



Document public

Réglolithe : état de la connaissance sur les formations géologiques de surface - 2014

Rapport d'avancement

BRGM/RP-65102-FR

Septembre 2015



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Réglolithe : état de la connaissance sur les formations géologiques de surface - 2014

Rapport d'avancement

BRGM/RP-65102-FR
Septembre 2015

C. Ricordel-Prognon, A. Bialkowski, A. Leynet, B. Tourlière

Vérificateur :

Nom : Bourguine Bernard

Date : 17/08/2015



Approbateur :

Nom : Didier Bonijoly

Date : 18/09/2015

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots clés : Régolithe, France, Modélisation.

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

Ricordel-Prognon C., Bialkowski A., Leynet A., Tourlière B. (2015) – Régolithe : état des connaissances sur les formations géologiques de surface – 2014. Rapport d'avancement. BRGM/RP-65102-FR. 39 p., 20 fig., 2 tab.

Synthèse

L'objectif du projet Régolithe DAPP est de rechercher, regrouper ou acquérir des données et connaissances géologiques de référence sur les formations géologiques de surface. Les données issues des phases antérieures du projet ont été capitalisées et structurées. Ainsi, les couches enrichies depuis 2010 sont distribuées via le site InfoTerre:

- une couche correspondant à l'état des lieux en 2013 de la cartographie des formations allochtones au 1/1 000 000 ;
- une couche correspondant à l'état des lieux en 2013 de la cartographie des formations autochtones (altérites) au 1/1 000 000 ;
- une couche permettant d'accéder à l'ensemble des données issues des rapports publics concernant les formations du régolithe en France métropolitaine et dans les départements et collectivités d'Outre-mer ;
- une couche permettant d'accéder aux résultats des modèles d'épaisseur des formations de surface (cartographie des formations meubles).

En 2014, les travaux ont consisté en :

- la mise à jour de la couche concernant les rapports publics ;
- la réalisation du modèle d'épaisseur des formations meubles de Loire-Atlantique (6 800 km²) ; ceci dans le but de compléter la modélisation précédemment réalisée à l'échelle de la Bretagne (administrative) et de l'étendre à l'échelle du Massif Armoricaïn ;
- la réalisation du modèle d'épaisseur des formations alluviales de la Garonne (environ 11 000 km²) en se basant sur une nouvelle méthodologie de modélisation semi-automatique.

Ces travaux réalisés ont fait l'objet d'une communication lors d'un congrès géologique national (Bialkowski *et al.*, 2014).

L'ensemble des données est disponible sur InfoTerre.

Ces travaux ont été menés dans le cadre des appuis aux politiques publiques notifiés en 2014 dans le cadre programme 187 de la LOLF.

Sommaire

1. Introduction.....	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIFS 2014	9
2. Modèle géologique des sédiments meubles de Loire-Atlantique	11
2.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	11
2.2. PROGRAMME DES OPÉRATIONS 2014.....	13
2.3. RÉSULTATS ATTENDUS ET VALORISATION SCIENTIFIQUE.....	15
3. Modélisation des alluvions de la Garonne : mise en place d'une méthodologie semi-automatique	17
3.1. INTRODUCTION	17
3.2. SOURCE ET PILE	18
3.3. CODAGE	21
3.4. ESTIMATION DES ÉPAISSEURS	22
3.4.1. Variographie	22
3.4.2. Variographie de la base des alluvions récentes	24
3.4.3. Variographie de la base des alluvions anciennes.....	25
3.4.4. Modélisation.....	25
3.4.5. Essai avec dérive.....	30
3.5. CONTRÔLE DE LA COHÉRENCE DES FORAGES.....	33
3.6. LIMITATIONS ET AVANTAGES	34
4. Mise à disposition des informations sur InfoTerre™	37
5. Conclusions et perspectives	39

