources. Enfin, les maitres d'ouvrages et exploitants considèrent l'outil comme un moyen de suivre les données d'exploitation à l'échelle de l'aquifère notamment pour l'évolution de la bulle froide et du champ de pression dans le cas où des modélisations dynamiques des champs géothermaux seraient mises à disposition. Le niveau d'information souhaité est donc relativement différent suivant les acteurs (i.e. bureaux d'étude, administration, opérateur et exploitant, etc.).

Le projet Thermo2pro avait également permis d'identifier un certain nombre de précautions d'usage à préciser pour ce type d'outil et pour l'utilisation des données diffusées. En effet, la diffusion des seules données du sous-sol (propriétés hydrodynamiques, informations géologiques, etc.) ne permettrait pas d'identifier le potentiel de développement de la ressource sur une zone donnée. Ces informations devraient en effet être complétées par des paramètres technico-économiques (e.g. disposition des ouvrages, besoins énergétiques en surface, investissement à réaliser en matière d'ouvrage ou de réseau de chaleur, paramètres économiques de projets, etc.) pour pouvoir définir un potentiel économique de développement de la ressource géothermale profonde. Cependant, les collectivités et usagés de l'outil pourraient également être induits en erreur à la lecture des cartes de potentiel économique et technique ; soit en estimant sur un secteur donnée une bonne ressource qui pourrait par la suite ne pas être exploitable d'un point de vue économique ou, inversement, être dissuadé de proposer une étude technique au vu d'un potentiel identifié comme faible qui pourrait s'avérer économiquement viable pour un besoin énergétique donné ou grâce à un appoint énergétique. Présager d'un potentiel sur des aquifères encore non exploités pour les ressources géothermales, par exemple l'aquifère du Trias en région parisienne, peut être sensible puisque l'exploitation par les technologies actuellement disponibles peut s'avérer complexe, d'autant plus lorsque les retours d'expérience de forage et d'exploitation de ces aquifères sont rares.

En revanche, la diffusion des informations brutes avec des précisions sur les précautions d'usage semble intéressante par la profession.

Ces informations fournies peuvent être considérées comme une source d'information et une aide aux bureaux d'étude, notamment lors des phases de prospection ou lors de la constitution des demandes d'autorisation auprès des autorités. Cependant, les échelles de travail proposées dans le cadre du projet Thermo2Pro et du projet actuel ATLAS GTH BT sont celles du bassin ou de la région. Les bureaux d'étude technique doivent donc poursuivre les investigations géologiques et hydrogéologiques à l'échelle locale pour le dimensionnement de nouveau projet de géothermie.

L'interrogation des acteurs de la filière par (Calcagno *et al.*, 2013) a fait émerger un certain nombre d'élément qu'ils seraient souhaitables selon eux de diffuser. Pour les actions de promotion et d'exploitation de la ressource, les acteurs ont exprimé le souhait d'accéder aux propriétés de température, aux débits, profondeurs et puissances. Pour les objectifs exploratoires, les acteurs ont exprimé le souhait d'accéder aux données géophysiques et pétrophysiques, aux analyses d'eau et tests sur carottes, aux informations de puits (rapports, etc.), aux sens et vitesse d'écoulement des nappes, aux températures, débits, puissances, profondeurs, perméabilités et transmissivités des formations.

Un certain nombre de ces informations sont actuellement disponibles pour les ouvrages exploitant le Dogger en consultation sur la base de données https://sybase.brgm.fr qui est restreint aux Administrations, ADEME et bureaux d'étude spécialisés sous-sol. Les données de géophysiques existantes sur le territoire peuvent également être consultées sur l'espace cartographique du site http://www.minergies.fr/fr/cartographie. Les moyens de diffusion des cartographies de profondeurs et d'épaisseurs, de températures et des propriétés hydrodynamiques des formations et aquifères réalisés dans le projet Atlas GTH BT sont détaillés en section 4.

4. État d'avancement et perspectives

4.1. MÉTHODE DE MISE À DISPOSITION ET DE DIFFUSION DES DONNÉES SUR L'ESPACE CARTOGRAPHIQUE DU SITE WWW.GEOTHERMIES.FR

Pour la diffusion des cartes recueillies dans le projet, des services cartographiques - de type Web Map Service (WMS) et Web Feature Service (WFS) - ont été mis en place. Il s'agit de protocoles de communication standard permettant la diffusion de cartes géo-référencées à partir de serveurs de données vers des applications web pour le premier et permettant d'interroger des serveurs cartographiques afin de manipuler des objets géographiques au moyen d'une URL formatée pour le second.

L'objectif de la mise en ligne de ces services est d'une part leur diffusion sur l'application web www.geothermies.fr mais aussi de permettre à un utilisateur de charger les cartes sur un outil SIG (e.g. ArcGIS ou QGIS).

Les cartes sont issues de modélisations géologiques et hydrogéologiques ou d'interpolations spatiales de propriétés pétrophysiques et géochimiques sur de nombreux aquifères et formations dans les principaux bassins géologiques de France métropolitaine. Comme illustré en section 2, les informations disponibles pour chaque formation correspondent généralement à la cote altimétrique du toit de l'horizon, l'épaisseur et la température estimée au toit. Pour des formations et aquifères dont la connaissance est plus développée, les propriétés pétrophysiques ou encore les propriétés physico-chimiques des réservoirs et des fluides géothermaux ont été recueillies.

Les utilisateurs ciblés sont l'ensemble des acteurs de la filière géothermie profonde : bureaux d'étude surface et sous-sol, collectivités, administrations, opérateurs et exploitants, etc. Les objectifs sont multiples (cf. section 0) et la diffusion doit notamment permettre la promotion de la géothermie profonde mais aussi d'appuyer les acteurs de la filière lors de l'exploration des ressources peu ou pas encore exploitées.

Dans un premier temps, seules les couches associées aux formations ciblées pour l'exploration et l'exploitation de la ressource de basse température dans le Bassin parisien ont été diffusées sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr. Ces formations sont celles de l'Albien (6 couches), du Néocomien (6 couches), du Lusitanien (4 couches) et du Dogger (14 couches). Au total se sont donc 30 couches qui ont été diffusées début 2021.

Le projet Atlas GTH BT porte cependant sur plusieurs bassins géologiques et plusieurs aquifères et formations ciblées pour l'exploration et l'exploitation des ressources géothermales profondes dans ces bassins. À terme, c'est donc l'ensemble des informations sur chaque bassin qui sera diffusé sur l'espace cartographique du site web. Des cartographies de potentiel géothermique ont également été recensées sur le territoire, avec des méthodes d'estimation pouvant varier d'une étude à une autre et donc d'un aquifère à un autre (Bichot *et al.*, 2009; Caritg *et al.*, 2014; Hamm *et al.*, 2017). Étant donné l'hétérogénéité des méthodes appliquées et étant donné également la variabilité des niveaux d'information pour les aquifères et formations ciblées, le choix a été fait pour cette première étape du projet Atlas GTH BT de se limiter à la diffusion des cartes brutes de profondeur, épaisseur, température, et propriétés de réservoir.

Les objets manipulés pour la diffusion sont les formations géologiques et grilles de géométrie ou propriétés associées dans différents bassins. Les grilles sont de différents formats (raster : tif, ascii ou fichier de forme : shapefile), origines et avec des mailles de taille identique pour un(e) même aquifère/formation. En revanche, la taille des mailles est différente d'un aquifère à un autre dans un même bassin et, évidemment entre les différents bassins. Les données sont issues de différents travaux de recherche menés par le BRGM. Il n'y a actuellement pas de stockage en base de données ou de mise à jour des données. Pour la diffusion des données brutes qui sont actuellement exploitées, les services (WMS) de diffusion sont construits avec *Mapserveur*. Chaque couche représente une propriété et le retour à l'interrogation fournit la valeur de cette propriété au point cliqué.

La Figure 18 illustre l'arborescence choisie dans l'espace cartographique pour la diffusion des couches.

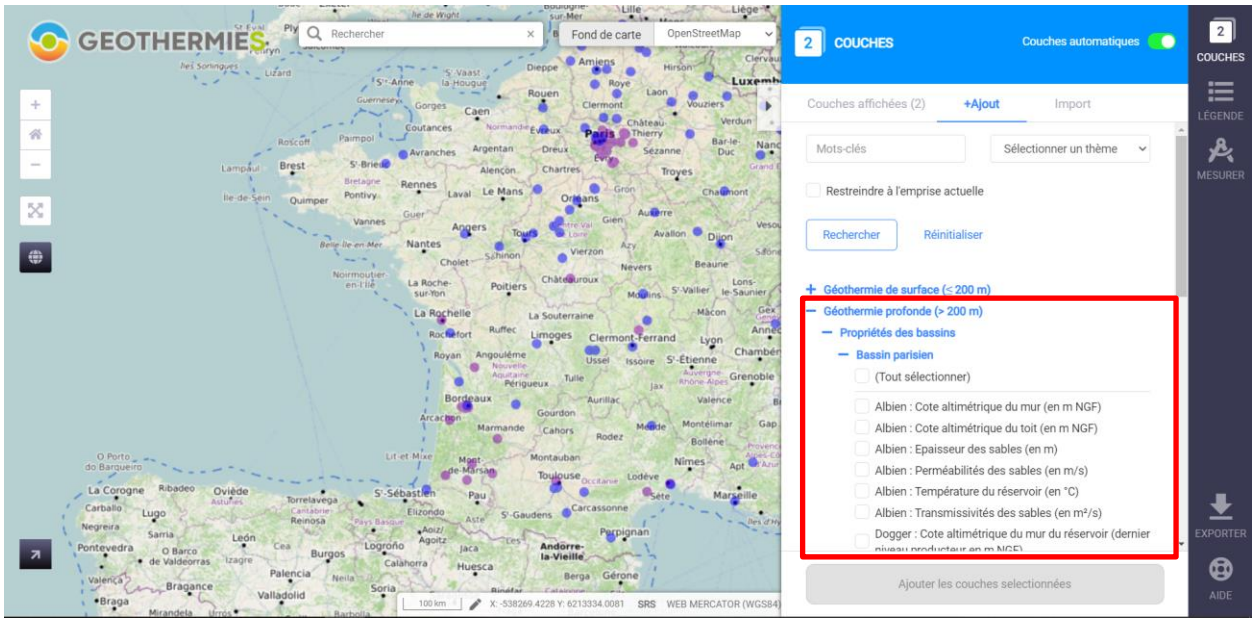


Figure 18 : Illustration de l'espace cartographique du site https://www.geothermies.fr/viewer/ et arborescense des cartes diffusées (Géothermie profonde (>200 m)/Propriétés des bassins/…).

Pour chaque couche diffusée, des métadonnées sont définies. Il s'agit d'identifier les contraintes d'accès, le nom du service (type), l'url du service et l'url de la légende qui peuvent ensuite être utilisés notamment pour un affichage SIG par les utilisateurs (e.g. QGIS, ArcGIS), de présenter la couche *via* un résumé décrivant le contenu, la façon dont elle a été produite et les précautions à prendre avant son utilisation en se référant au rapport (via un lien url vers le site Infoterre.brgm.fr) où l'utilisateur peut trouver toutes les informations relatives à la construction des modèles et cartes. Le contact BRGM et l'étendue de la couche sont également précisés. La Figure 19 illustre les informations décrites ci-dessus pour la carte de la cote altimétrique du mur de l'Albien.

La légende des couches peut être visualisée via l'onglet « couches » ou bien via l'onglet « légende » qui se trouvent à droite de l'écran de l'espace cartographique. Les couches peuvent être interrogées afin d'identifier la valeur en un point donné. Cette possibilité est illustrée en Figure 20.

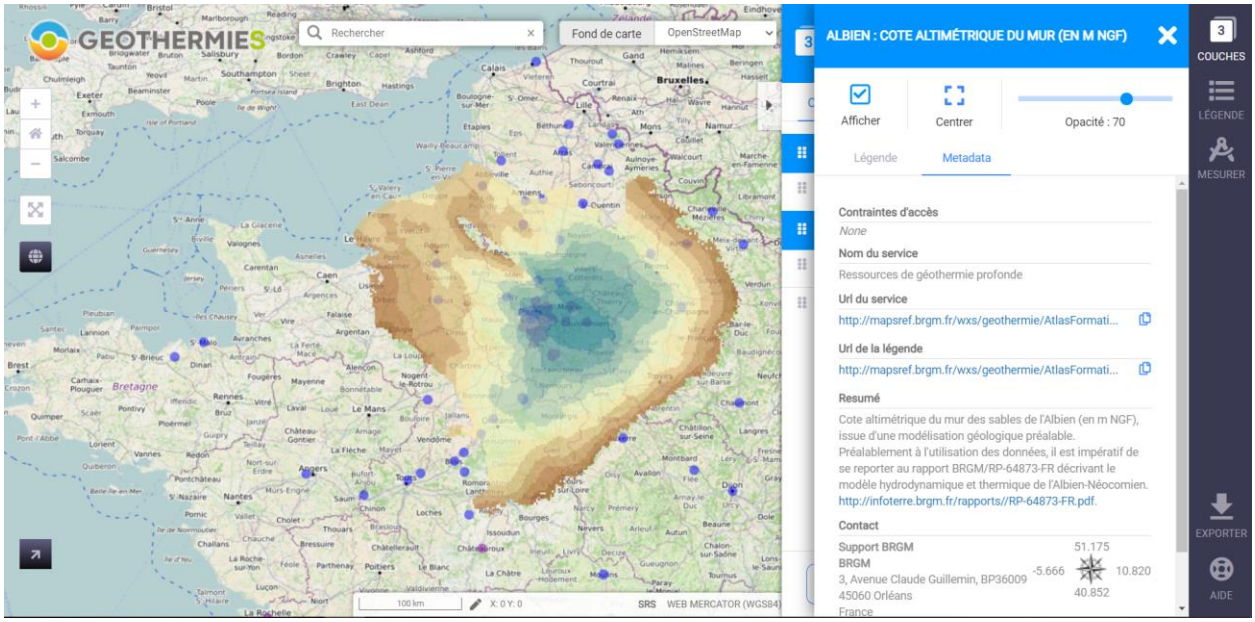


Figure 19 : Illustration de l'affichage d'une couche (cote altimétrique du mur de l'Albien en mNGF) sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr et les métadonnées associées à cette couche.

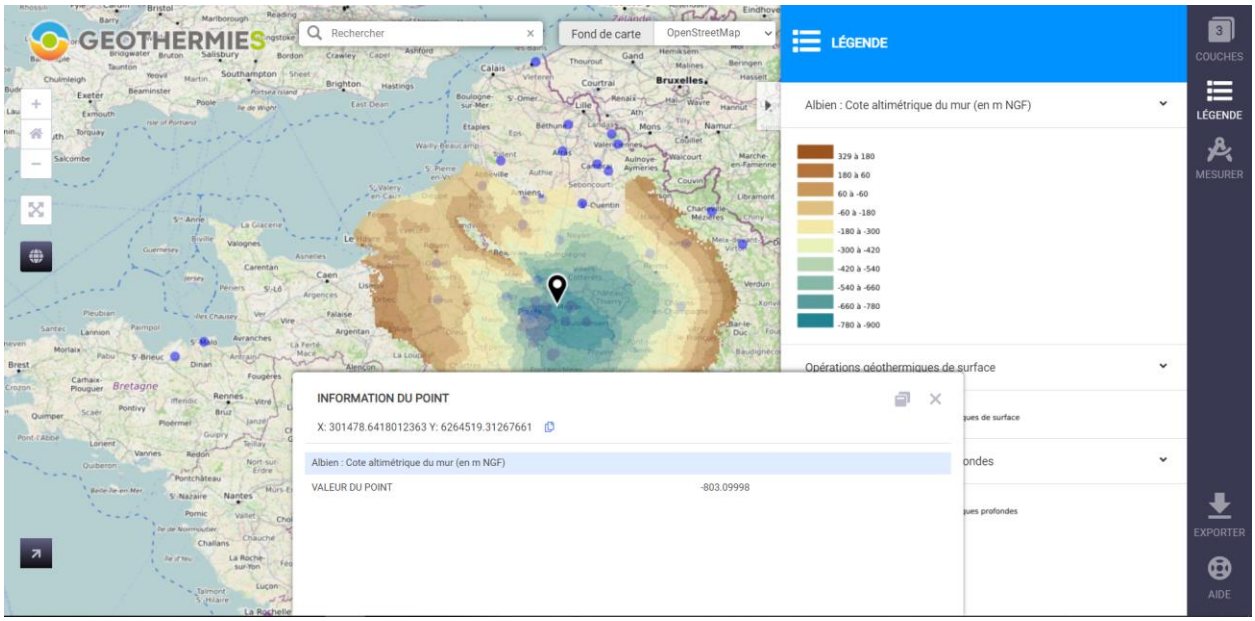


Figure 20 : Illustration de l'affichage d'une couche (cote altimétrique du mur de l'Albien en mNGF) sur l'espace cartographique du site geothermies.fr, de l'interrogation en un point X,Y (cf icône noir sur la carte) de la valeur de la couche et de l'affichage de la légende de cette couche.

4.2. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION

L'objectif de la diffusion des données étant d'identifier des zones à fort potentiel au niveau de différents bassins et formations ou aquifères sur le territoire métropolitain, il est pertinent que les propriétés attachées à une maille soient résumées dans un seul tableau par formation dans un bassin donné. Ainsi, une évolution envisagée est de pouvoir sélectionner une couche et en pointant sur une coordonnée X, Y de la carte pouvoir identifier dans un tableau unique la propriété sélectionnée mais également les autres propriétés disponibles en ce même point pour cette formation.

Pour permettre ce type de fonctionnement d'interrogation des couches, il est nécessaire de structurer les données (i.e. les propriétés d'une formation seront stockées dans la même table ou fichier de forme de type shapefile sur une maille à identifiant unique). Les informations seront alors chargées en base de données et stockées. Cette base de données sera de type *PostgreSQL* et sera destinée à accueillir les données « Géothermie » actuellement présentes sur l'espace cartographique du site www.geothermies.fr et permettra également le chargement de nouvelles données. Les services déjà mis en place seront branchés sur la source de cette base de données pour être visualisés sur l'espace cartographique.

Pour chaque couche diffusée, la fiabilité et la traçabilité des données sont actuellement identifiées dans le résumé (métadonnées des couches) via la description des méthodes de calcul et le renvoi vers le rapport BRGM consultable en ligne lorsque celui-ci est libre d'accès. L'utilisateur a ainsi facilement accès aux méthodes de construction, données utilisées et limites d'usage des cartes. Il est important de noter que les grilles de propriétés recueillies doivent être manipulées et interprétées avec précaution. En effet, les modèles sont contraints par des données de forages et pour certains par des données issues du traitement de lignes sismiques qui peuvent être peu nombreuses et réparties de façon hétérogène sur l'emprise de l'étude considérée. Ainsi, l'identification du degré de confiance et de fiabilité des données et, lorsque cela est possible, une quantification de l'incertitude spatiale seraient des apports majeurs pour la lecture des différentes cartes diffusées. L'information est actuellement disponible pour très peu de formations et propriétés.

Aussi, l'identification du potentiel théorique (i.e. chaleur en place) et du potentiel technique des ressources de façon harmonisée sera étudiée, grâce notamment aux outils développés existants (cf. logiciel 3D HIP présenté en section 3.3). Les cartes obtenues pourront ensuite être diffusées sur l'espace cartographique

Ces évolutions seront étudiées au cours de la convention ADEME-BRGM 2021.

Bibliographie

André, L., Cabaret, O., Douez, O. *et al.* 2020. Projet GAIA – Année 4 – Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéochimique. Rapport d'étape BRGM RP-69126-FR.

Beardsmore, G.R., Rybach, L., Blackwell, D. *et al.* 2010. A protocol for estimating and mapping global EGS potential. Transactions - Geothermal Resources Council 34 1, 271–282.

Beccaletto, L., Nitsch, E., Anders, B. *et al.* 2013. Structural control and 3D modelling of a wrench rift basin: the Upper Rhine Graben of NW Europe as a case study - Contribution of the EU GeORG project.. EGU General Assembly 2013, Apr 2013, Vienna, Austria.

Békési, E., Struijk, M., Bonté, D. *et al.* 2020. An updated geothermal model of the Dutch subsurface based on inversion of temperature data. Geothermics 88, 101880.

Bichot, F., Bonfils, R., Dugrillon, D. *et al.* 2009. Potentiel géothermique du département de la Charente-Maritime. Rapport final BRGM/RP-57683-FR 76.

Bilotte, M., 1991. Séquences de dépôt et limites de blocs dans le Crétacé terminal et le Paléocène basal du bassin d'avant-pays sous-pyrénéen (Petites-Pyrénées - dômes annexes, France). Bull. Centres Rech. Explor.Prod. Elf-Aquitaine 411–437.

Bonté, D., Guillou-Frottier, L., Garibaldi, C. *et al.* 2010. Subsurface temperature maps in French sedimentary basins: New data compilation and interpolation. Bulletin de la Societe Geologique de France 181, 377–390.

Bouchot, V., 2008. Projet CLASTIQ : CLAyed sandSTone In Question. Rapport final BRGM/RP-56626-FR.

Bouchot, V., Bader, A.-G., Bialkowski, A. *et al.* 2012. CLASTIQ-2 : projet de recherche sur les ressources géothermales des réservoirs clastiques en France (bassin de Paris et Fossé rhénan), Rapport final BRGM/RP-61472-FR.

Bourgine, B., Denis, L., Filhine-Tresarrieu, T. *et al.* 2007. Atlas du potentiel géothermique des aquifères lorrains. Rapport final BRGM/RP-54987-FR.

BRGM, SNPA, ESSO-REP, ELF-Re, 1974. Géologie du Bassin d'Aquitaine - Atlas de 27 planches.

Calcagno, P., Alcanié, M., 2014. TRANS-CLAS Méthodologie de Transfert des Données Utiles au Développement du Trias Clastique via l'Outil Web Thermo2Pro. Rapport final BRGM/RP-63957-FR.

Calcagno, P., Chamaret, A., Chauvin, N. *et al.* 2013. Thermo2Pro - Outil d'aide à l'exploration pour la géothermie profonde des bassins sédimentaires à l'usages des professionnels. Rapport final BRGM/RP-62907-FR.

Caritg, S., Bourgine, B., Foissard, D. *et al.* 2014. Projet Lusitanien. Evaluation du potentiel géothermique du Lusitanien du bassin de Paris pour la production de chaleur : mise en adéquation entre ressource et besoins, Rapport final BRGM/RP-63244-FR.

Caritg, S., Tourlière, B., Bourgine, B., 2018. Cartographie des cibles géothermales de moyenne température pour la production d'électricité et de chaleur par cogénération en France métropolitaine, Rapport final BRGM/RP-67853-FR.

Couëffé, R., Tourlière, B., 2008. Modélsiation géologique multicouche Bresse, Dombes, Bas-Dauphiné, Couloir Rhodanien : méthodologie de réalisation, guide d'utilisation des produits numériques. Rapport final BRGM/RP-57712-FR 62.

Curnelle, R., Dubois, P., 1986. Evolution mésozoïque des grands bassins sédimentaires français : bassins de Paris, d'Aquitaine et du Sud-Est. Bull. Soc. géol. Fr. 8, 529–546.

Darnet, M., Maurel, C., Dezayes, C. *et al.* 2020. Etude technico-économique des méthodes d'exploration pouvant être mises en œuvre pour réduire l'aléa géologique des opérations de géothermie profonde en métropole. 112 p., 69 fig., 16 tab. Rapport final BRGM/RP-69790-FR.

Debrand-Passard, S., Courbouleix, S., Lienhardt, M.-J., 1984. Synthèse géologique du Sud-Est de la France. Mémoire du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) - Stratigraphie et paléogéographie 1.

Dupaigne, T., Bault, V., Meire, B., 2019. Réalisation d'une carte piézométrique synchrone de la nappe de l'Albien et nouvelles thermométries du Bassin parisien. Rapport final BRGM/RP-68536-FR.

Durst, P., Ayache, B., Saltel, M. *et al.* 2011. Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse et basse énergie en région Aquitaine - Atlas du potentiel géothermique des aquifères. Rapport final BRGM/RP-59761-FR 175.

Equipe de projet GeORG, 2013. Potentiel géologique profond du Fossé Rhénan supérieur. Partie 1 à 4. www.geopotenziale.eu.

Falcone, G., 2016. Specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Reserves to Geothermal Energy Resources Done in Geneva on 30 September 2016 2009.

Gabalda, S., Vernhet, Y., Rambourg, D. *et al.* 2013. Élaboration d'un chantier RGF : retour d'expérience du chantier pilote Vosges - Fossé rhénan.

Ghyselinck-Bardeau, M., Wuilleumier, A., 2017. Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse à basse énergie (nappes alluviales et thermalisme) dans la région Midi-Pyrénées. Rapport final BRGM/RP-55888-FR 307.