Liste des illustrations

Figure 1 -	Carte de l'épaisseur modélisée des altérites de Bretagne	12
Figure 2 -	Localisation du modèle géologique des altérites de Loire-Altantique, forages et réseau structural simplifié. Fond : carte géologique à 1 M.	12
Figure 3 -	Bloc 3D illustrant la surface modélisée de la base des altérites (en cours de construction) et le réseau structural des failles majeures. La flèche noire indique le nord.	15
Figure 4 -	Procédure idéale de traitement des données	17
Figure 5 -	Procédure de traitement des données exploitée ici	18
Figure 6 -	Extension de la zone d'étude sur la carte de France	19
Figure 7 -	Emplacement des forages disponibles (points noirs), sur fond topographique. Le liseré rouge indique la limite d'extension des alluvions.	20
Figure 8 -	Alluvions récentes (bleu) et anciennes (vert) ; forages (points noirs)	20
Figure 9 -	Points du variogramme expérimental et modèle de variogramme ajusté automatiquement, pour un krigeage ordinaire (gauche) et un krigeage universel utilisant la distance au bord comme dérive (droite) ; en haut pour le mur des alluvions récentes, en bas pour le mur des alluvions anciennes ; « distance.j » et « distance.v » désignent les distances aux bords des extensions récentes et anciennes, « err ² » désigne l'erreur quadratique totale.	23
Figure 10 -	Ajustement du variogramme de mur.j.exa manuel, à portée et palier imposés (rouge) et ajustement automatique (bleu) comme précédemment (figure 9)	24
Figure 11 -	Variogramme (automatique) pour le mur des alluvions anciennes	25
Figure 12 -	Profondeur du mur des alluvions récentes dans le modèle final (opposée de l'épaisseur des alluvions récentes)	26
Figure 13 -	Profondeur du mur des alluvions totales dans le modèle final (opposée de l'épaisseur des alluvions cumulées)	27
Figure 14 -	Épaisseur des alluvions anciennes seules	28
Figure 15 -	Points où l'épaisseur d'alluvions récentes modélisée est inférieure à 10 cm (rouge) ; en vert, les forages, en gris, l'extension des alluvions récentes	29
Figure 16 -	Cartes des écarts-types de krigeage du mur des alluvions récentes (gauche) et du mur des alluvions anciennes (droite), selon les données exactes (points noirs)	30
Figure 17 -	Comparaison des résultats de modélisation par krigeage ordinaire (gauche) et krigeage universonel sur la distance au bord (droite), pour les deux horizons base des alluvions récentes (haut) et anciennes (bas).	31
Figure 18 -	Agrandissement des modèles de la base des alluvions récentes sur deux zones du modèle ; à gauche, modèle sans dérive, à droite, avec la distance au bord comme dérive ; les points verts indiquent les données exactes, les points bleus, les données d'inégalités ajoutées par l'algorithme d'autocontrainte.	32
Figure 19 -	Forages dont la valeur de la base des alluvions récentes (gauche) ou celle des alluvions anciennes (droite) est considérée comme aberrantes (points rouges).	33
Figure 20 -	Forages dont la valeur de la base des alluvions récentes est considérée comme aberrante (points rouges) pour le variogramme proposé par l'opérateur (§ 3.4.2)	34

Liste des tableaux

Tableau 1 - La pile et les codages utilisés ; gauche : codages et pile étendue ; droite : regroupement en pile synthétique.....	18
Tableau 2 - Exemples de conversion entre critère et code stratigraphique.....	21

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Les terrains qui constituent le régolithe couvrent la quasi-totalité des terres émergées. Ils apparaissent non seulement comme des unités géologiques à part entière, mais aussi comme le support de l'activité biologique, l'objet de nombreuses activités humaines, la source de matériaux exploitables, l'encaissant des nappes alluviales superficielles et la roche-mère de nombreux sols. Le régolithe doit être, au même titre que l'eau, considéré comme « un bien commun » un capital à gérer et préserver car il est essentiel à la bonne santé de la biosphère, assurant ainsi les ressources essentielles nécessaires à la société humaine. Ainsi la position des formations le constituant, à l'interface entre le sol riche en matière organique et le substrat géologique, le place sur le cheminement des eaux d'infiltration : elles peuvent intervenir alors tantôt comme filtre des pollutions superficielles, tantôt comme écran imperméable, ce qui leur attribue un rôle essentiel quant à la protection des aquifères sous-jacents. Dans certains cas, elles constituent elles-mêmes des aquifères exploitables (altérites, alluvions...). En génie civil, leur répartition et leurs propriétés physiques conditionnent l'aménagement des territoires. Dans le domaine de la gestion des risques naturels, l'infiltration des eaux et les ruissellements dépendent du régolithe et de son couvert végétal.

Dans le contexte d'une volonté forte exprimée par l'Europe quant à la protection des sols et des eaux souterraines, ainsi que dans le cadre de la politique volontariste affichée par la France lors du Grenelle de l'environnement, il apparaît aujourd'hui essentiel de fournir aux citoyens et aux acteurs impliqués dans la gestion de la ressource et à ceux concernés par l'anticipation des risques, une caractérisation de cet espace géologique en deux et en trois dimensions, conformément à leurs besoins et à leurs attentes.

1.2. OBJECTIFS 2014

Le principal objectif 2014 était de poursuivre la modélisation des formations du Régolithe. Deux principales tâches ont été entreprises :

- la modélisation de l'épaisseur des formations meubles de Loire-Atlantique ; ceci dans le but de compléter la modélisation précédemment réalisée à l'échelle de la Bretagne (administrative) et de l'étendre à l'échelle du Massif armoricain ;
- la modélisation de l'épaisseur des formations alluviales de la Garonne en se basant sur une nouvelle méthodologie de modélisation semi-automatique.

2. Modèle géologique des sédiments meubles de Loire-Atlantique

2.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La modélisation géologique 3D multicouches mise en œuvre sous GDM-Multilayer1 (version 2014) a pour objectif d'améliorer la connaissance du Régolithe. Ce logiciel présente l'avantage de gérer une base de données conséquente (plusieurs centaines de forages, plusieurs milliers de passes de forages recodées), de vérifier ces données et de garantir leur mise en cohérence, fondamentale en géologie (cohérence altitude forage/altitude MNT, cohérence stratigraphique).

L'interpolation des données spatiales (contours géologiques, MNT) et ponctuelles (forages, points de contraintes) sur le sous-sol permet d'établir *in fine* des cartes et des coupes géologiques, ici de l'échelle du département à l'échelle à 1/100 000 représentant les épaisseurs, les altitudes du toit et du mur des formations géologiques « meubles » reposant sur le substratum « dur ».

Le modèle géologique des formations meubles a été finalisé sur l'ensemble de la région Bretagne en 2013 (27 208 km², Figure 1). Un premier modèle a été réalisé en 2012 sur le département de l'Ille-et-Vilaine (35), puis les trois autres départements de la région Bretagne, Côtes d'Armor (22), Finistère (29) et Morbihan (56) ont été finalisés en 2013 ainsi que la synthèse des cartes sous ArcGis. Hors difficultés informatiques et aléas techniques variés, le temps nécessaire estimé est de l'ordre de 40 jours pour un modèle, soit 120 jours pour couvrir toute la région Bretagne.

Suivant cette même méthodologie, la modélisation s'est étendue au département de Loire-Atlantique en 2014 (6 815 km²) (Figure 2) mais contient cependant de nouvelles données et de nouveaux développements à la fois dans la structure du modèle mais aussi dans le processus de traitement de certaines limites spatiales.

Les formations géologiques caractérisées sont conservées : alluvions récentes, altérites au sens large, dépôts sédimentaires meubles, isaltérites (décrites ponctuellement, rattachées au socle dans la construction des surfaces géologique) et substratum consolidé (socle métamorphique essentiellement).