Grellet, B., Combes, P., Granier, T. *et al.* 1993. Sismotectonique de la France métropolitaine dans son cadre géologique et géophysique avec atlas de 23 cartes au 1/4 000 000ème et une carte au 1/1 000 000ème. Société géologique de France ; collection Mémoires de la Société géologique de France (mémoire N.S., 19) 2.

Guillou-Frottier, L., Lucazeau, F., Garibaldi, C. *et al.* 2010. Heat flow and deep temperatures in the Southeast Basin of France: Implications for local rheological contrasts. Bulletin de la Societe Geologique de France 181, 531–546.

Hamm, V., Arnaud, L., 2017. Etude des opportunités de valorisation énergétique du potentiel géothermique en France métropolitaine – Cas de l'Albien et du Dogger. 78 p., 26 fig., 3 ann., Rapport final BRGM/RP-67262-FR.

Hamm, V., Bouzit, M., Lopez, S., 2016. Assessment of complex well architecture performance for geothermal exploitation of the Paris basin: A modeling and economic analysis. Geothermics 64, 300–313.

Hamm, V., Lopez, S., 2012. Impact of Fluvial Sedimentary Heterogeneities on Heat Transfer at a Geothermal Doublet Scale. Proceedings of the 37th Stanford Geothermal Workshop.

Hamm, V., Maurel, C., 2019. Projet Sybase : synthèse de bancarisation et suivi des opérations de géothermie de basse température en France métropolitaine. Rapport final BRGM/RP-68601-FR.

Hamm, V., Maurel, C., Audouin, O. (CFG), 2020. BILAN GTH : Bilan de la filière géothermie profonde pour la production de chaleur sur la période 2007-2018. Rapport final BRGM/RP-69577-FR.

Herms, I., Piris, G., Colomer, M. *et al.* 2021. 3D Numerical Modelling Combined with a Stochastic Approach in a MATLAB-based Tool to Assess Deep Geothermal Potential in Catalonia: The Case Test Study of the Reus-Valls Basin 1–9.

Housse, B., Maget, P., 1977. Potentiel géothermique du Bassin aquitain, Rapport final BRGM/77-SGN-688-GTH.

Housse, B., Maget, P., 1976. Potentiel géothermique du Bassin parisien, Rapport final BRGM/RP-29146-FR.

Limberger, J., Boxem, T., Pluymaekers, M. *et al.* 2018. Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, 961–975.

Maurel, C., Bugarel, F., Hamm, V., 2020. Retour d'expérience des opérations de géothermie à l'Albien et au Néocomien du Bassin de Paris. 138 p., 41 fig., 28 tab., 2 ann. Rapport final BRGM/RP-69437-FR.

McKelvey, V.E., 1972. Mineral resource estimates and public policy. Am. Sci.; (United States) 60.

Muffler, L.J.P., Cataldi, R., 1978. METHODS FOR REGIONAL ASSESSMENT RESOURCES OF GEOTHERMAL The critical dependence of modern society on minerals and fuels has fostered an increasing awareness of the need to estimate not only the quantities that could be produced under present economic cond 7, 53–89.

Muffler, L.J.P., Cataldi, R., 1977. Methods for regional assessment of geothermal resources. U.S. Geological Survey.

Munck, F., Walgenwitz, F., Maget, P. *et al.* 1979. Synthèse géothermique du Fossé Rhénan supérieur. BRGM Service Géologique Régional Alsace.

Nathenson, M., Muffler, L.J.P., 1975. Geothermal resources in hydrothermal convection systems and conduction- dominated areas. In Assessment of geothermal resources of the United States (White. D. E. and Williams, D. L. Edr,.). Circular 726. pp. 104-121. U.S. Geological Survey.

Pester, S., Agemar, T., Alten, J. *et al.* 2010. GeotIS – the Geothermal Information System for Germany 25–29.

R**ybach, L.,** 2010. “ The Future of Geothermal Energy ” and Its Challenges 2006–2009.

Saltel, M., Wuilleumier, A., Cabaret, O., 2016. Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-aquitain de gestion des nappes, Rapport final BRGM/RP-65039-FR.

Seguin, J.-J., 2003. Outil de gestion des aquifères du Sud du Bassin Adour-Garonne - Année 4 - Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire. Rapport BRGM/RP-52041-FR.

Seguin, J.-J., Castillo, C., Arnaud, L., 2015. Modélisation des nappes de l’Albien et du Néocomien du Bassin de Paris, Rapport final BRGM/ RP-64873-FR.

Serrano, O., Delmas, J., Hanot, F. *et al.* 2006. Le Bassin d’Aquitaine: valorisation des données sismiques, cartographie structurale et potentiel pétrolier 245.

United Nations, 2009. Classification-cadre des Nations Unies pour l’énergie fossile et les réserves et ressources minérales. http://www.unece.org/energy/se/reserves.html.

Van Wees, J.-D. (TNO), Boxem, T. (TNO), Calcagno, P. *et al.***.** (CNR), 2013. A Methodology for Resource assessment and application to core countries Table of Contents 1–28.

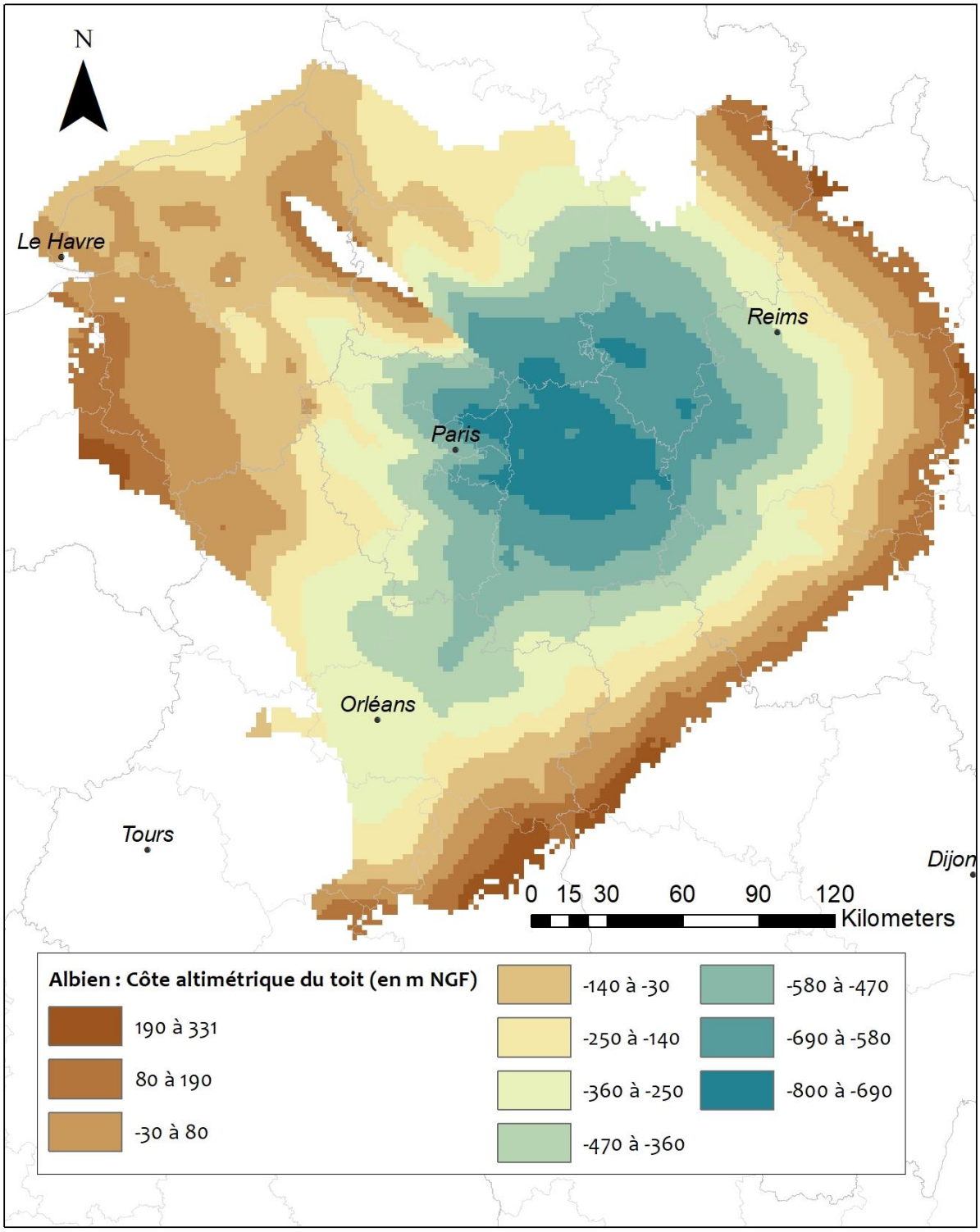
Vrijlandt, M.A.W., Struijk, E.L.M., Brunner, L.G. *et al.* 2019. ThermoGIS update: a renewed view on geothermal potential in the Netherlands. European Geothermal Congress 2016 11–14.

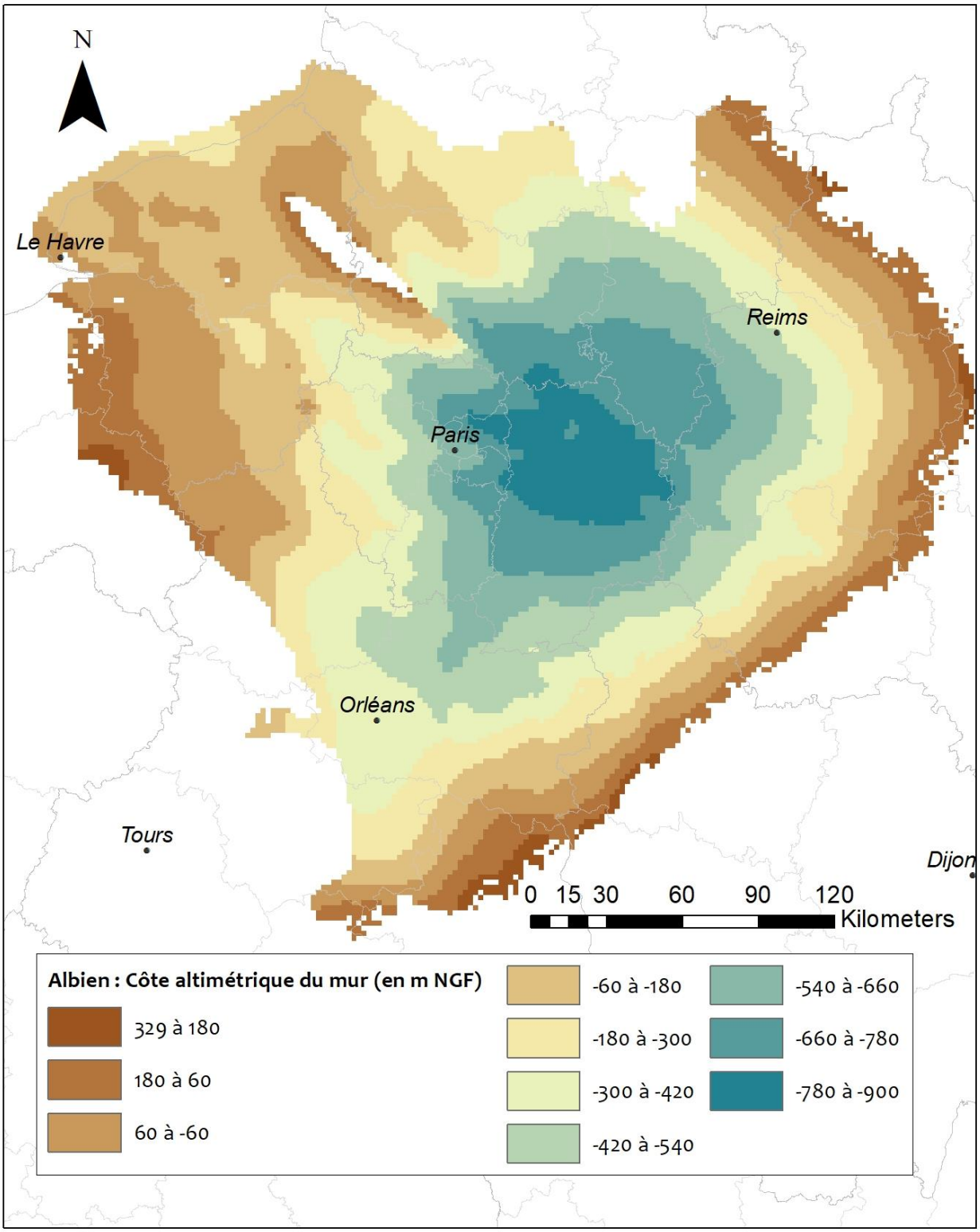
Williams, C.F., Reed, M.J., Mariner, R.H., 2008. A review of methods applied by the U.S. Geological Survey in the assessment of identified geothermal resources. USGS Open File Report 27.

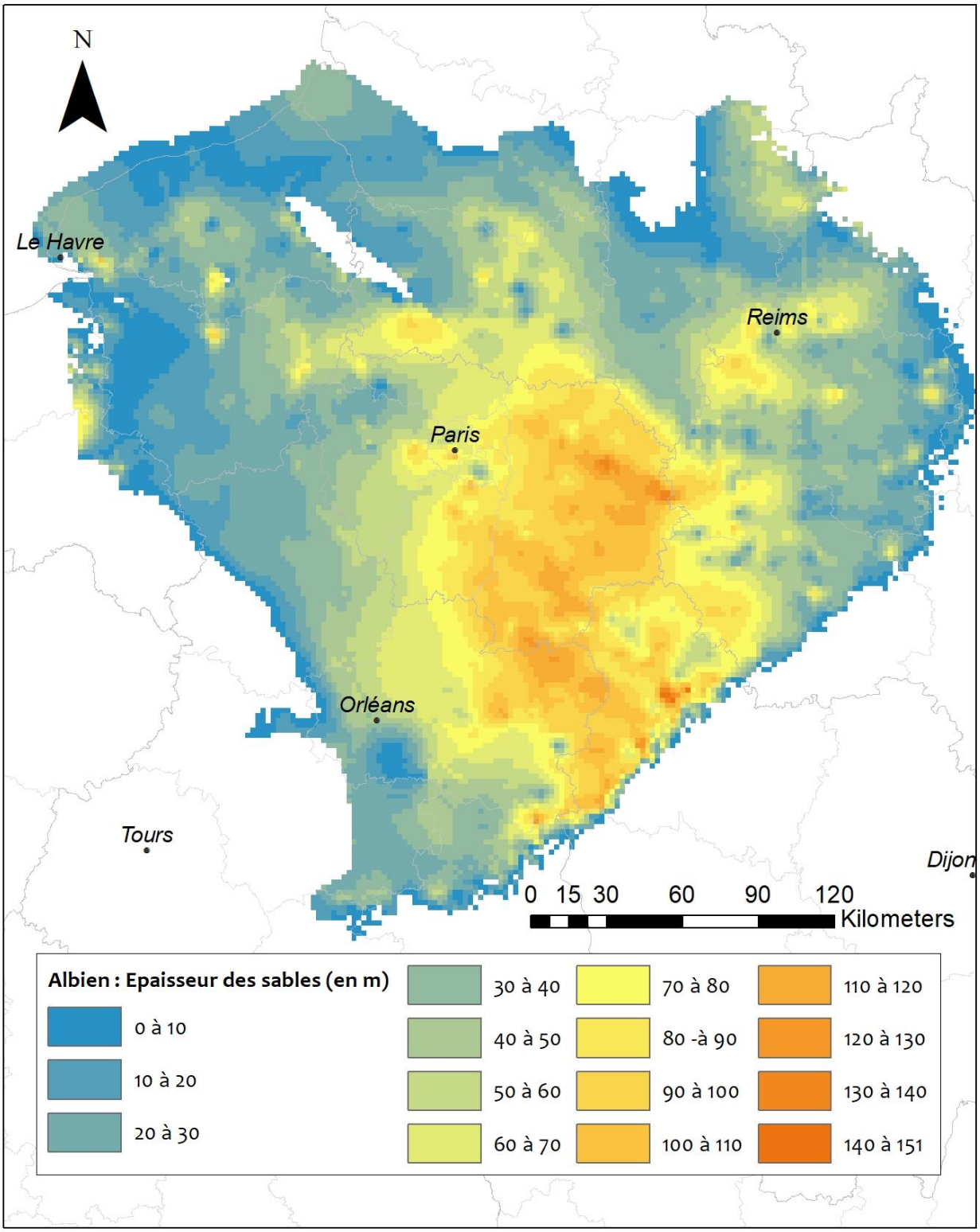
Annexe 1

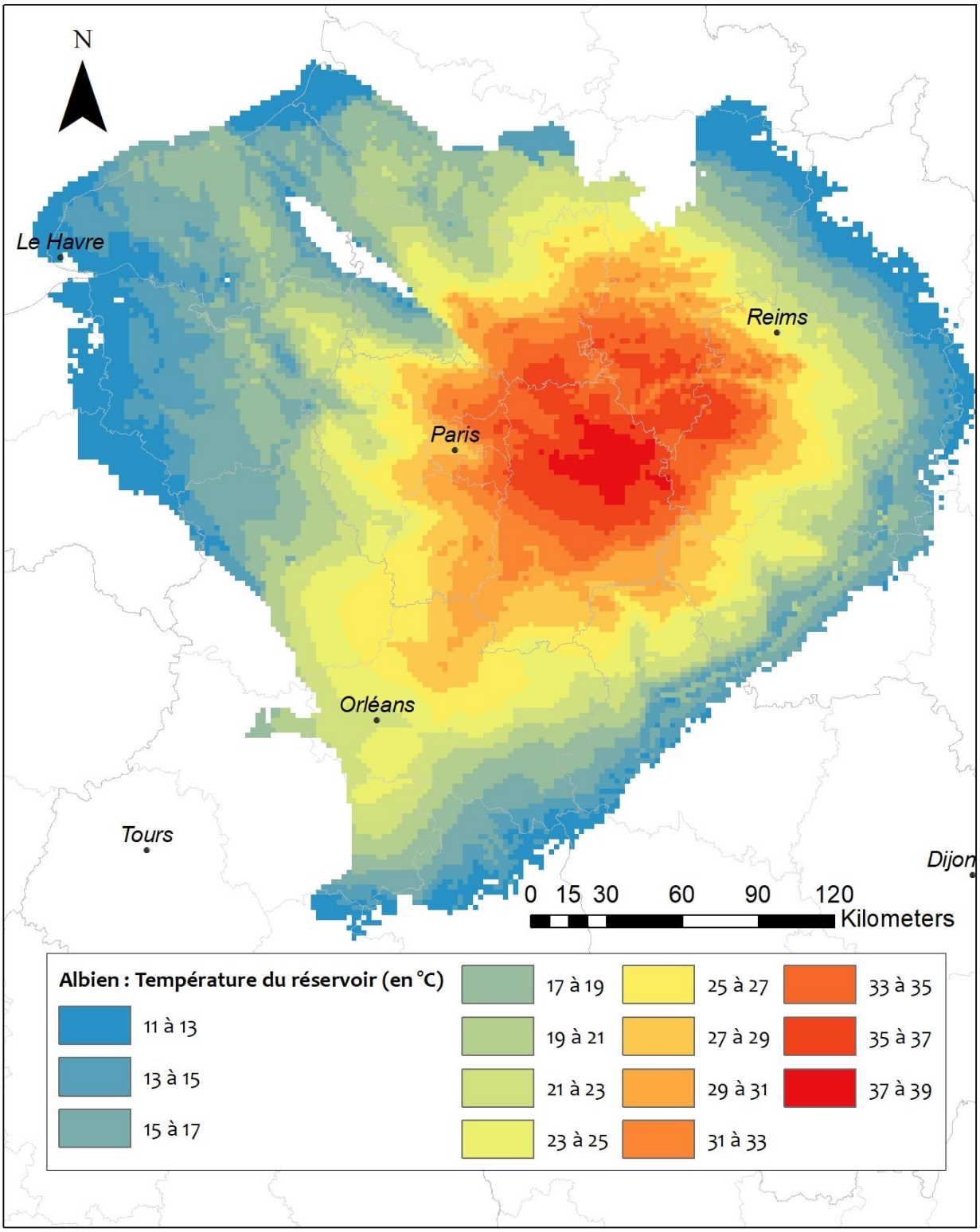
Cartographie des ressources géothermales de basse température du Bassin parisien d'après Caritg, 2018

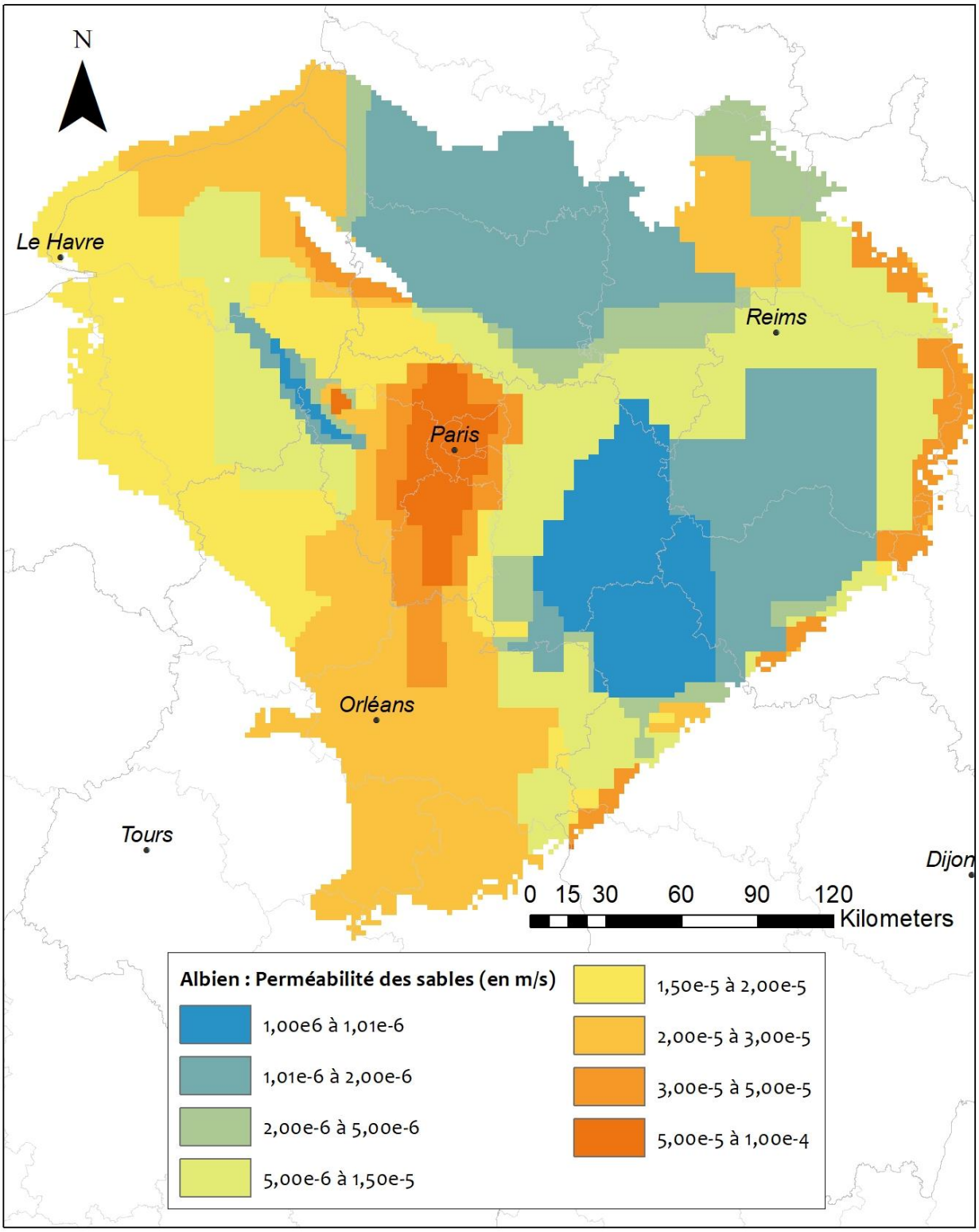
Annexe 1.a
Cartes des propriétés de l'Albien du Bassin parisien d'après Seguin *et al.*, 2015

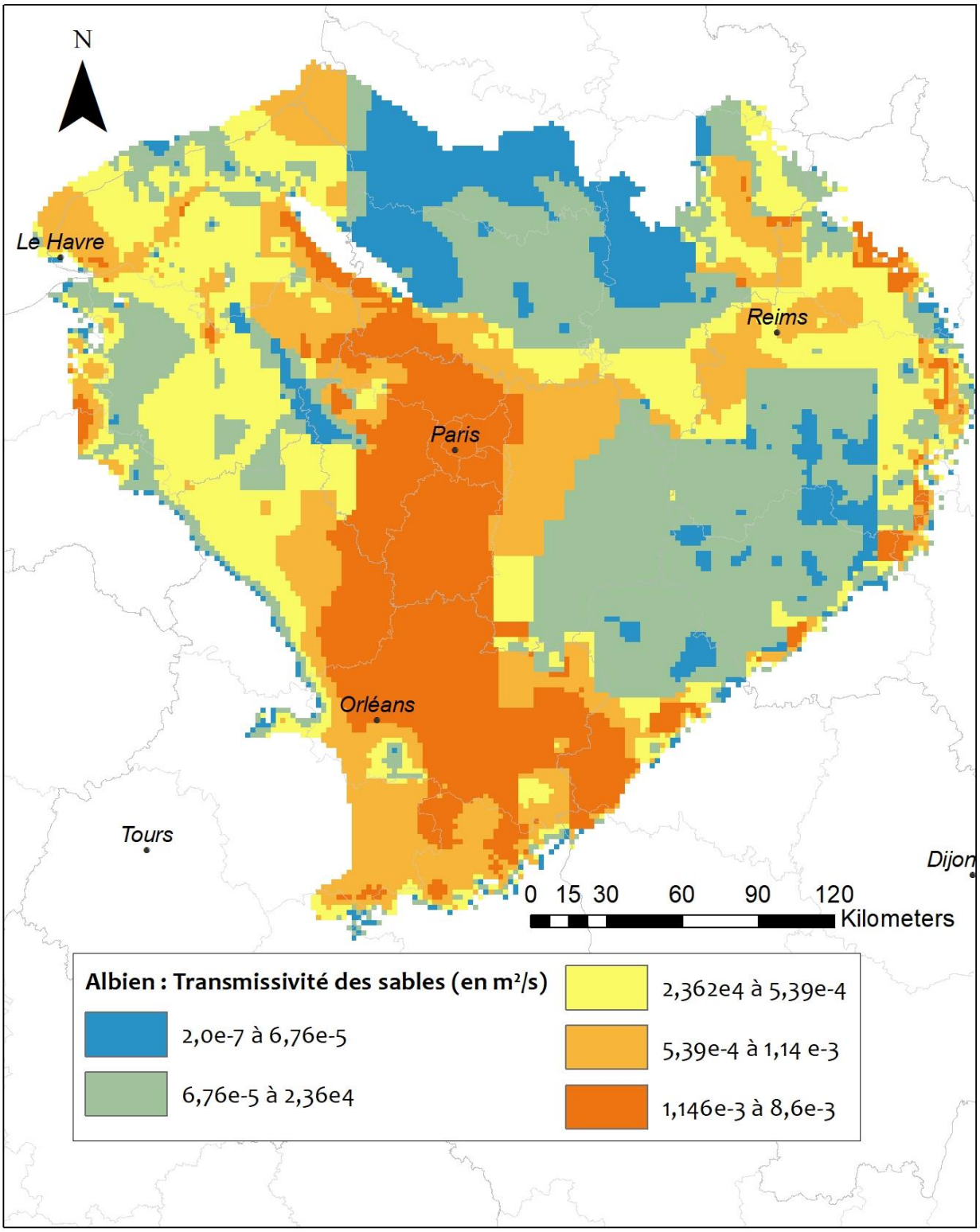



N
Le Havre
Reims
Paris
Orléans
Tours
Dijon
0 15 30 60 90 120
Kilometers
Albien : Côte altimétrique du mur (en m NGF)
329 à 180
180 à 60
60 à -60
-60 à -180
-180 à -300
-300 à -420
-420 à -540
-540 à -660
-660 à -780
-780 à -900

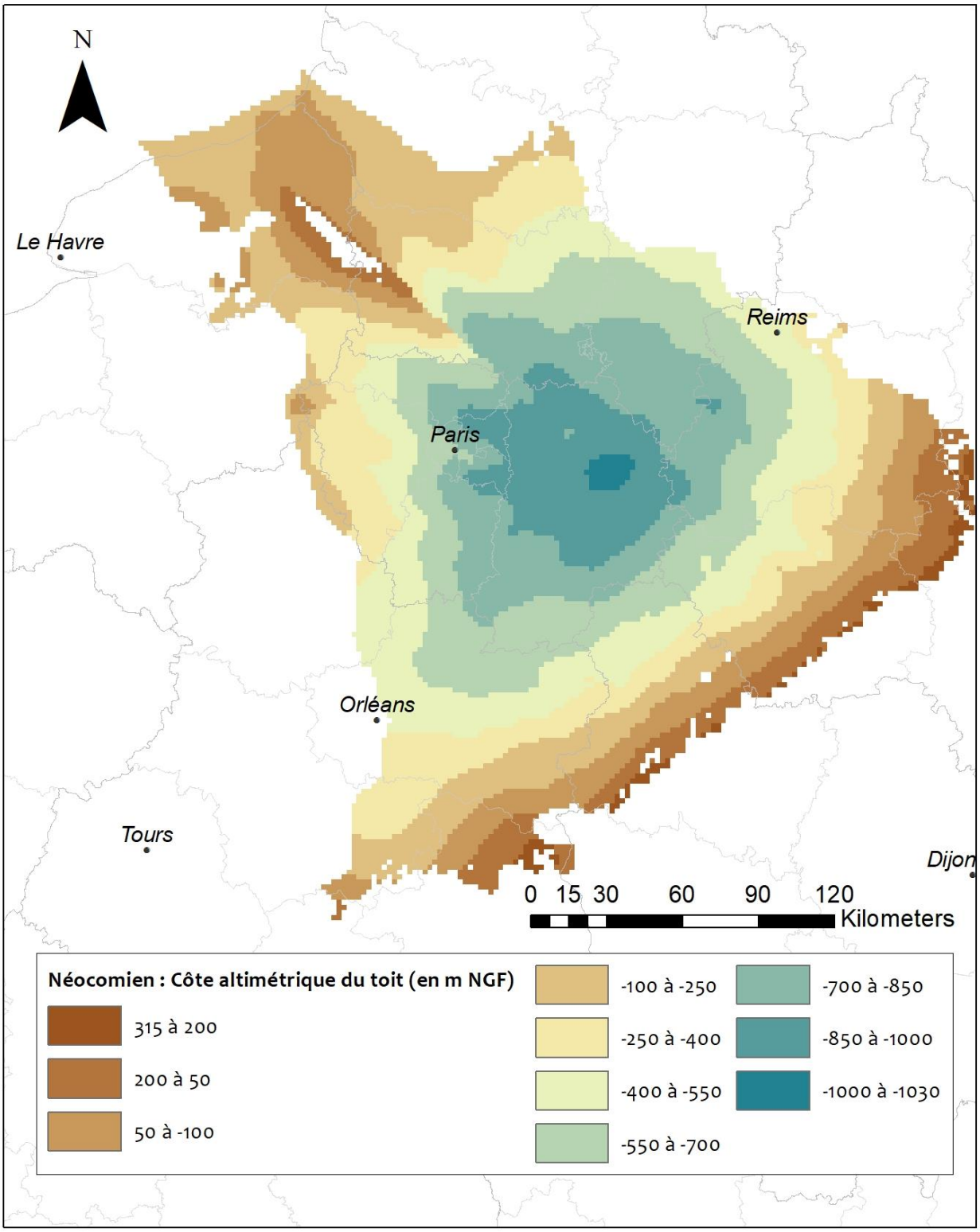

N
Le Havre
Reims
Paris
Orléans
Tours
Dijon
0 15 30 60 90 120
Kilometers
Albien : Epaisseur des sables (en m)
0 à 10
10 à 20
20 à 30
30 à 40
40 à 50
50 à 60
60 à 70
70 à 80
80 -à 90
90 à 100
100 à 110
110 à 120
120 à 130
130 à 140
140 à 151

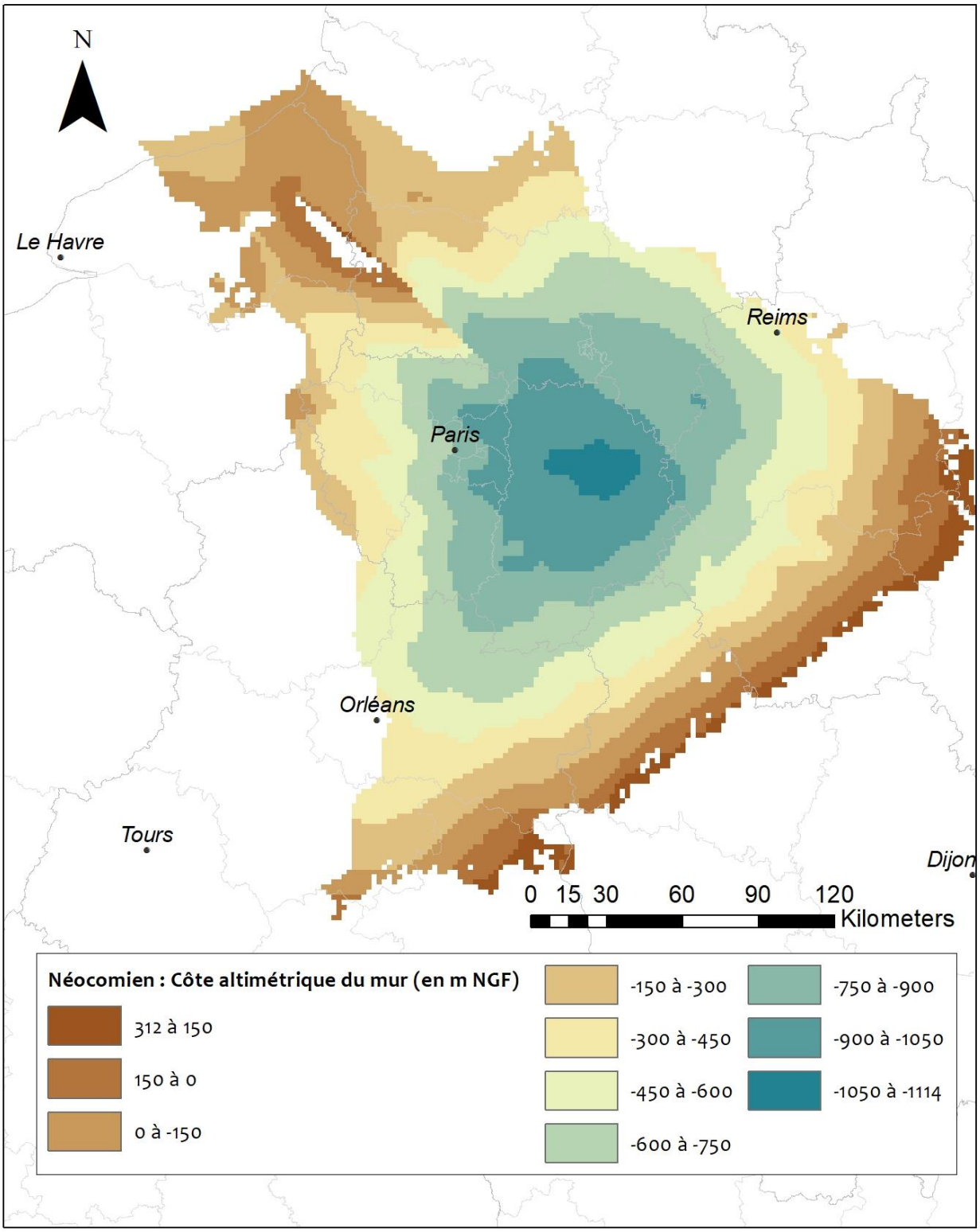

N
Le Havre
Reims
Paris
Orléans
Tours
Dijon
0 15 30 60 90 120
Kilometers
Albien : Température du réservoir (en °C)
11 à 13
13 à 15
15 à 17
17 à 19
19 à 21
21 à 23
23 à 25
25 à 27
27 à 29
29 à 31
31 à 33
33 à 35
35 à 37
37 à 39

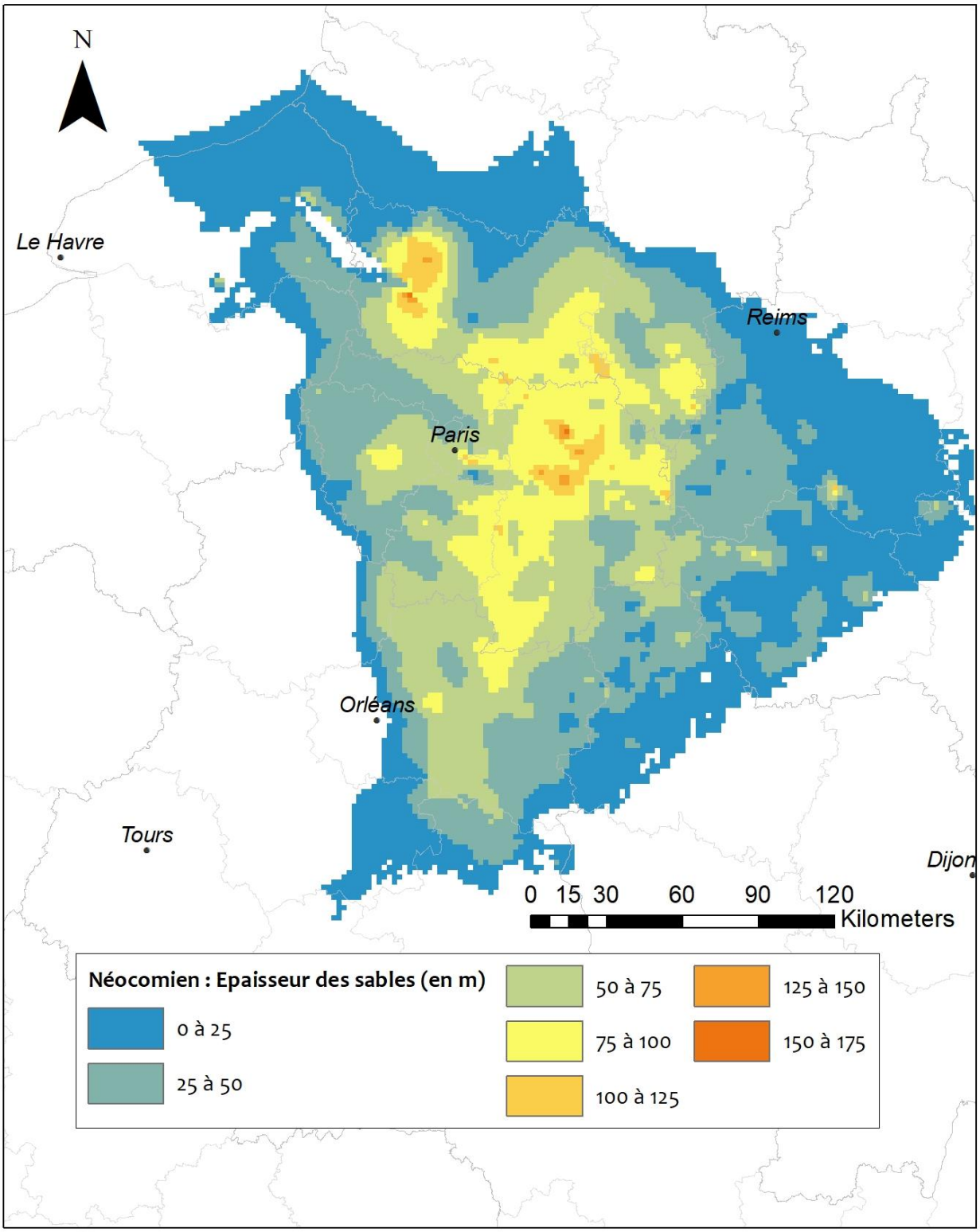

N
Le Havre
Reims
Paris
Orléans
Tours
Dijon
0 15 30 60 90 120
Kilometers
Albien : Perméabilité des sables (en m/s)
1,00e6 à 1,01e-6
1,01e-6 à 2,00e-6
2,00e-6 à 5,00e-6
5,00e-6 à 1,50e-5
1,50e-5 à 2,00e-5
2,00e-5 à 3,00e-5
3,00e-5 à 5,00e-5
5,00e-5 à 1,00e-4

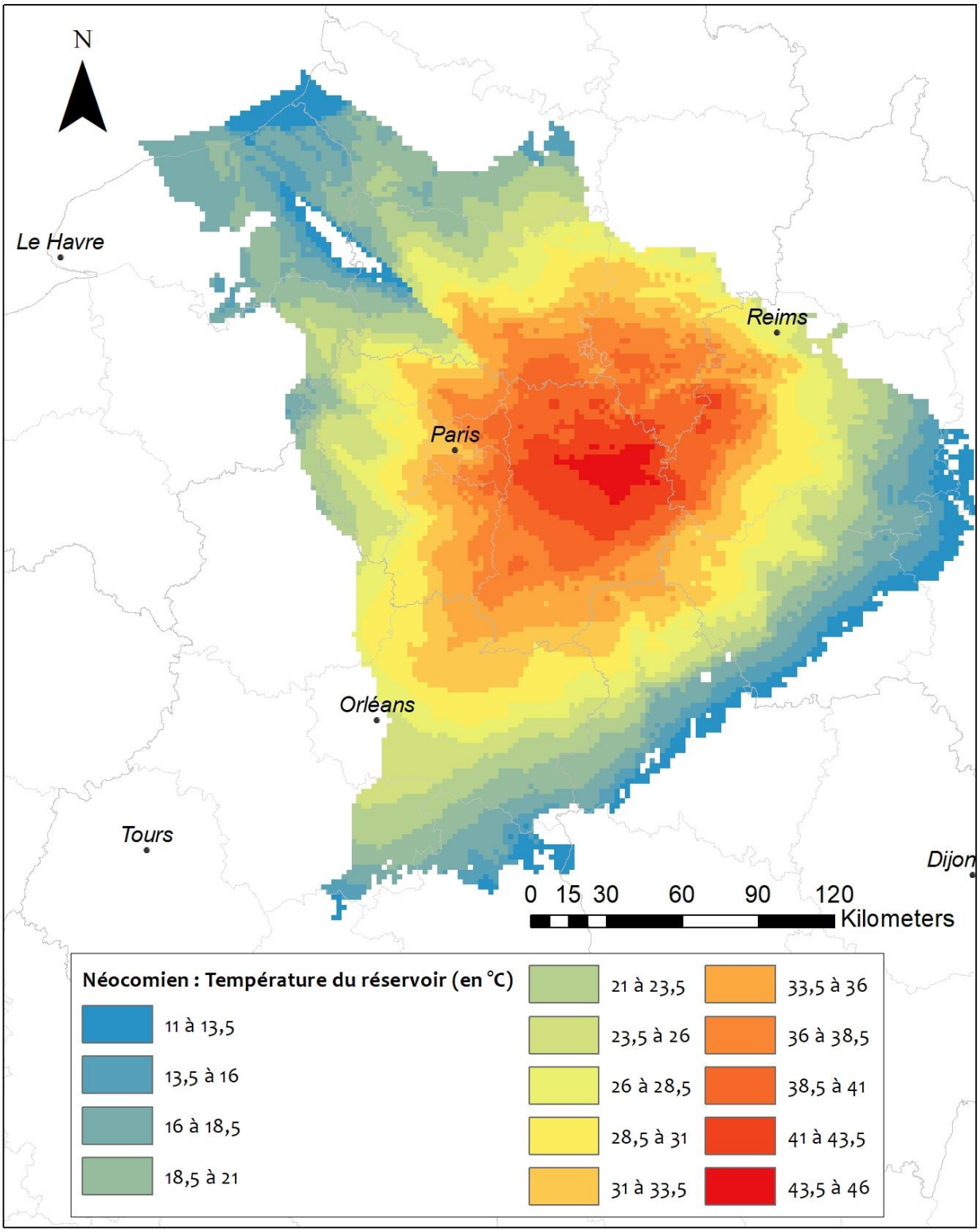

N
Le Havre
Reims
Paris
Orléans
Tours
Dijon
0 15 30 60 90 120
Kilometers
Albien : Transmissivité des sables (en m²/s)
2,0e-7 à 6,76e-5
6,76e-5 à 2,36e4
2,362e4 à 5,39e-4
5,39e-4 à 1,14 e-3
1,146e-3 à 8,6e-3

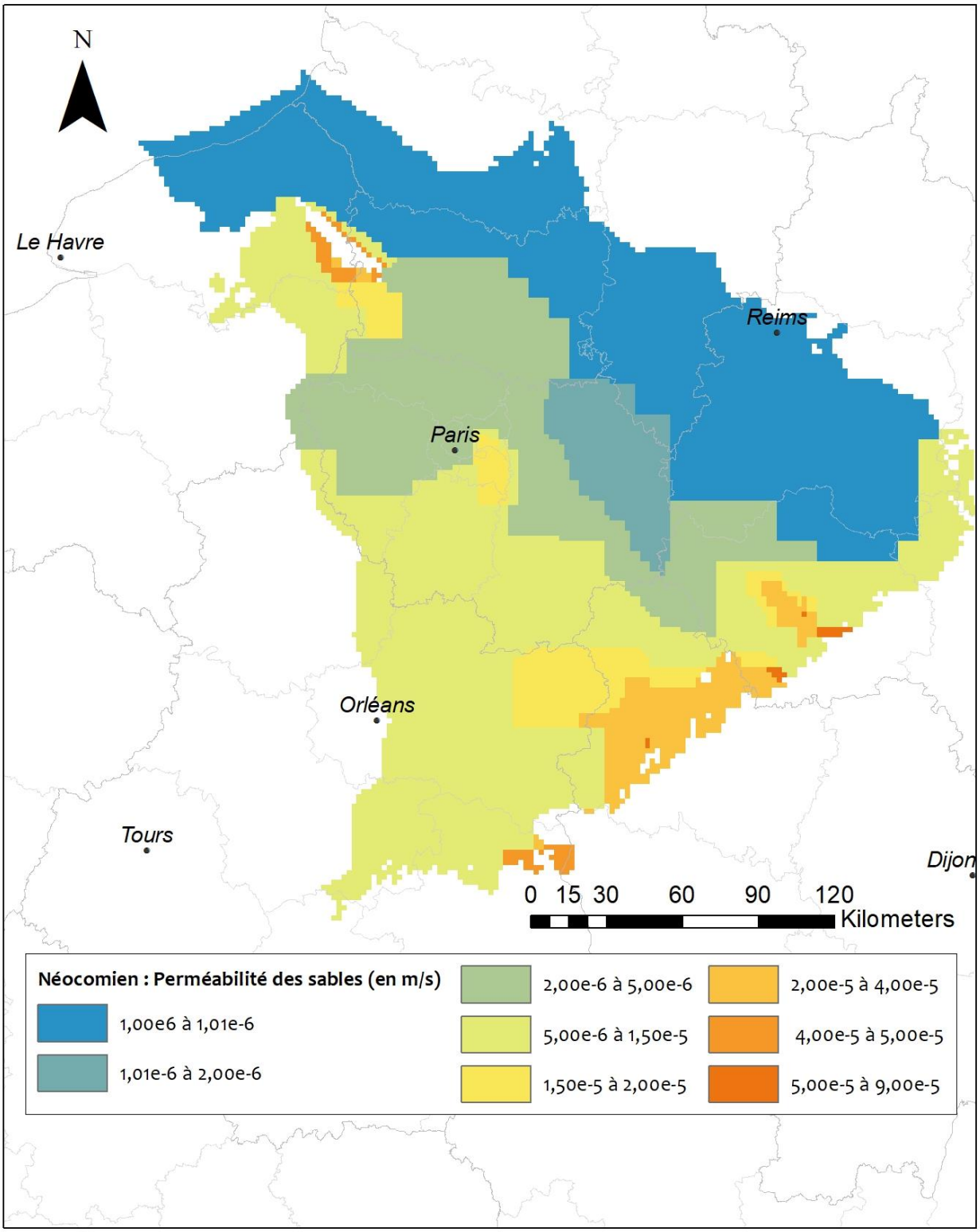
Annexe 1.b
Cartes des propriétés du Néocomien du Bassin parisien d'après (Seguin *et al.*, 2015)