¹ GDM/MultiLayer est un logiciel développé par le BRGM. Voir <http://gdm.brgm.fr>

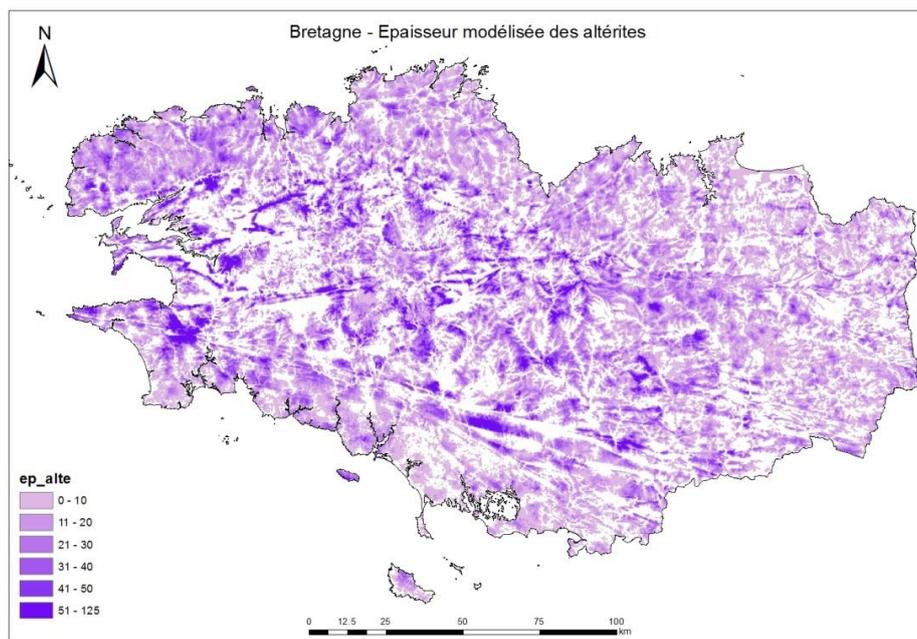


Figure 1 - Carte de l'épaisseur modélisée des altérites de Bretagne.

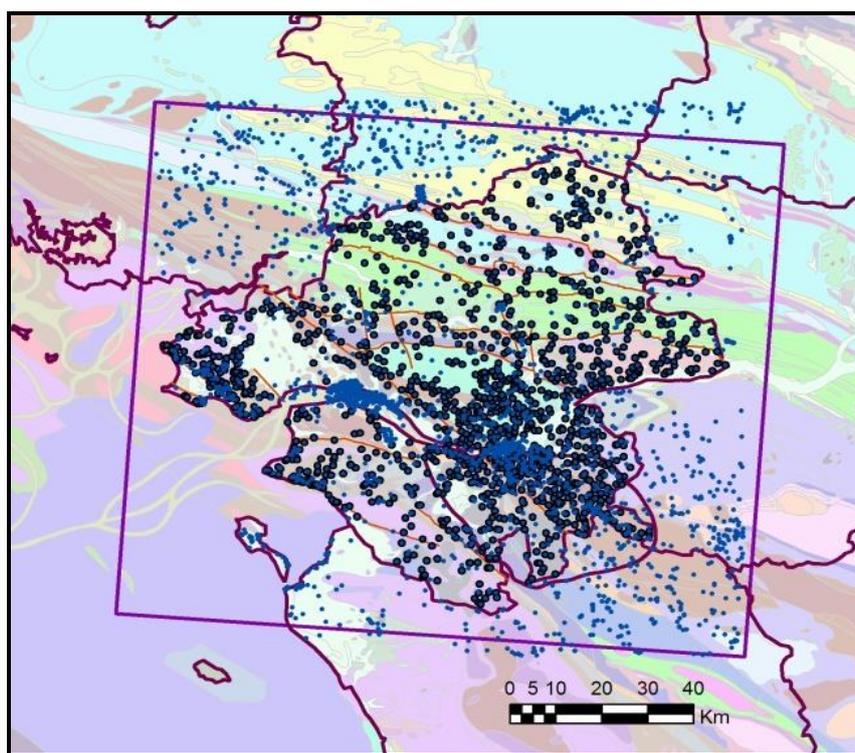


Figure 2 - Localisation du modèle géologique des altérites de Loire-Atlantique, forages et réseau structural simplifié. Fond : carte géologique à 1 M.