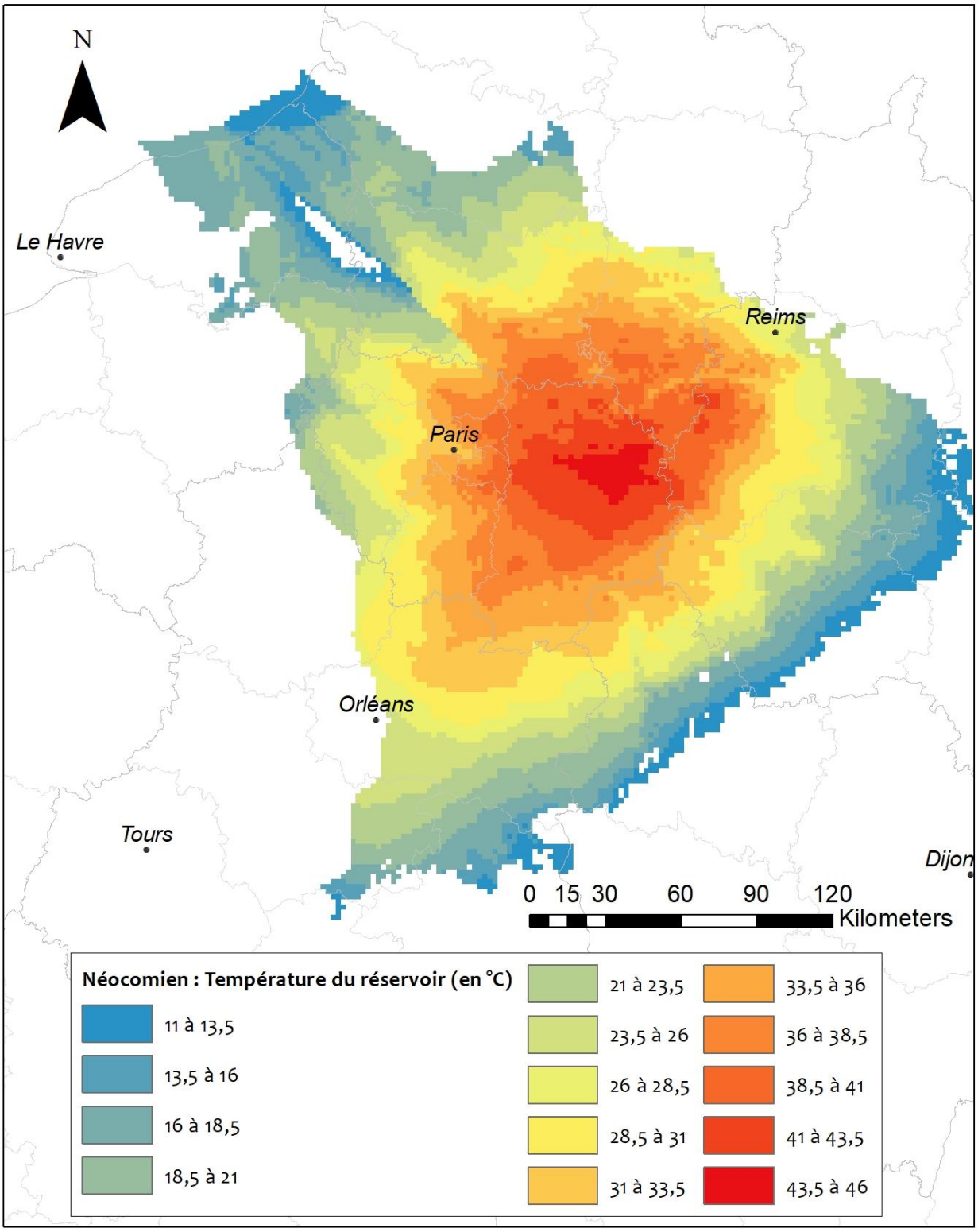



N
Le Havre
Reims
Paris
Orléans
Tours
Dijon
0 15 30 60 90 120
Kilometers
Néocomien : Côte altimétrique du mur (en m NGF)
312 à 150
150 à 0
0 à -150
-150 à -300
-300 à -450
-450 à -600
-600 à -750
-750 à -900
-900 à -1050
-1050 à -1114

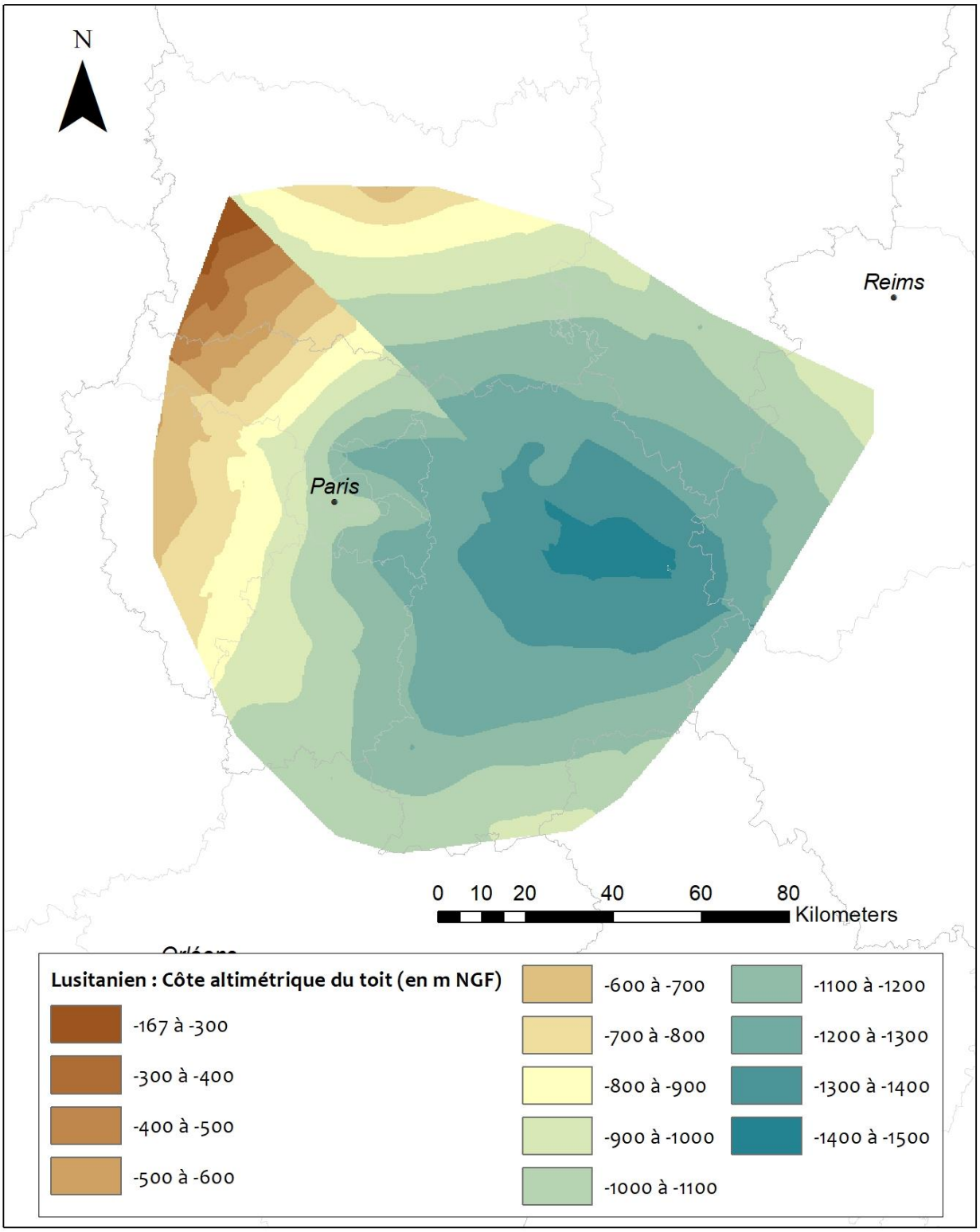

N
Le Havre
Reims
Paris
Orléans
Tours
Dijon
0 15 30 60 90 120
Kilometers
Néocomien : Epaisseur des sables (en m)
0 à 25
25 à 50
50 à 75
75 à 100
100 à 125
125 à 150
150 à 175

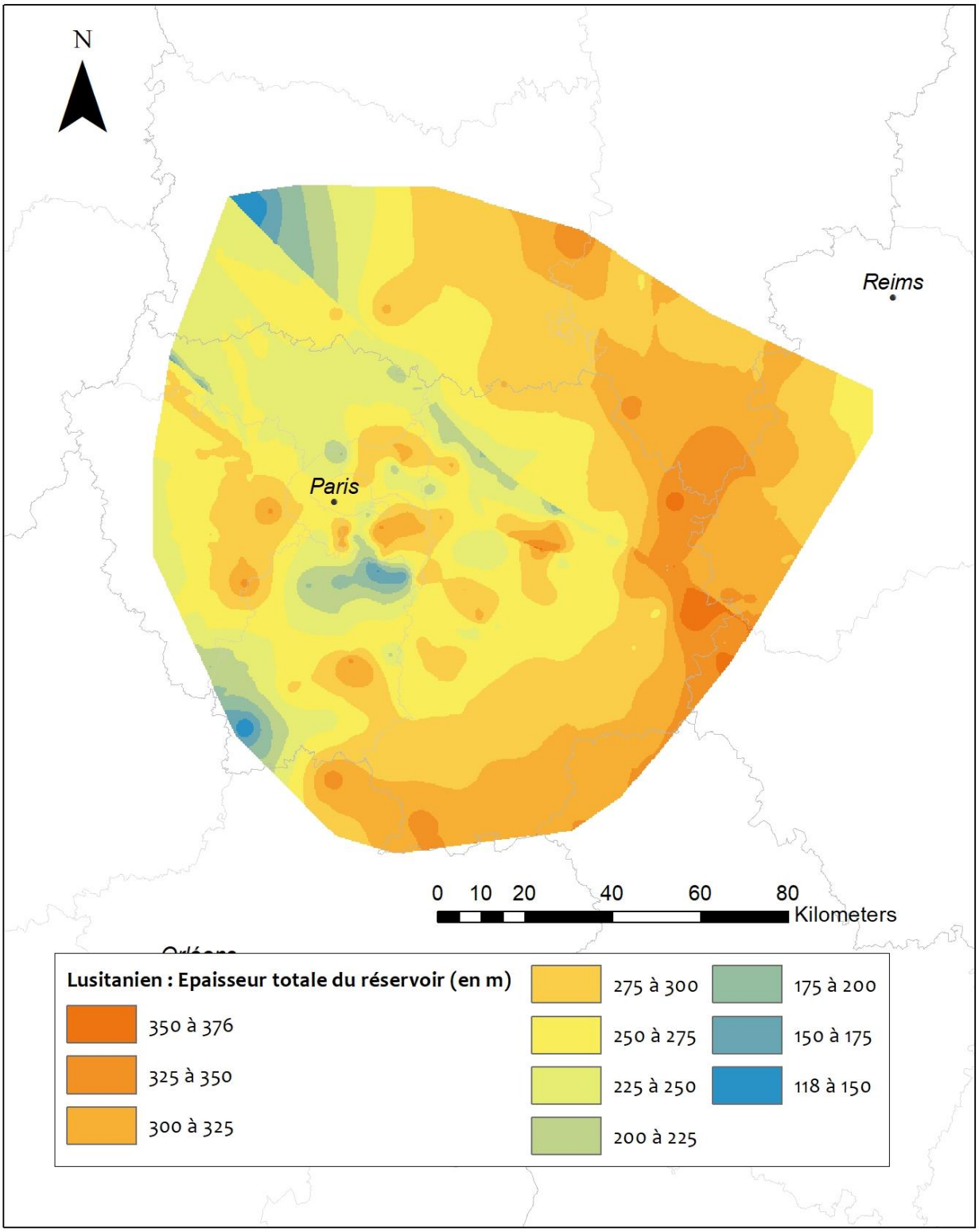

N
Le Havre
Reims
Paris
Orléans
Tours
Dijon
0 15 30 60 90 120
Kilometers
Néocomien : Température du réservoir (en °C)
11 à 13,5
13,5 à 16
16 à 18,5
18,5 à 21
21 à 23,5
23,5 à 26
26 à 28,5
28,5 à 31
31 à 33,5
33,5 à 36
36 à 38,5
38,5 à 41
41 à 43,5
43,5 à 46

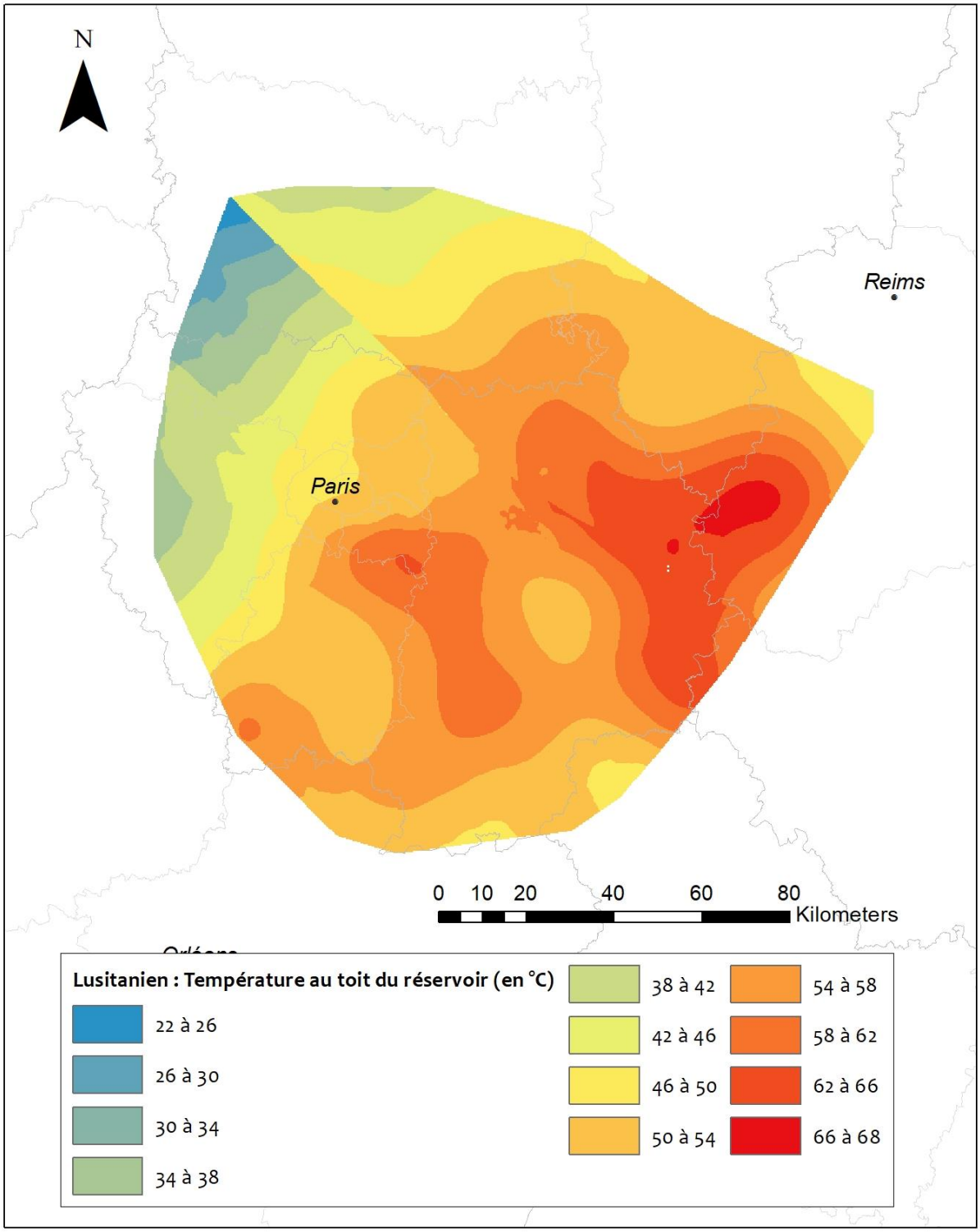

N
Le Havre
Reims
Paris
Orléans
Tours
Dijon
0 15 30 60 90 120
Kilometers
Néocomien : Perméabilité des sables (en m/s)
1,00e6 à 1,01e-6
1,01e-6 à 2,00e-6
2,00e-6 à 5,00e-6
5,00e-6 à 1,50e-5
1,50e-5 à 2,00e-5
2,00e-5 à 4,00e-5
4,00e-5 à 5,00e-5
5,00e-5 à 9,00e-5

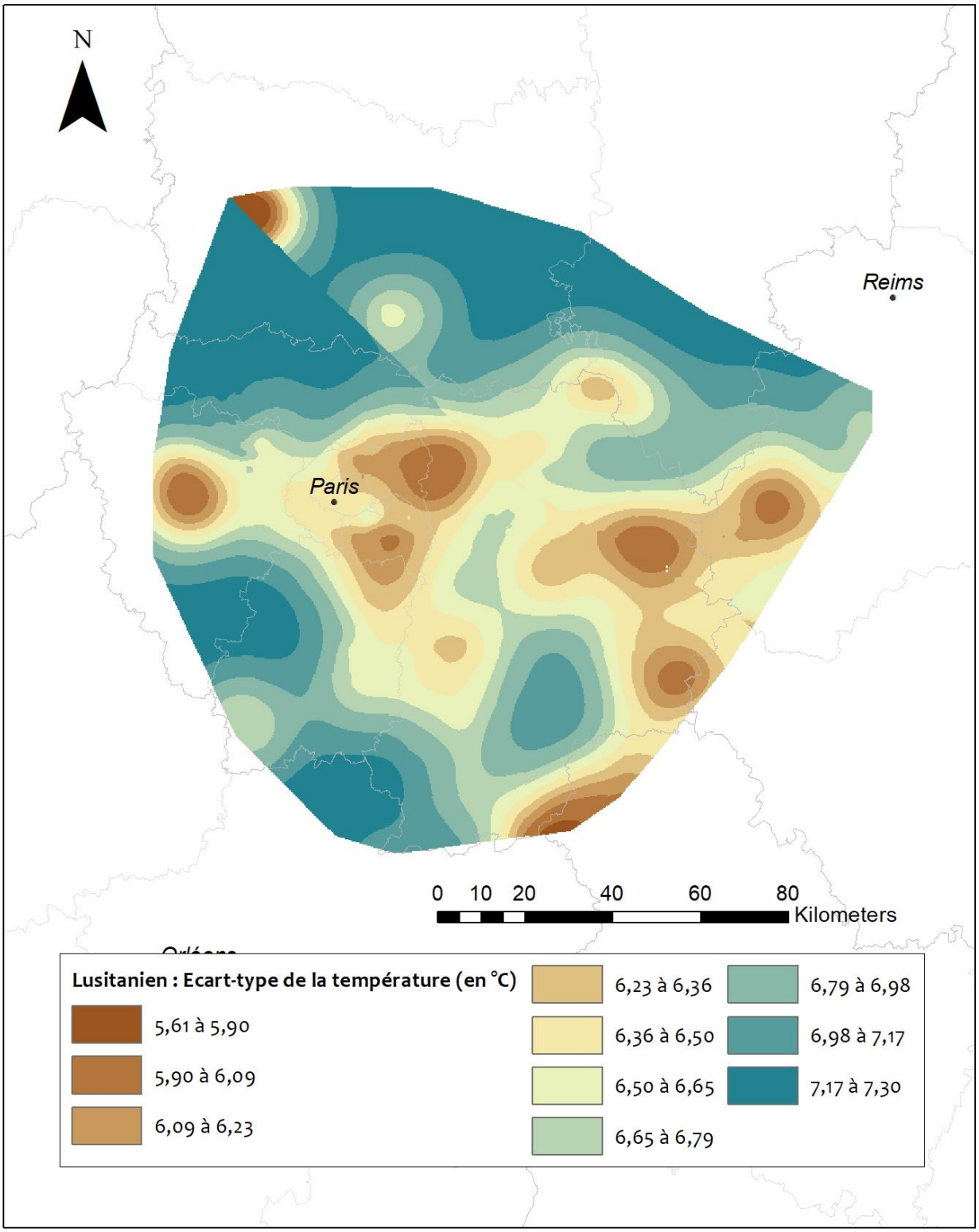

N
Le Havre
Reims
Paris
Orléans
Tours
Dijon
0 15 30 60 90 120
Kilometers
Néocomien : Température du réservoir (en °C)
11 à 13,5
13,5 à 16
16 à 18,5
18,5 à 21
21 à 23,5
23,5 à 26
26 à 28,5
28,5 à 31
31 à 33,5
33,5 à 36
36 à 38,5
38,5 à 41
41 à 43,5
43,5 à 46

Annexe 1.c
Cartes des propriétés du Lusitanien du Bassin parisien d'après Caritg *et al.*, 2014

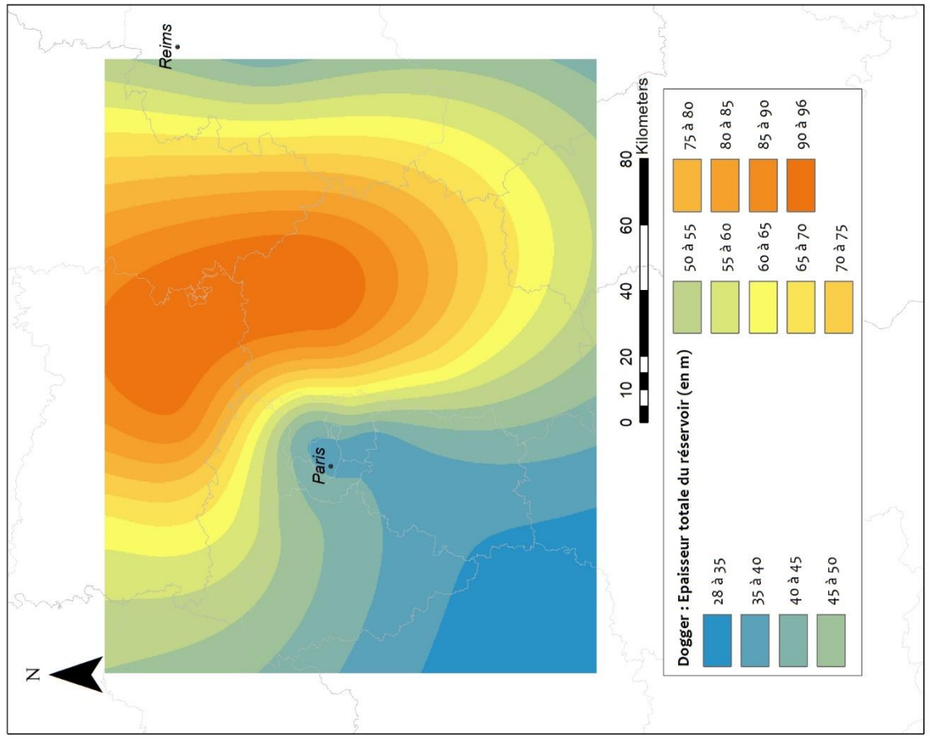


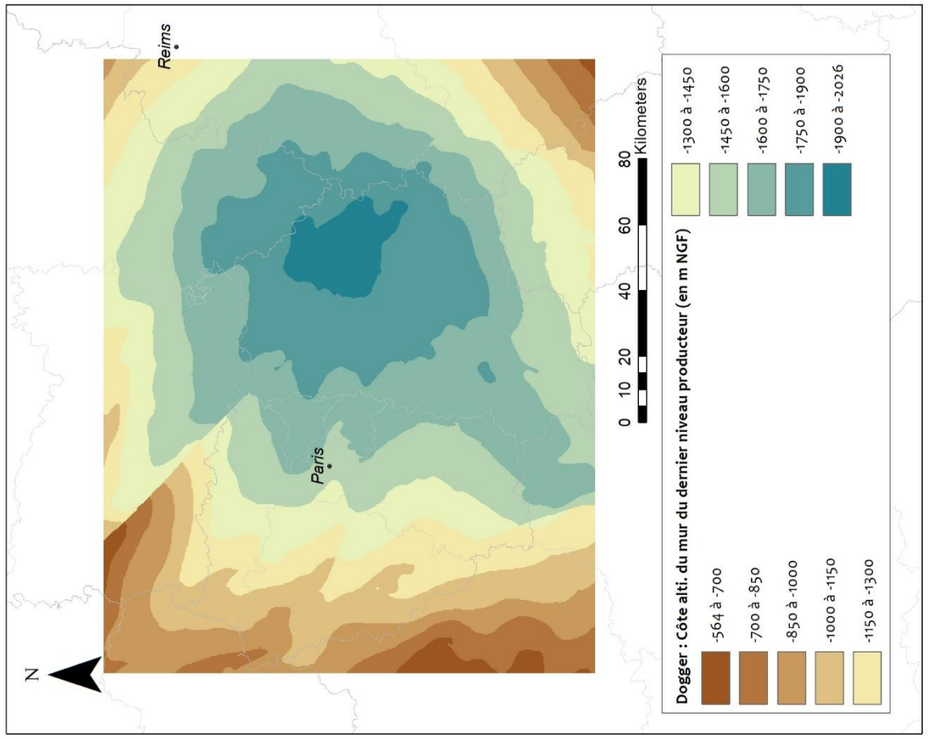

N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80
Kilometers
Lusitanien : Epaisseur totale du réservoir (en m)
350 à 376
325 à 350
300 à 325
275 à 300
250 à 275
225 à 250
200 à 225
175 à 200
150 à 175
118 à 150

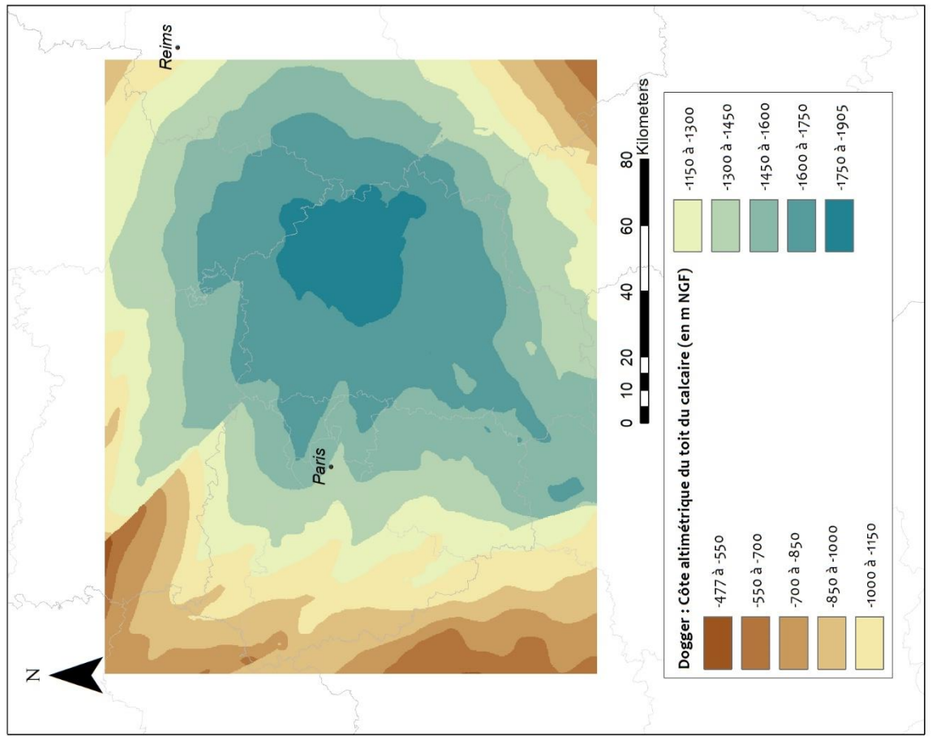

N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80
Kilometers
Lusitanien : Température au toit du réservoir (en °C)
22 à 26
26 à 30
30 à 34
34 à 38
38 à 42
42 à 46
46 à 50
50 à 54
54 à 58
58 à 62
62 à 66
66 à 68

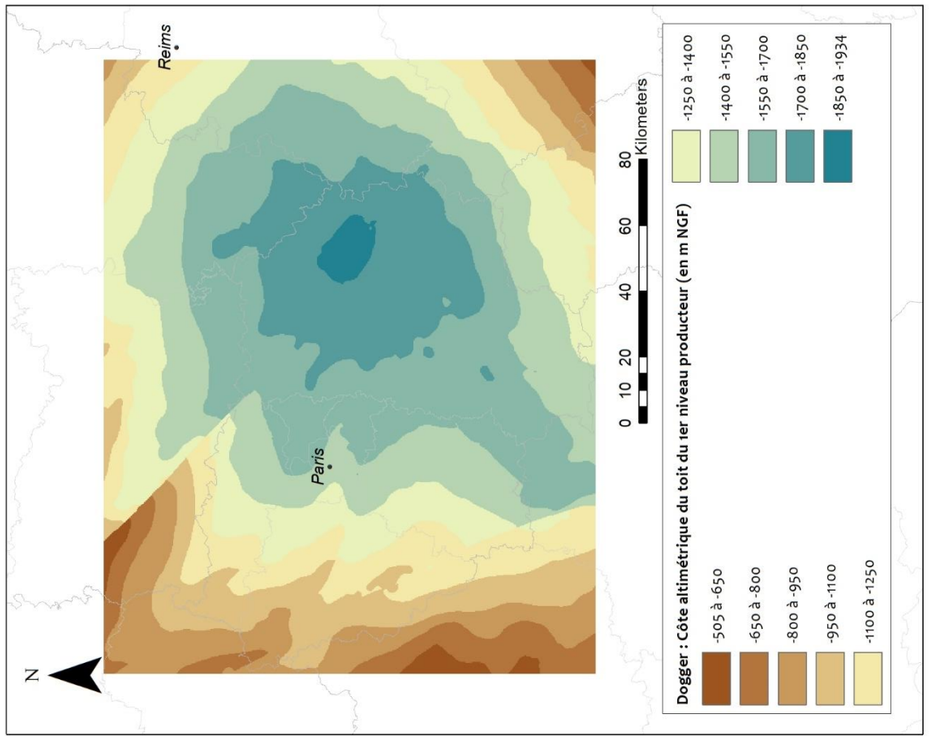

N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80
Kilometers
Lusitanien : Ecart-type de la température (en °C)
5,61 à 5,90
5,90 à 6,09
6,09 à 6,23
6,23 à 6,36
6,36 à 6,50
6,50 à 6,65
6,65 à 6,79
6,79 à 6,98
6,98 à 7,17
7,17 à 7,30

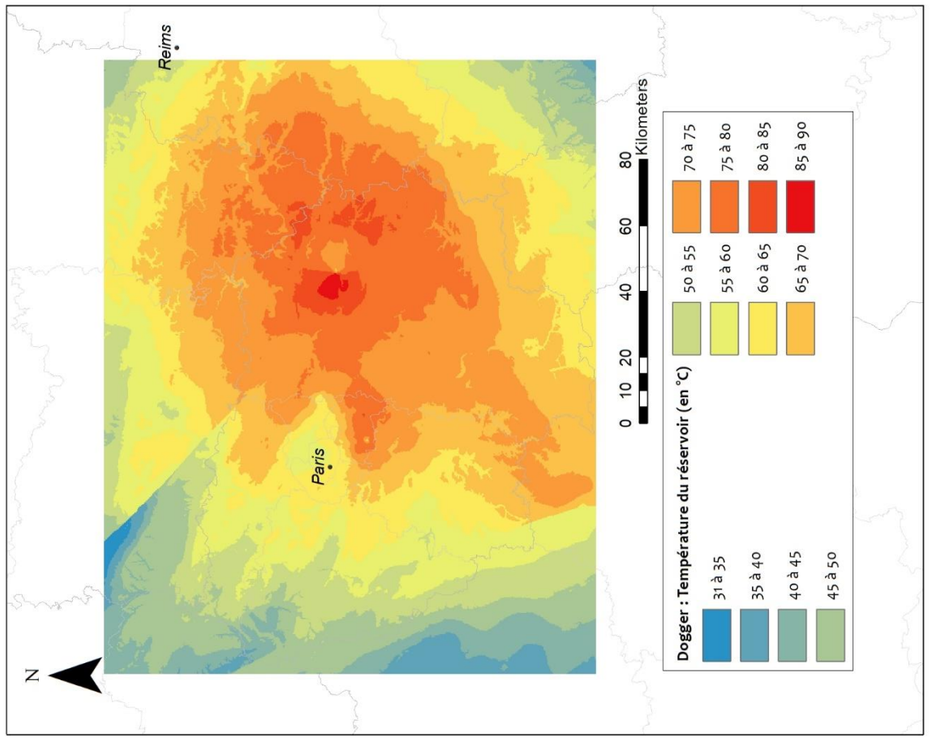
Annexe 1.d
Cartes des propriétés du Dogger du Bassin parisien d'après Hamm *et al.*, 2017

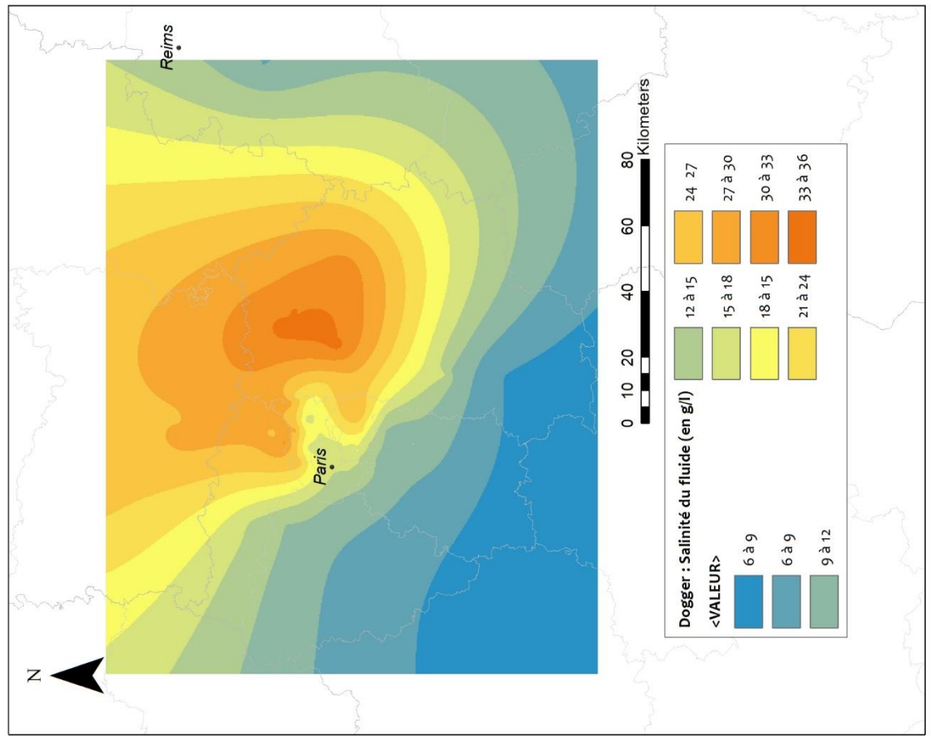


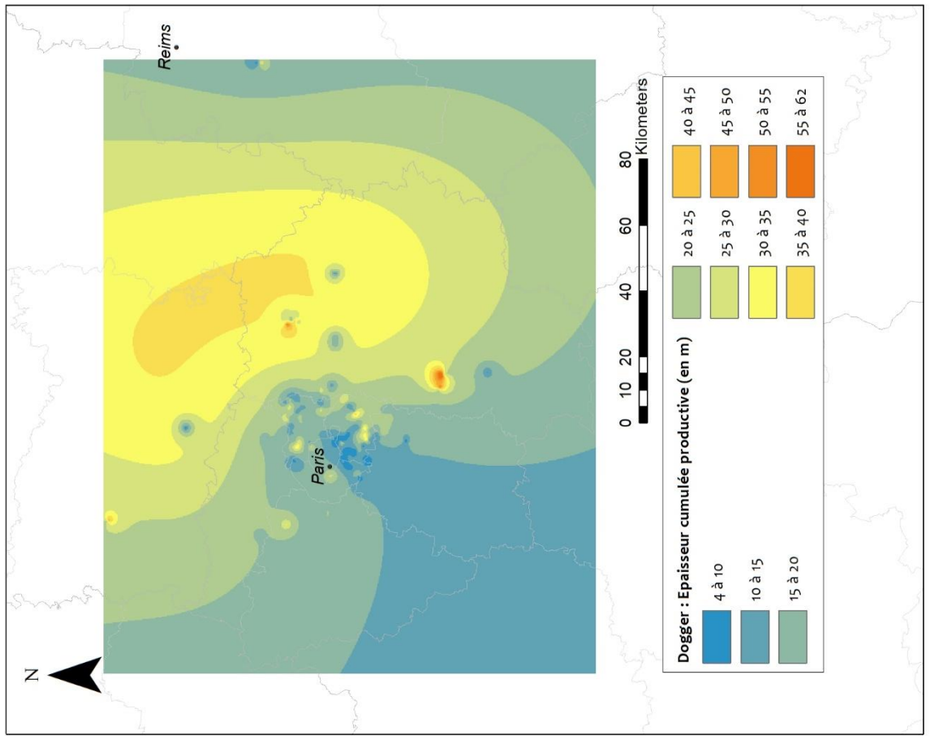


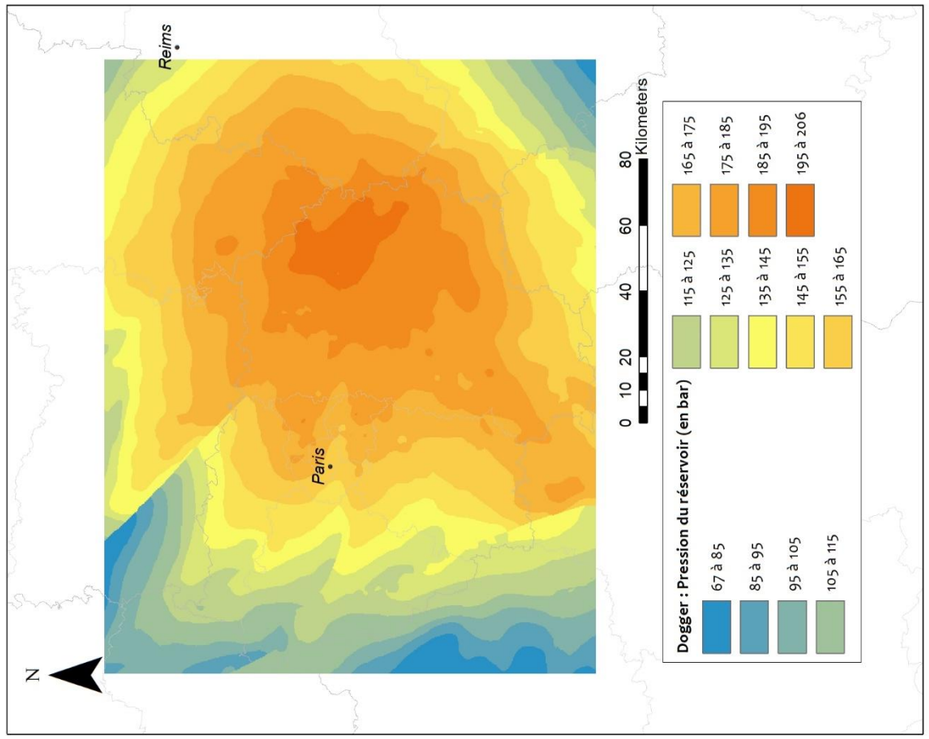


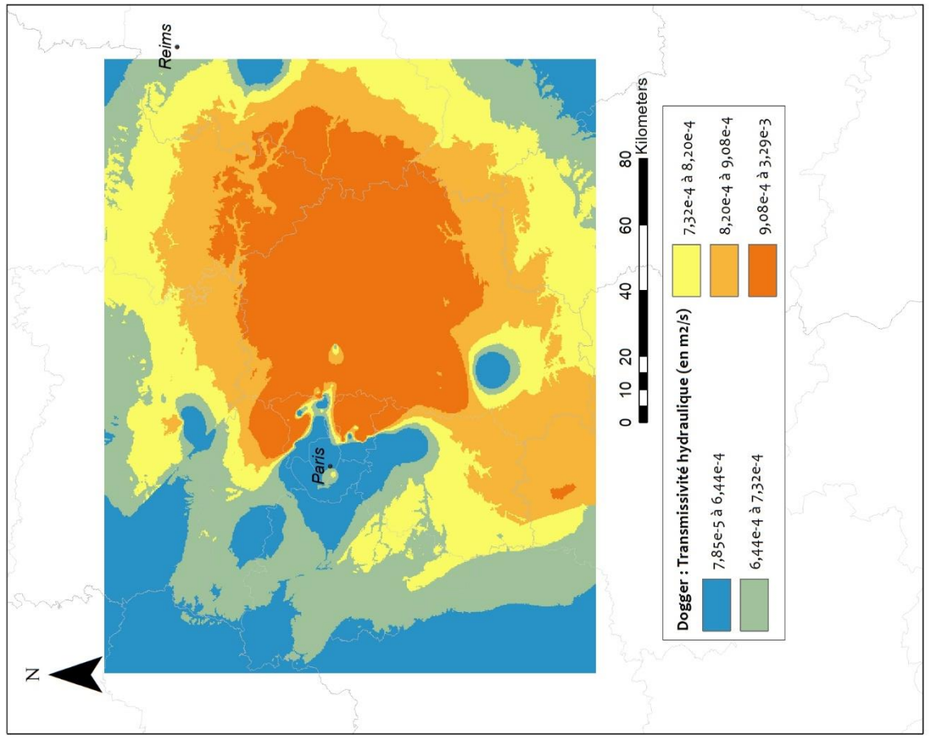


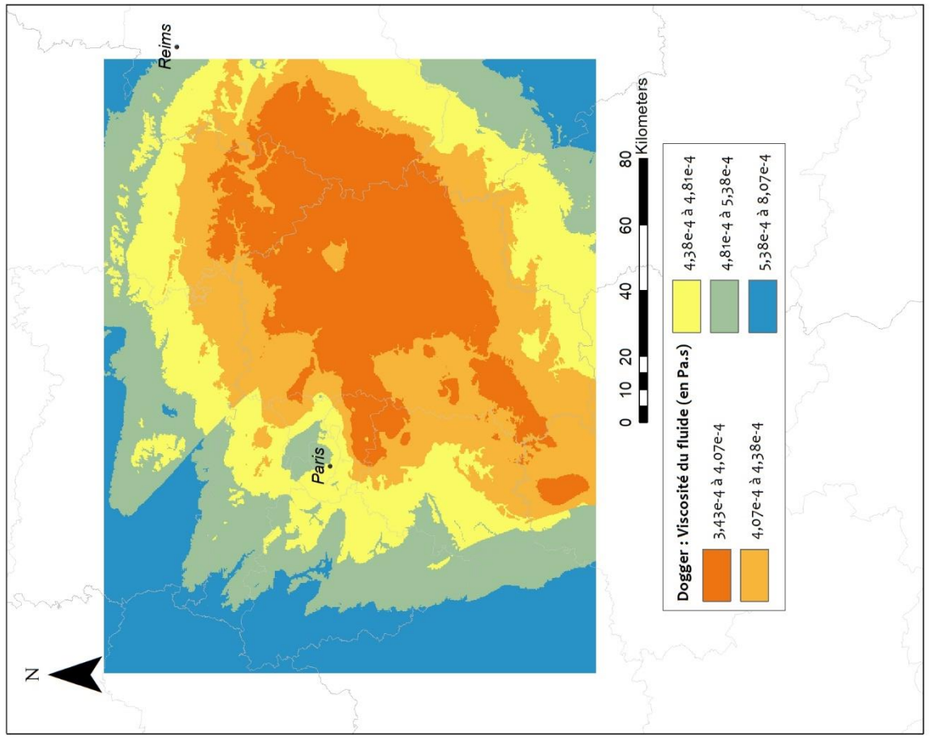

N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80 Kilometers
Dogger : Température du réservoir (en °C)
31 à 35
35 à 40
40 à 45
45 à 50
50 à 55
55 à 60
60 à 65
65 à 70
70 à 75
75 à 80
80 à 85
85 à 90

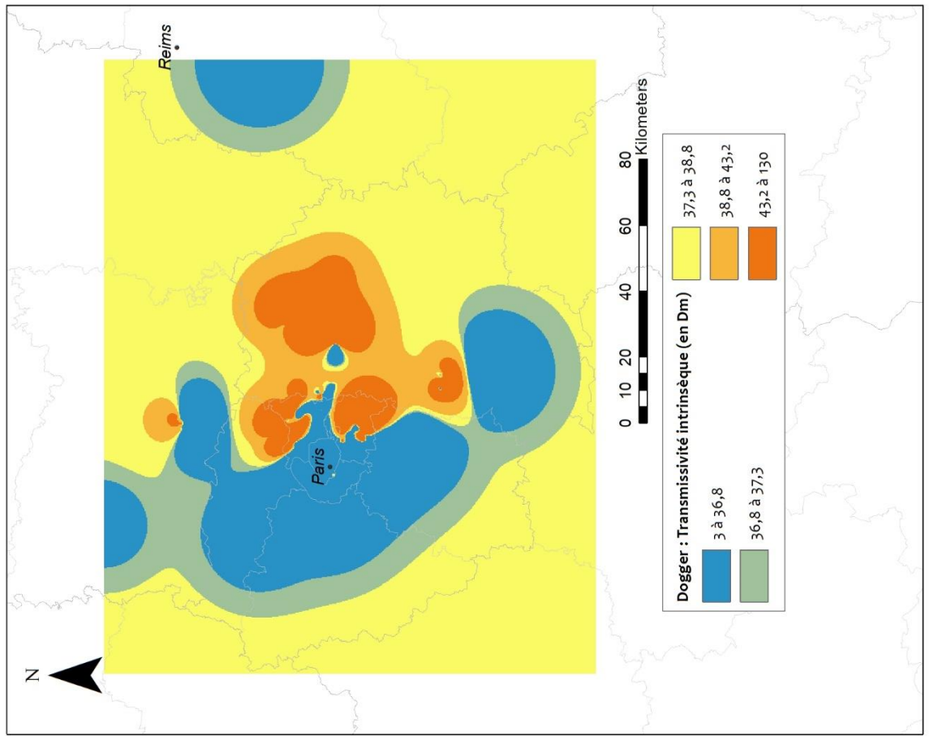

N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80 Kilometers
Dogger : Salinité du fluide (en g/l)
<VALEUR>
6 à 9
6 à 9
9 à 12
12 à 15
15 à 18
18 à 15
21 à 24
24 27
27 à 30
30 à 33
33 à 36

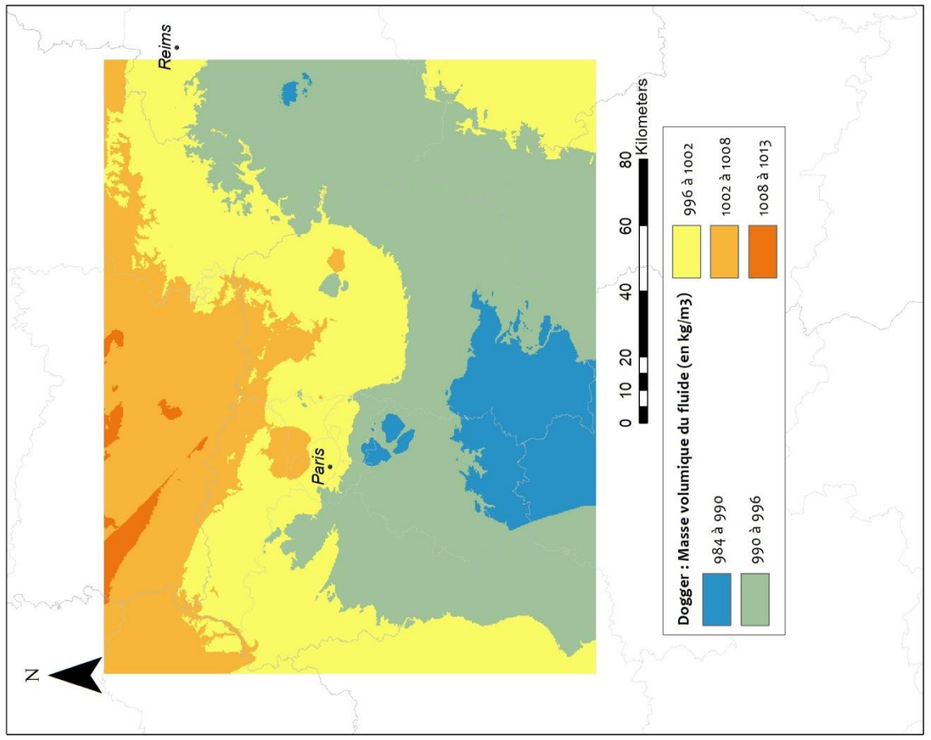

N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80 Kilometers
Dogger : Epaisseur cumulée productive (en m)
4 à 10
10 à 15
15 à 20
20 à 25
25 à 30
30 à 35
35 à 40
40 à 45
45 à 50
50 à 55
55 à 62

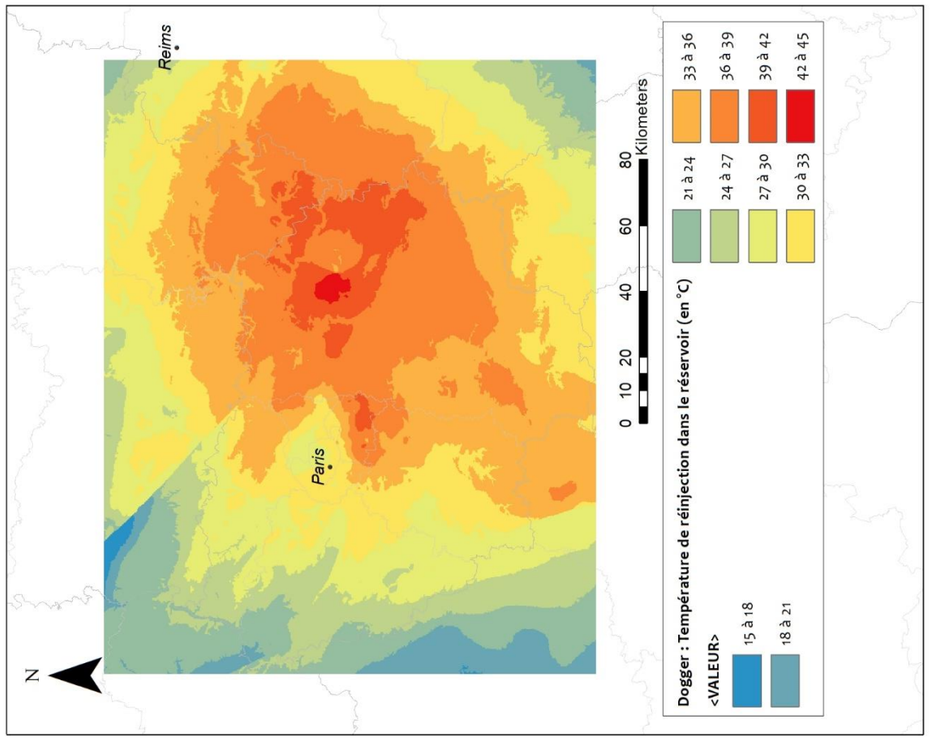

N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80 Kilometers
Dogger : Pression du réservoir (en bar)
67 à 85
85 à 95
95 à 105
105 à 115
115 à 125
125 à 135
135 à 145
145 à 155
155 à 165
165 à 175
175 à 185
185 à 195
195 à 206