2.2. PROGRAMME DES OPÉRATIONS 2014

Le processus de traitement des données d'entrée repose sur la méthodologie développée au cours des différentes phases de réalisation du modèle de la région Bretagne (2012 et 2013) dans le cadre du projet REGO-DAPP.

3 nouveaux items ont cependant été testés et développés en 2014 :

1/ Introduction du réseau structural majeur

Il s'agit d'un essai méthodologique afin de tester le comportement des différentes surfaces interpolées vis-à-vis d'un réseau structural.

Le réseau structural représenté caractérise l'extrémité méridionale de la zone de cisaillement sud-armoricain. À partir des cartes géologiques harmonisées à 1/50 000 sous ArcGis, le tracé linéaire de 17 failles majeures a été simplifié pour les besoins de GDM-Multilayer (interprétation des tracés pour garantir la continuité des structures et lissage final pour un meilleur rendu visuel).

Afin de rendre compte de l'impact potentiel de la structure géodynamique profonde sur la néo-tectonique, l'hypothèse choisie est celle où les déplacements induits par les failles majeures sont visibles depuis les formations du socle jusque dans les dépôts des altérites modélisées. En revanche, le modèle considère que ces structures faillées n'impactent pas les dépôts les plus récents représentés par les alluvions actuelles.

Afin de rendre compte de l'éventuel jeu des failles, l'hypothèse retenue est celle où le rejet affecte les formations géologiques formées avant ou pendant la formation des failles majeures, c'est-à-dire depuis le socle jusqu'au toit des altérites. Les dépôts concernant les alluvions actuelles et récentes ne sont donc pas décalées par ces rejets passés et ne sont donc pas impactées dans le modèle. Le logiciel utilise les tracés des failles comme des murs verticaux se prolongeant à l'infini en profondeur contre lesquels les interpolations des surfaces géologiques sont stoppées net à leur contact (pour interpoler d'un côté de la faille, on n'utilise que les données situées du même côté de la faille).

L'intégration des failles majeures dans le modèle de Loire-Atlantique en 2014 est bien prise en compte dans le calcul des interpolations avec le logiciel GDM-Multilayer. Ce réseau structural se traduit sur les cartes d'épaisseur par des marches d'escalier au contact des failles.

Dans le cadre de la construction d'un modèle multicouche, notons qu'il s'agit avant tout d'un choix technique de représentation des résultats finaux. Les cartes issues du modèle des altérites de la région Bretagne (2012-2013) mettent aussi en évidence les grandes structures affectant le socle et les formations sus-jacentes, bien que ces failles ne soient pas prises en compte dans la construction du modèle. En effet, à cette échelle de restitution, les rejets sont déjà intégrés dans les épaisseurs des formations lors des interpolations ce qui conduit à un visuel de restitution plus lissé à proximité des structures cassantes.

2/ Modélisation des alluvions récentes

L'une des difficultés majeures dans la construction de ce type de modèle réside dans la prise en compte des alluvions récentes. En effet, les contours de ces alluvions ne sont pas actualisés sur les cartes géologiques et ne peuvent donc pas être utilisés comme base de travail fiable.

Une méthodologie a donc été développée sous ArcGis afin de calculer à partir de la géomorphologie (MNT 50 m de l'IGN) le réseau de vecteurs de plus grande pente convergeant vers les points bas pour reconstituer le réseau hydrographique passé (cours d'eau asséchés) et actuel (cours d'eau actifs).

Cette méthodologie originale a permis de reconstituer les cours d'eau récents de manière distincte des terrasses anciennes par exemple et d'en proposer des contours actualisés.

Une difficulté majeure et récurrente a été rencontrée lors de la phase de contrôle des interpolations calculées par GDM-Multilayer pour les alluvions récentes. Pour limiter l'interpolation des données des alluvions récentes, l'utilisateur introduit des contours de formations géologiques afin de confiner l'interpolation au sein de polygones bien définis. Pour le cas de la Loire-Atlantique, le réseau fluvial représente un nombre conséquent de polygones, dont certains sont inclus dans d'autres polygones. Afin de contourner cette difficulté, les contours des alluvions récentes ne sont plus introduits dans le logiciel sous la forme de polygones, mais sont remplacés par une sélection de points dits de « passage » contenant l'information géologique « alluvions » à une altitude donnée. Cette astuce génère cependant des temps de calcul plus longs. Ces contours représentent cependant une masse de données telles que le logiciel ne peut pas les intégrer en tant que limites d'extension. Une astuce consiste alors à attribuer une altitude à chaque point (X, Y) du contour afin de transformer ces poly-lignes en points de passage de la formation géologique des alluvions.

3/ Optimisation des interpolations spatiales

Afin de renforcer la fiabilité des interpolations du modèle, au-delà du nombre de forages intégrés, leur distribution spatiale sur la zone d'étude est un paramètre majeur. En effet certaines zones sont bien renseignées mais d'autres totalement dépourvues de données. Afin d'améliorer la qualité des interpolations tout en se basant sur des données réelles, un objectif du projet en 2014 était de rechercher la couverture de forages la plus complète possible sur l'ensemble du département pour renforcer leur densité.

Pour répondre à cet objectif et valoriser au mieux les données existantes de la Banque de Données du sous-Sol, la base de données initialement composée des logs géologiques validés (LGV) de la BSS a été complétée par des forages lithologiques non validés (LNV). Une collaboration avec la DAT Pays-de-la-Loire a été mise en place pour fournir la base de données des forages non validés. La connaissance de cette base en lien avec le terrain en région permet d'établir des critères de sélection des forages pertinents.

De nombreuses requêtes ont été appliquées afin de trier et de sélectionner ces nouvelles données : seuls 1 343 forages lithologiques ont été conservés à l'issue des requêtes contre 6 485 initialement soit 20 % de forages retenus *in fine*.

Au total, 3 797 forages ont été utilisés pour la construction du modèle des altérites de Loire-Atlantique (2 454 LGV et 1 343 LNV) (Figure 3). L'ensemble des forages représente 18 150 passes recodées pour la mise en cohérence des données de la BSS et la pile stratigraphique de référence du modèle.

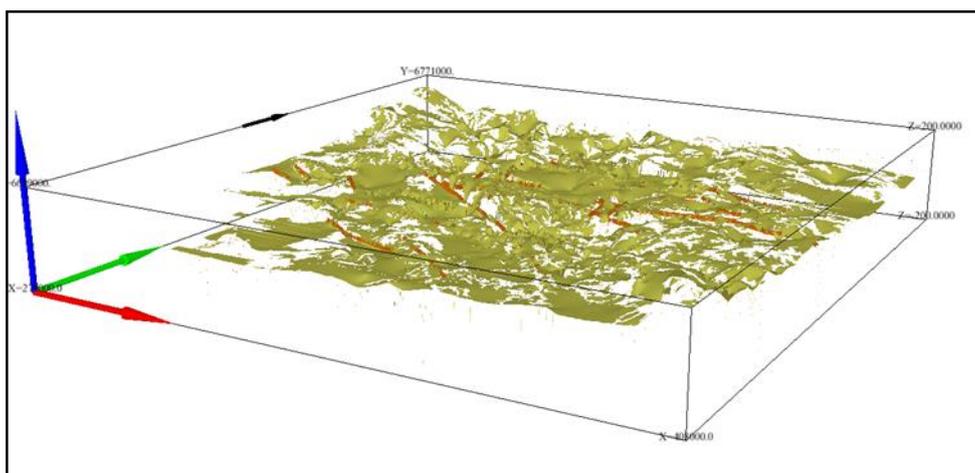


Figure 3 - Bloc 3D illustrant la surface modélisée de la base des altérites (en