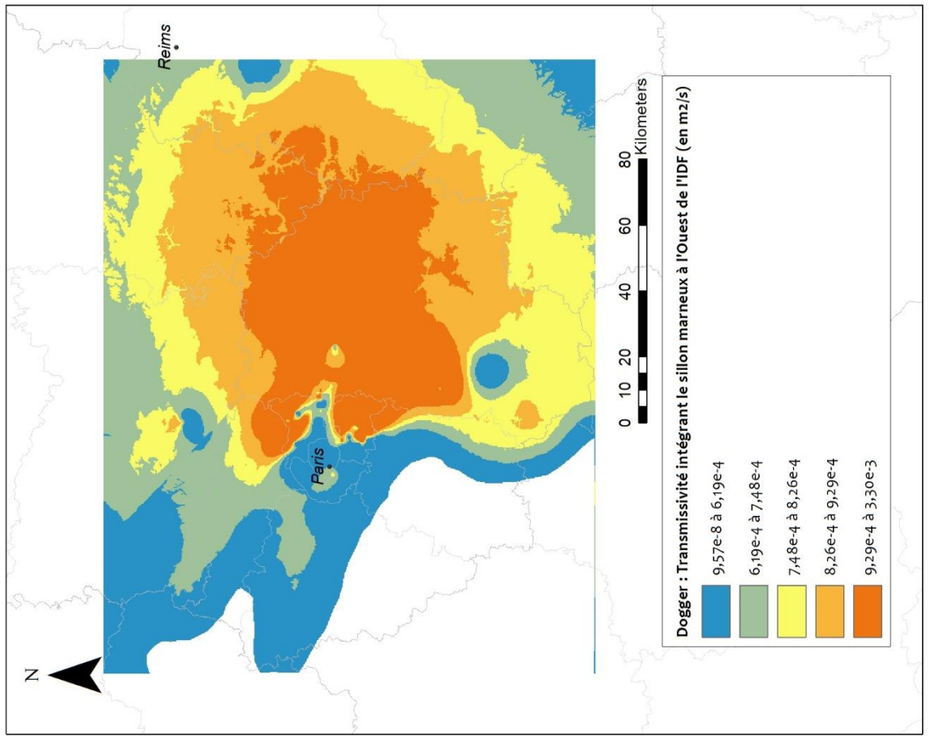

N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80 Kilometers
Dogger : Transmissivité hydraulique (en m2/s)
7,85e-5 à 6,44e-4
6,44e-4 à 7,32e-4
7,32e-4 à 8,20e-4
8,20e-4 à 9,08e-4
9,08e-4 à 3,29e-3


N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80 Kilometers
Dogger : Viscosité du fluide (en Pa.s)
3,43e-4 à 4,07e-4
4,07e-4 à 4,38e-4
4,38e-4 à 4,81e-4
4,81e-4 à 5,38e-4
5,38e-4 à 8,07e-4


N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80 Kilometers
Dogger : Transmissivité intrinsèque (en Dm)
3 à 36,8
36,8 à 37,3
37,3 à 38,8
38,8 à 43,2
43,2 à 130


N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80 Kilometers
Dogger : Masse volumique du fluide (en kg/m3)
984 à 990
990 à 996
996 à 1002
1002 à 1008
1008 à 1013

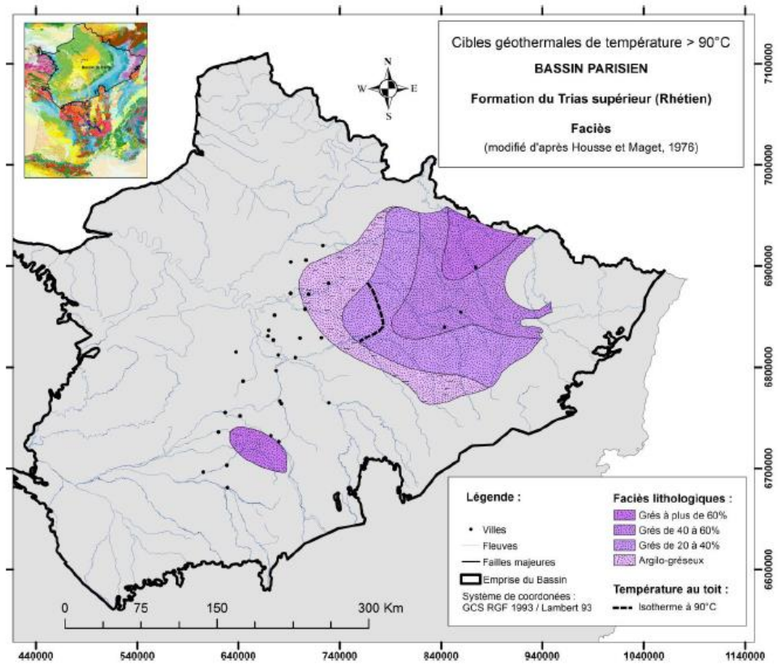

N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80 Kilometers
Dogger : Température de réinjection dans le réservoir (en °C)
<VALEUR>
15 à 18
18 à 21
21 à 24
24 à 27
27 à 30
30 à 33
33 à 36
36 à 39
39 à 42
42 à 45

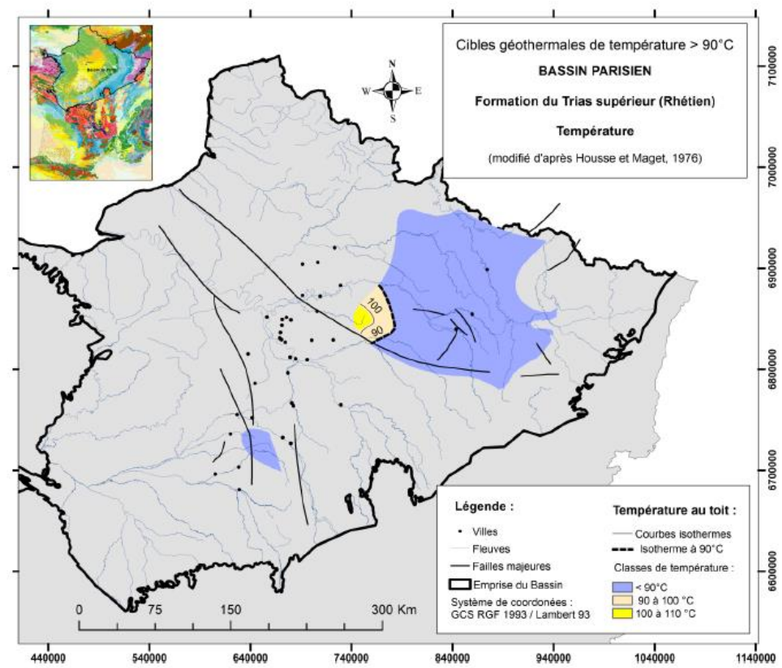

N
Reims
Paris
0 10 20 40 60 80 Kilometers
Dogger : Transmissivité intégrant le sillon marneux à l'Ouest de l'IDF (en m2/s)
9,57e-8 à 6,19e-4
6,19e-4 à 7,48e-4
7,48e-4 à 8,26e-4
8,26e-4 à 9,29e-4
9,29e-4 à 3,30e-3

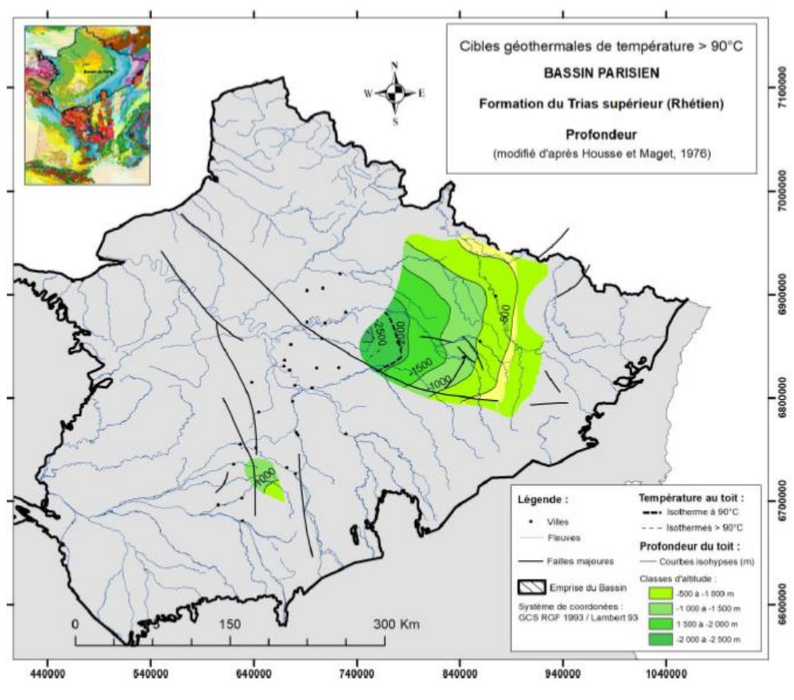
Annexe 2

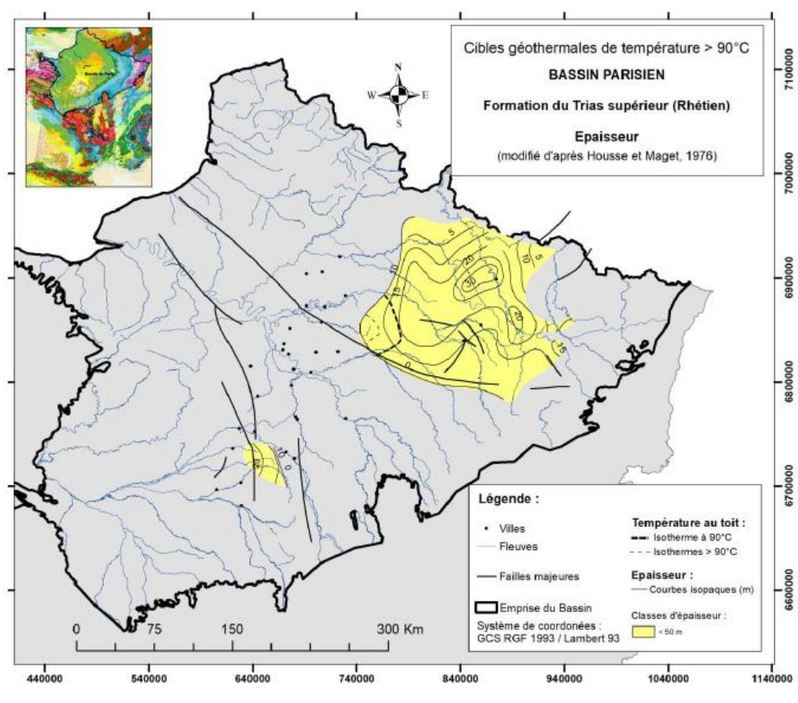
Cartographie des ressources géothermales de moyenne température du Bassin parisien d'après Caritg, 2018

Cartes des faciès, températures, profondeurs et épaisseurs du Trias supérieur – Rhétien (Caritg *et al.*, 2018; Housse *et al.*, 1976)

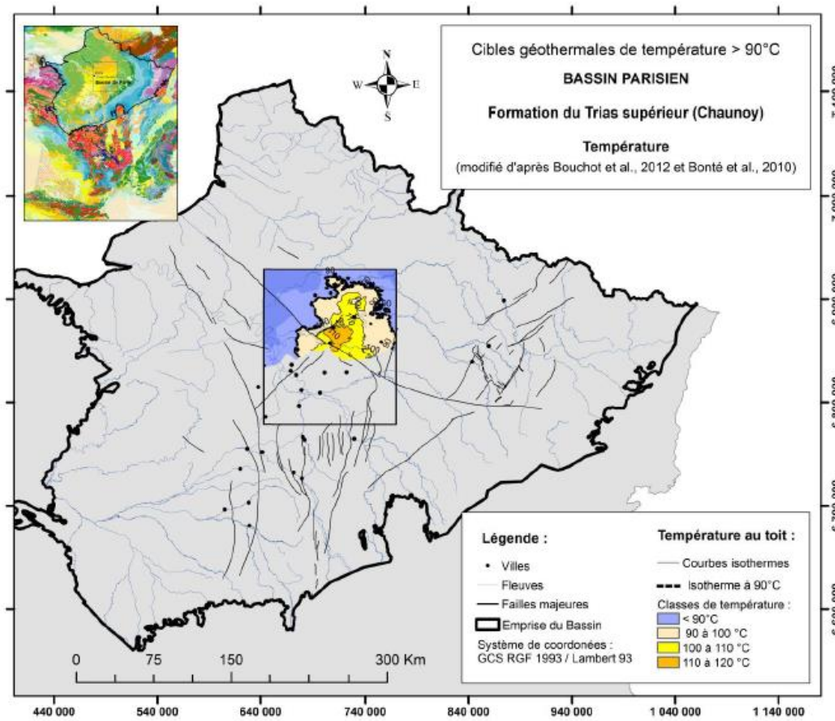


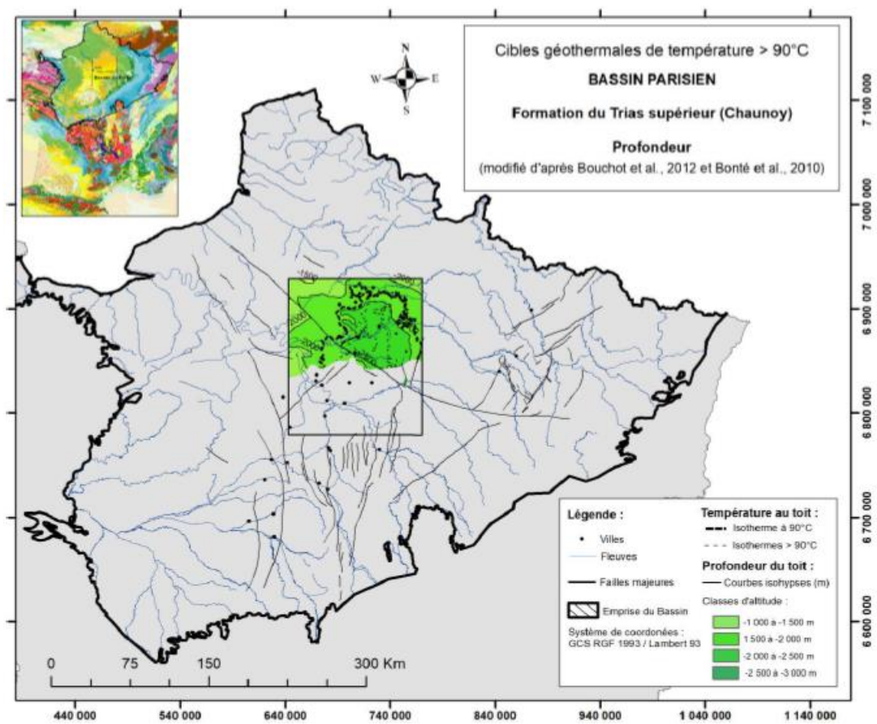


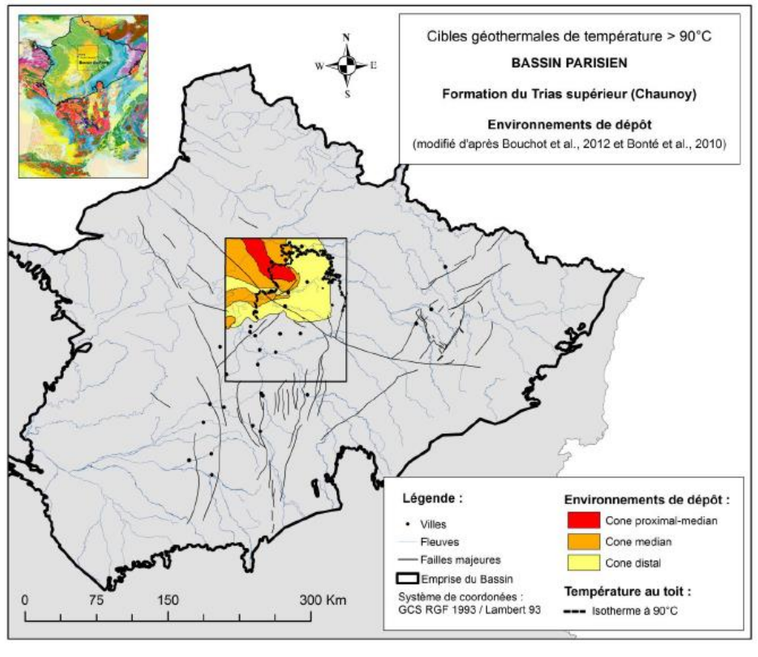




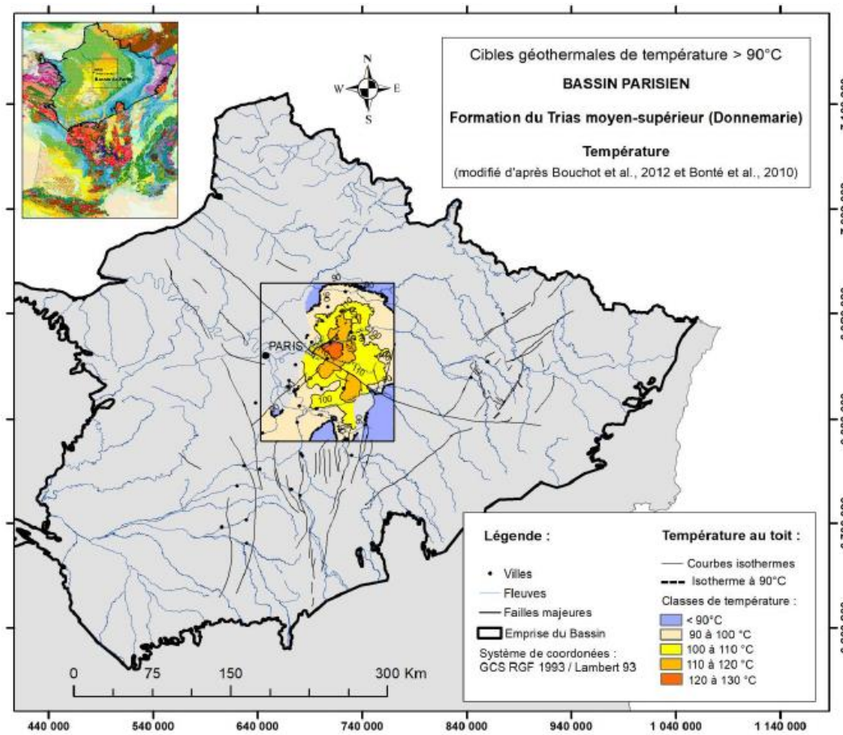
Cartes des faciès, températures et profondeurs du Trias supérieur : Chaunoy (Bonté *et al.*, 2010; Bouchot *et al.*, 2012; Caritg *et al.*, 2018)

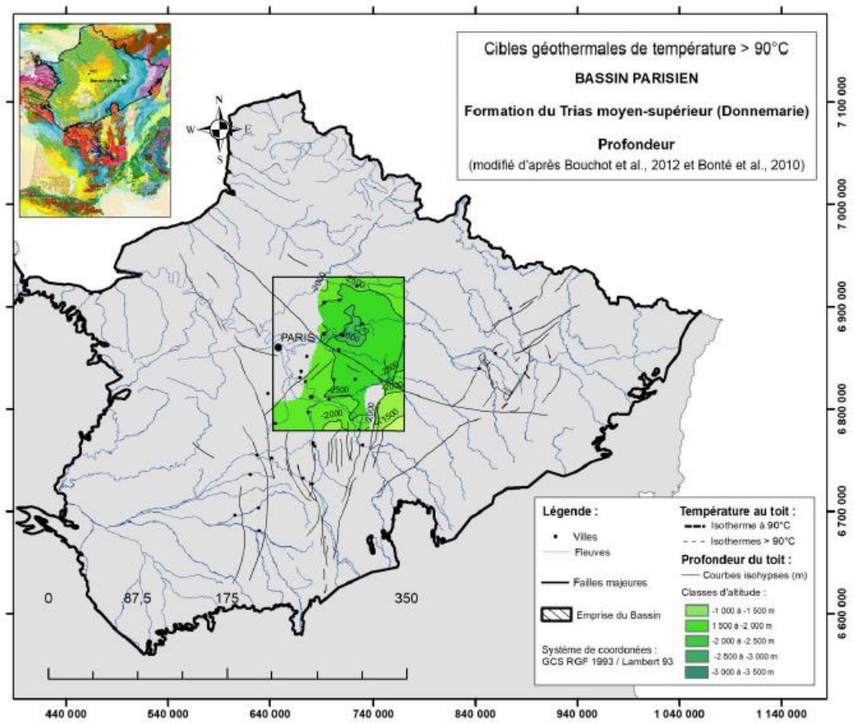


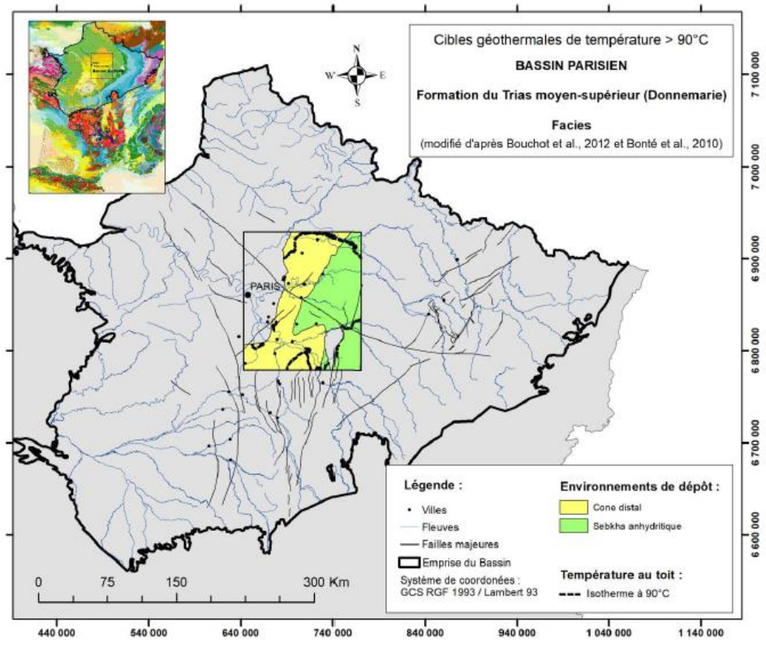




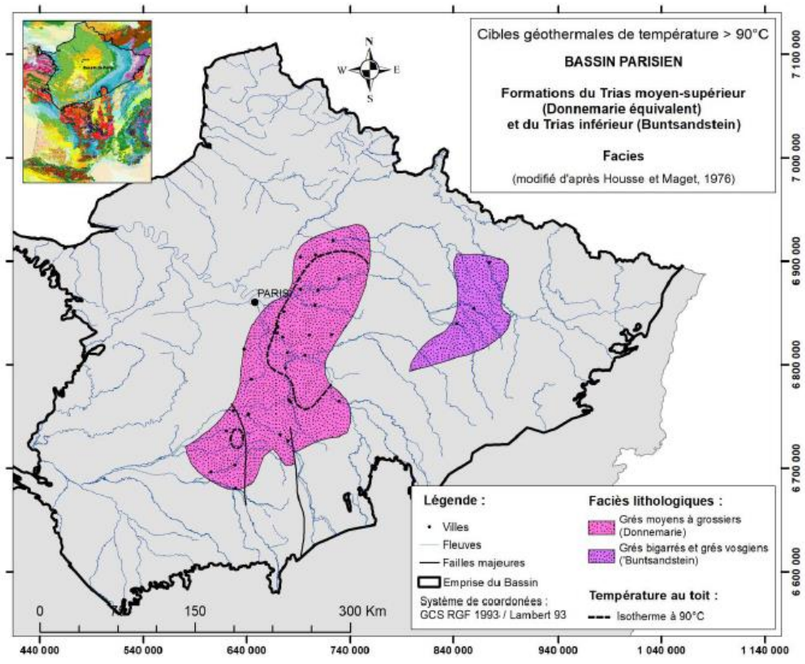
Cartes des faciès, températures et profondeurs du Trias supérieur – Donnemarie (Bonté *et al.*, 2010; Bouchot *et al.*, 2012; Caritg *et al.*, 2018)

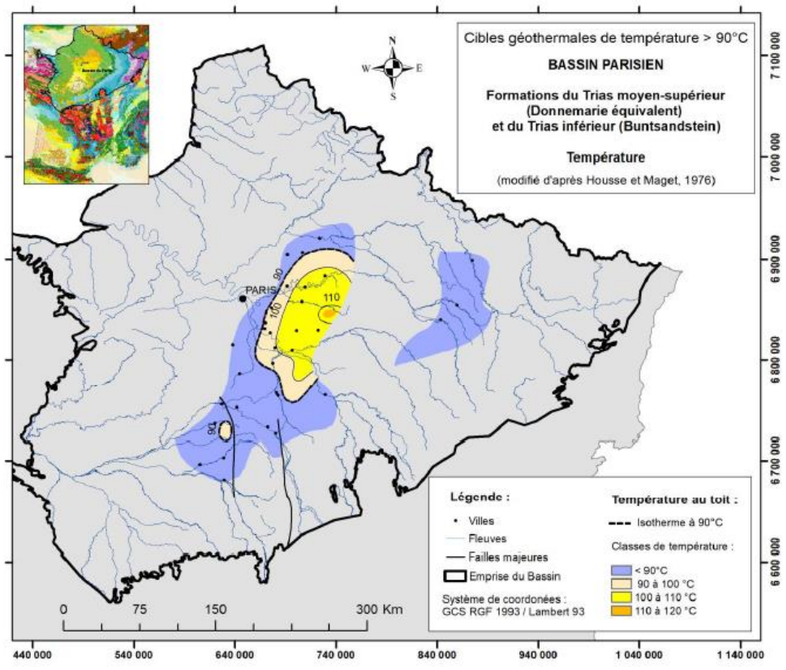


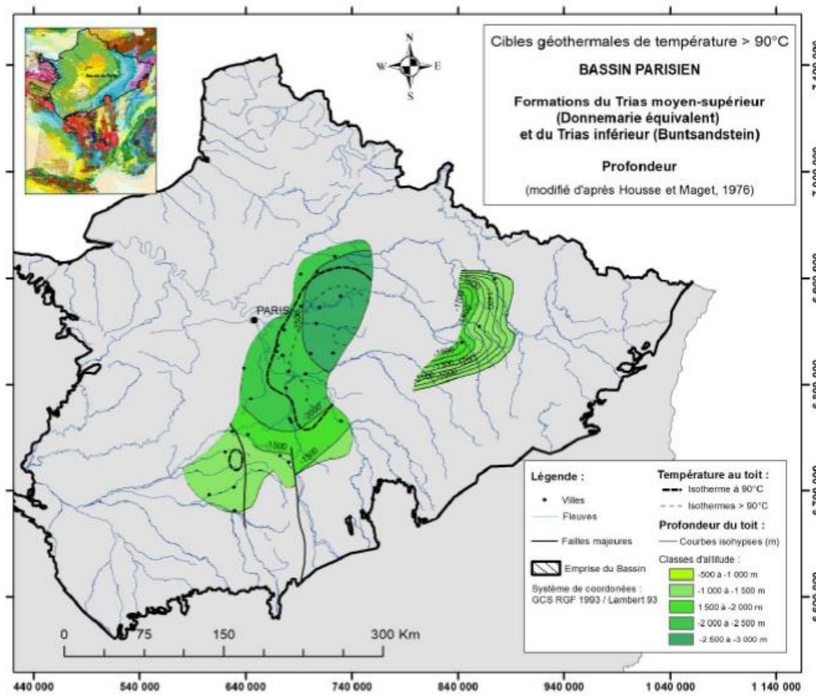


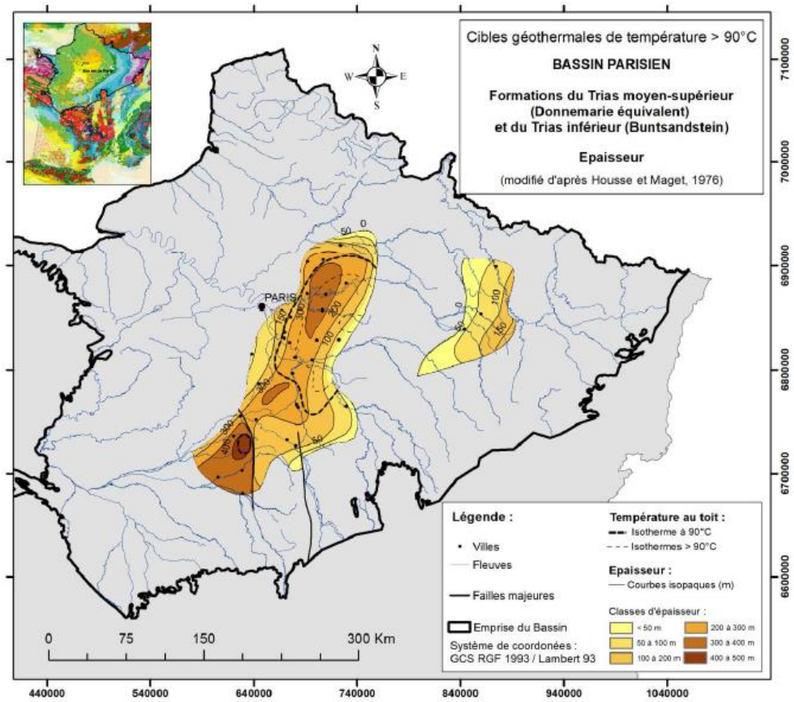


Cartes des faciès, températures, profondeurs et épaisseurs du Trias moyen supérieur : Donnemarie équivalent (à l'ouest) et du Trias inférieur (à l'est) : Buntsandstein (Caritg et al., 2018; Housse et al., 1976)

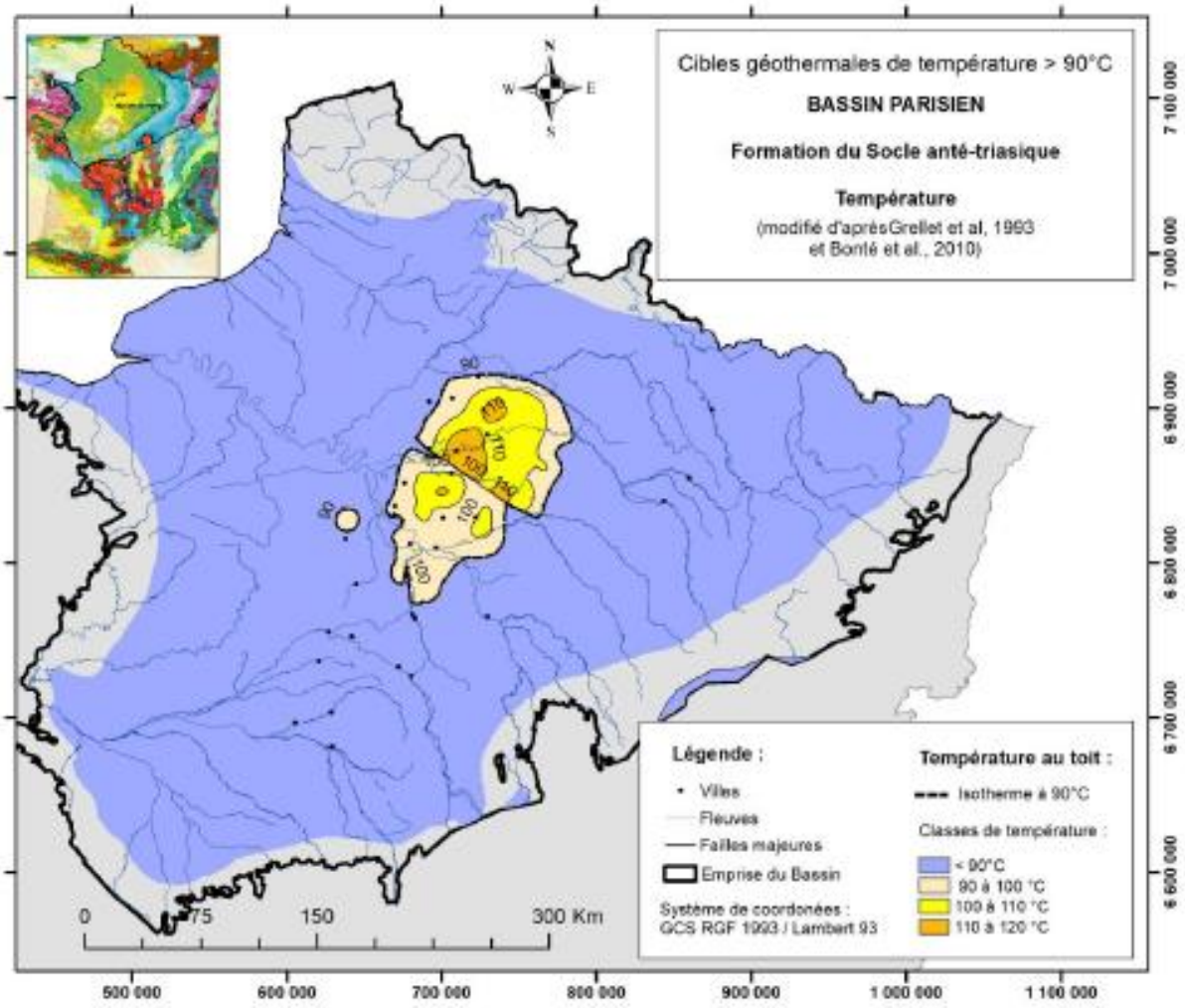








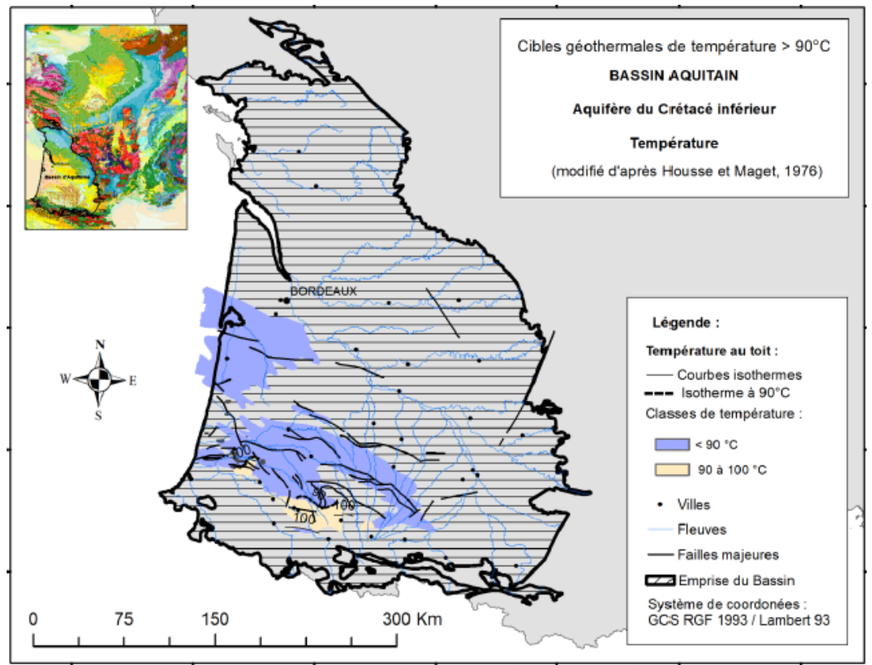
Cartes des températures à l'interface du socle antétriasique du Bassin parisien d'après Grellet *et al.* 1993 et Bonté *et al.* 2010

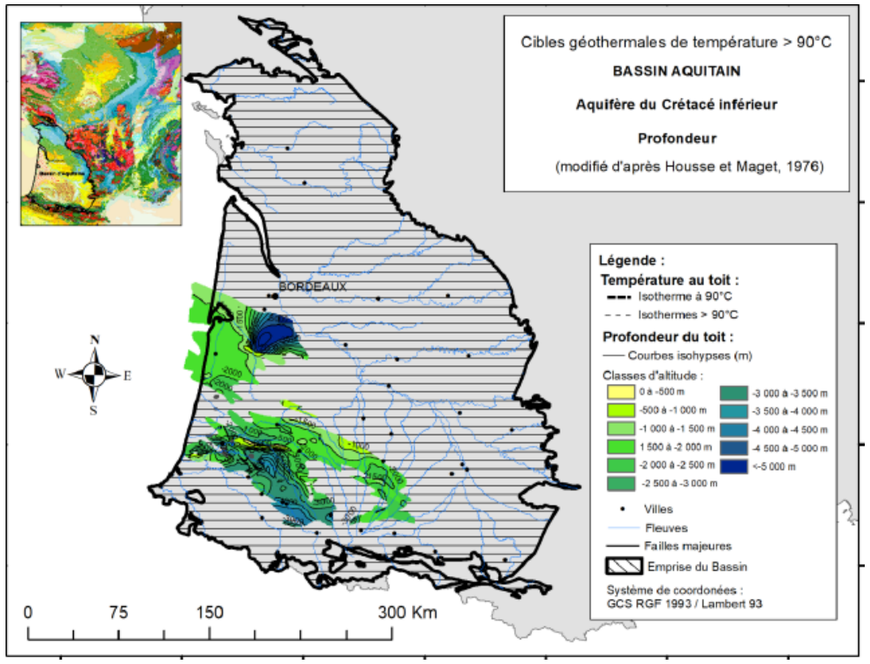


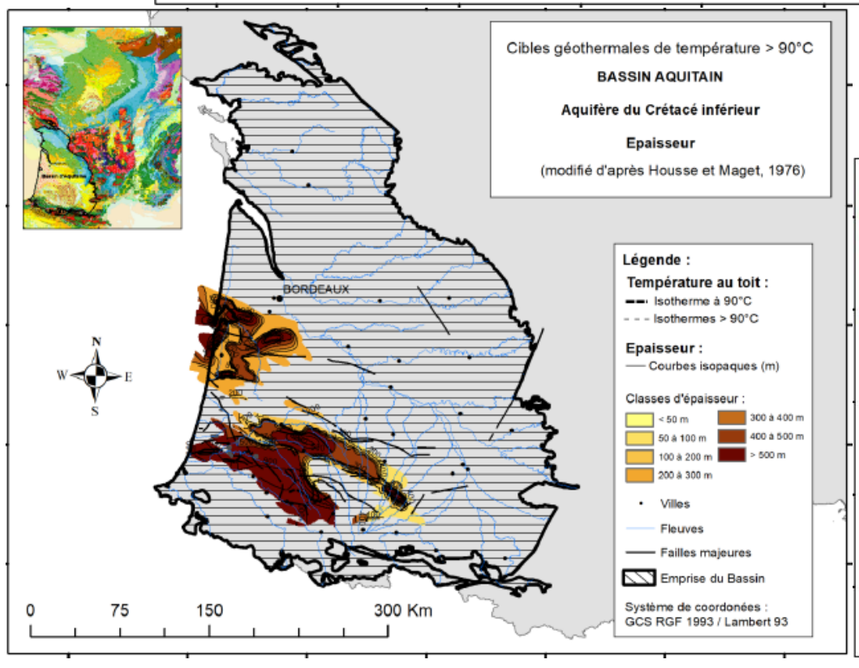
Annexe 3

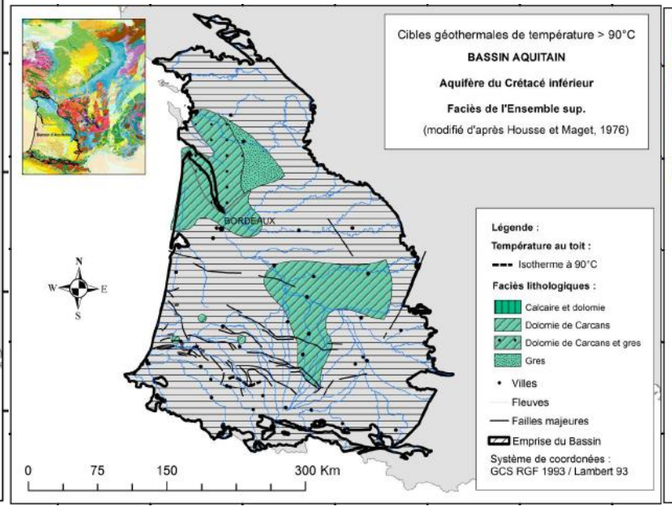
Cartographie des ressources géothermales de moyenne température du Bassin aquitain d'après Caritg, 2018

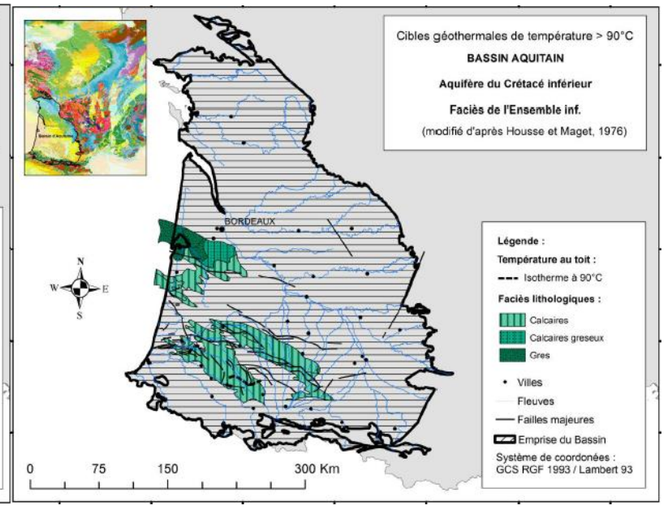
Cartes des températures, des profondeurs, des épaisseurs et faciès du Crétacé inférieur du Bassin aquitain d'après Caritg *et al.*, 2018; Housse *et al.*, 1977



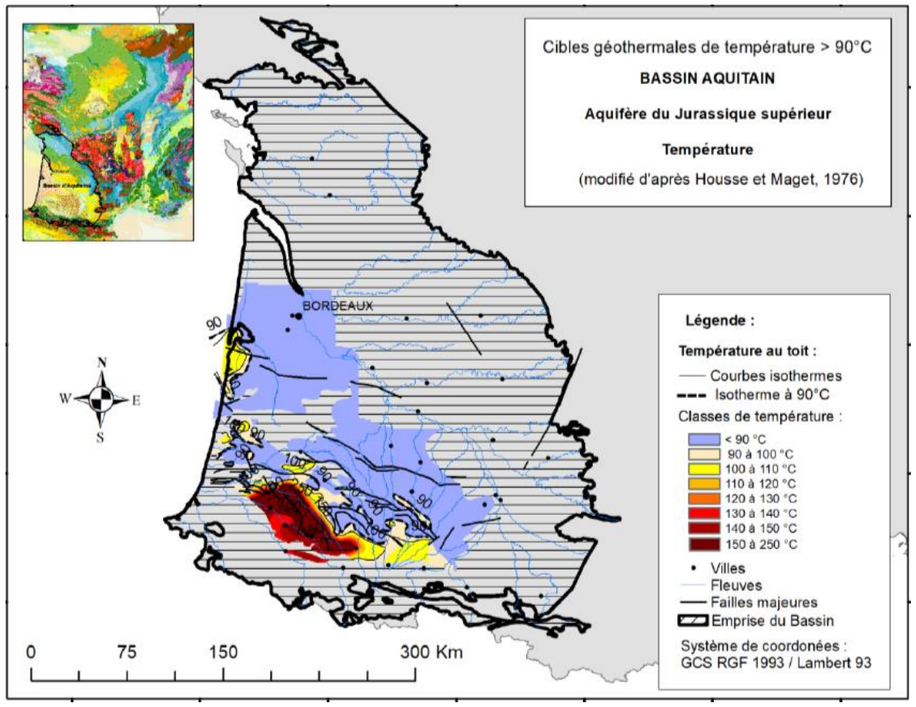


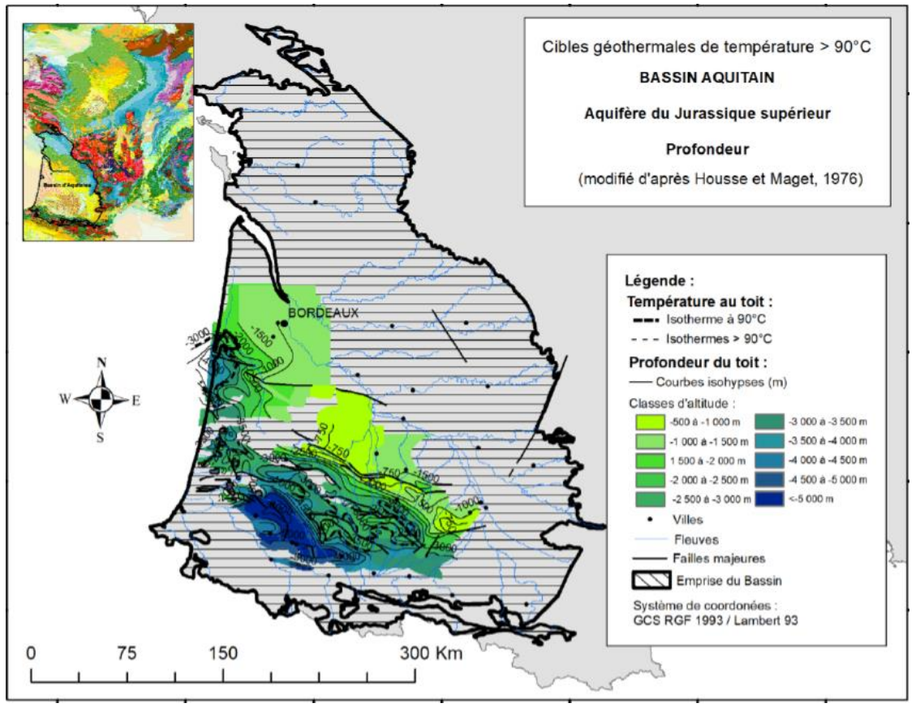


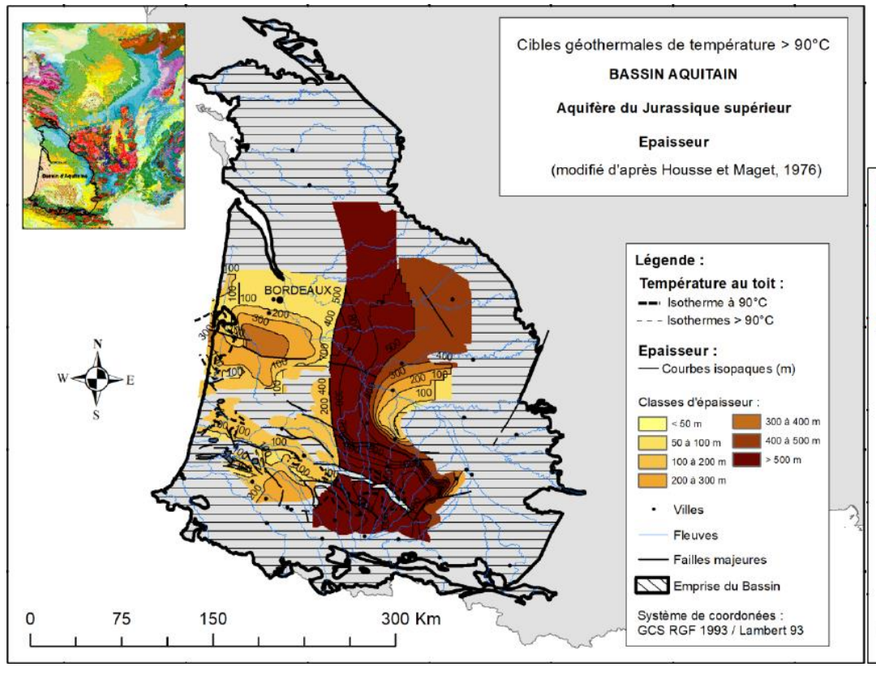


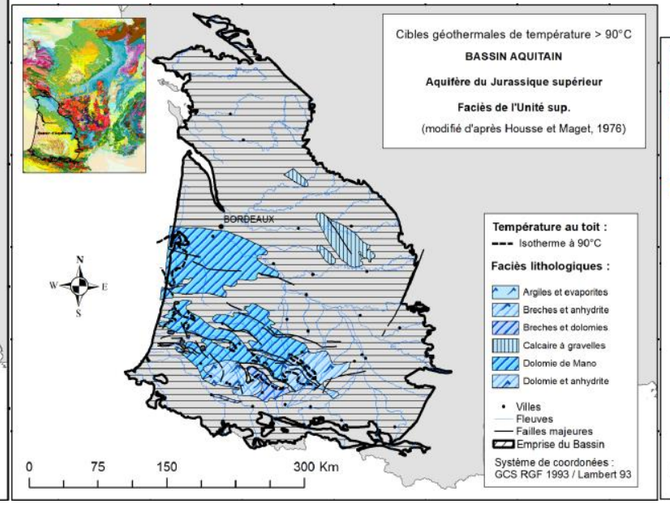


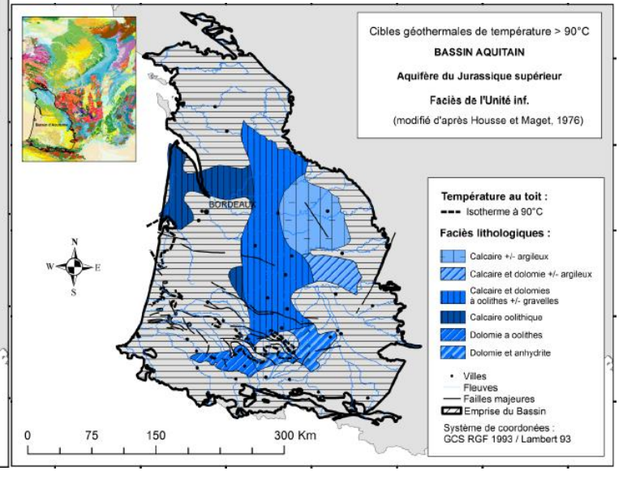
Cartes des températures, des profondeurs, des épaisseurs et faciès du Jurassique supérieur du Bassin aquitain d'après Caritg *et al.*, 2018; Housse *et al.*, 1977



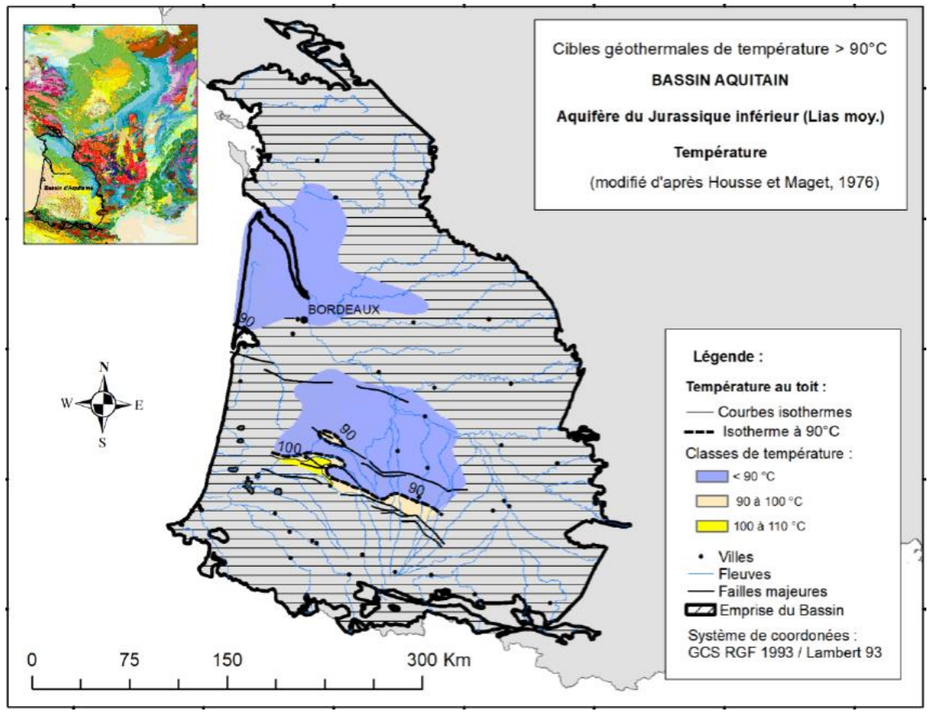


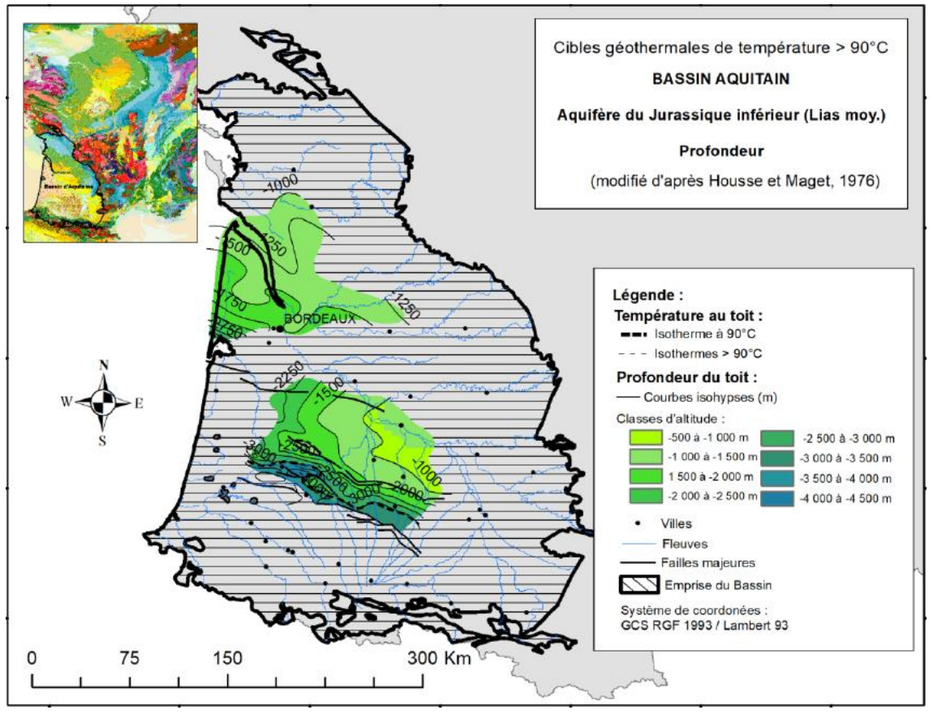


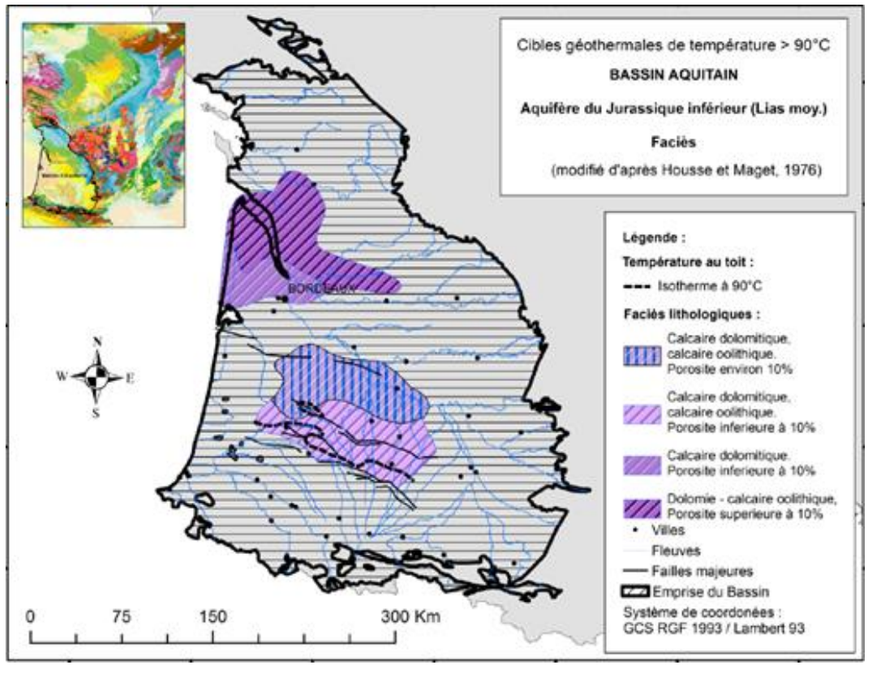




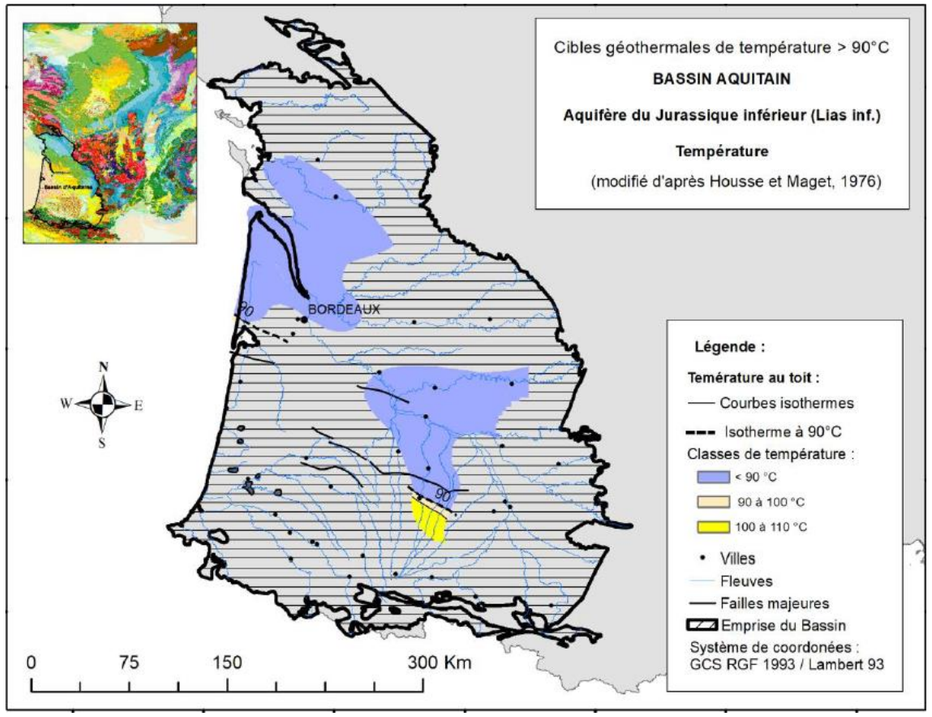
Cartes des températures, des profondeurs, et faciès du Jurassique inférieur - Lias supérieur du Bassin aquitain d'après *Caritg et al., 2018; Housse et al., 1977*

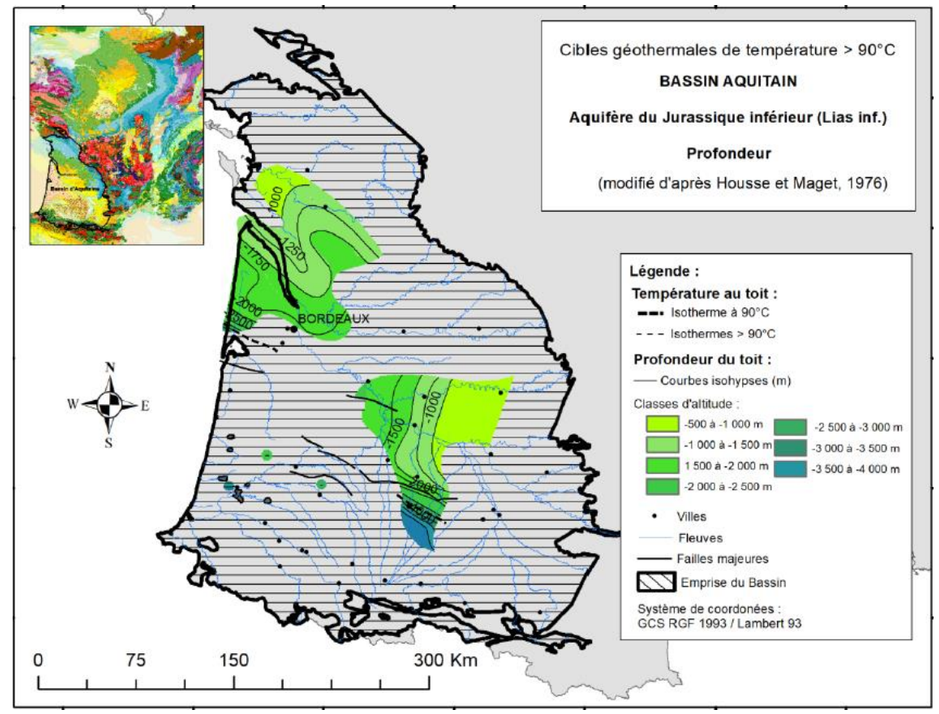


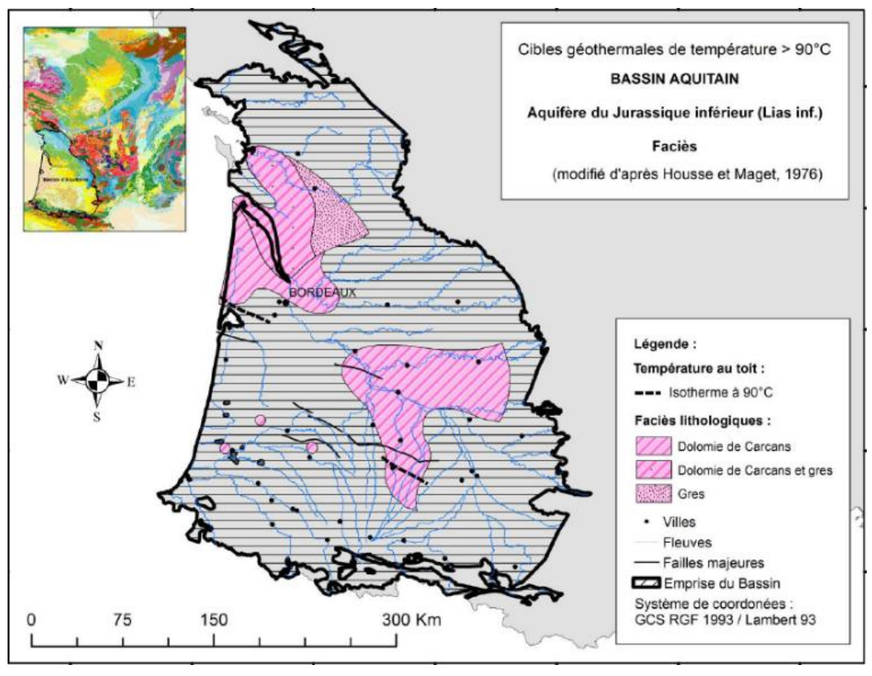




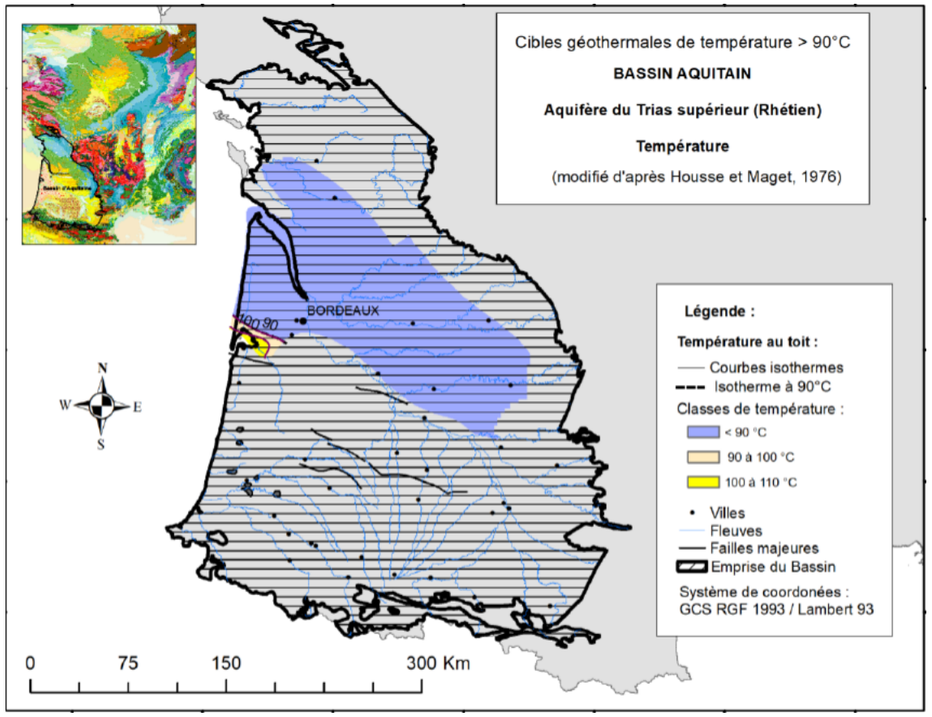
Cartes des températures, des profondeurs, et faciès du Jurassique inférieur - Lias inférieur du Bassin aquitain d'après Caritg *et al.*, 2018; Housse *et al.*, 1977

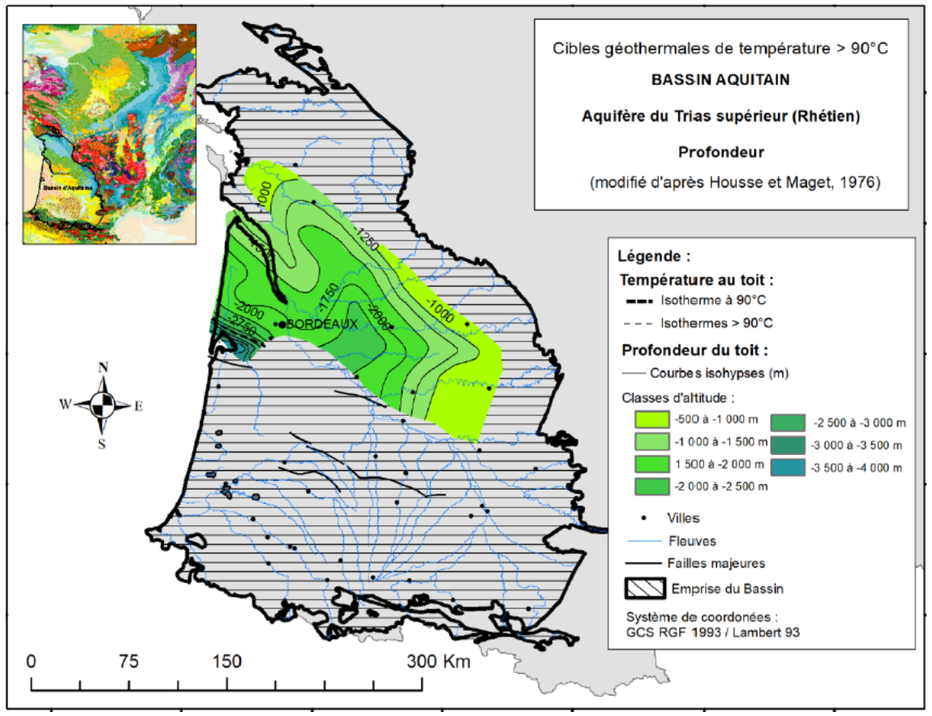


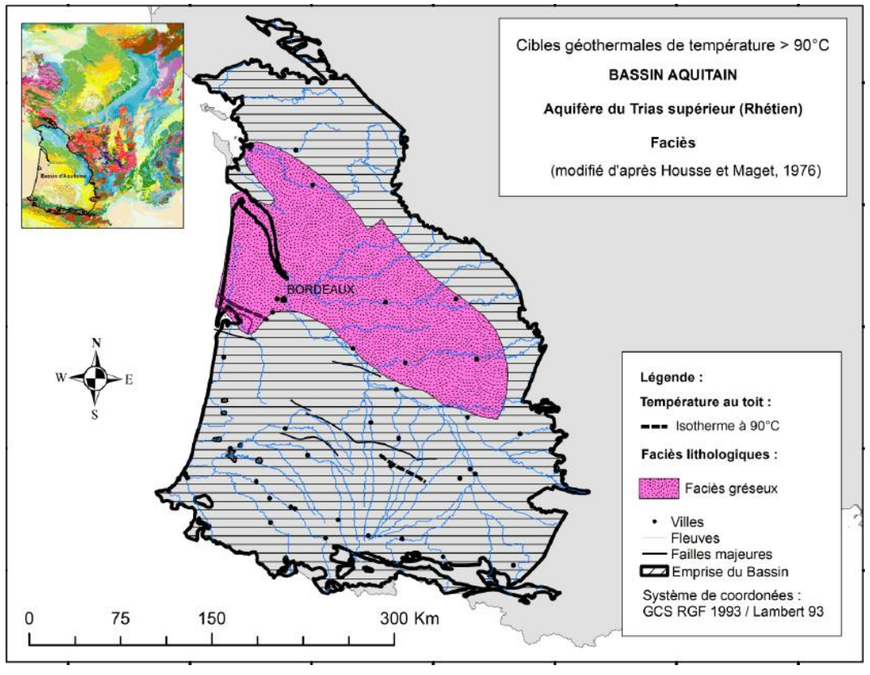




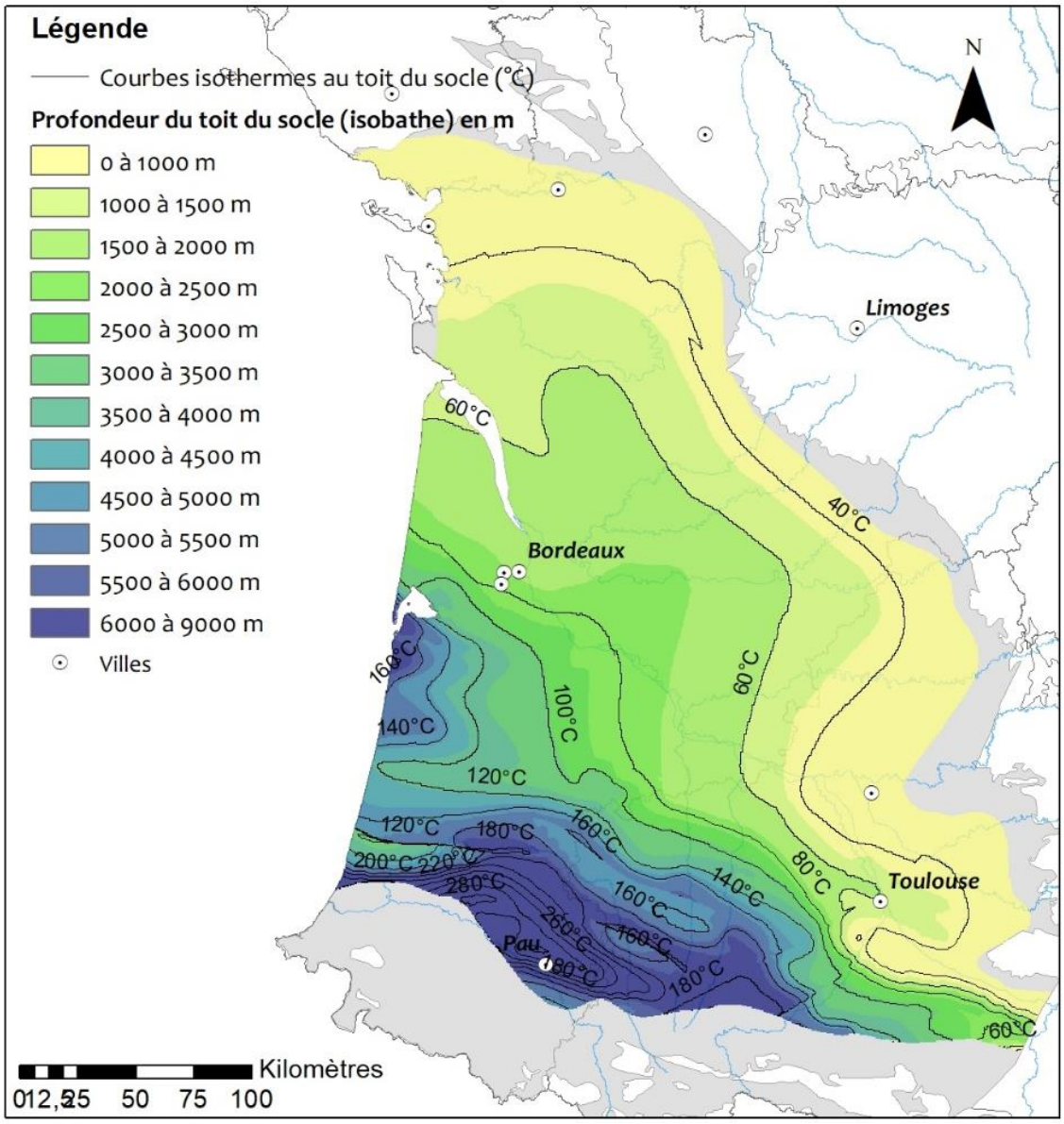
Cartes des températures, des profondeurs, et faciès du Trias supérieur (Rhétien) du Bassin aquitain d'après Caritg *et al.*, 2018; Housse *et al.*, 1977







Cartes des températures et des profondeurs du socle antétriassique du Bassin aquitain d'après Caritg *et al.*, 2018; Housse *et al.*, 1977



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr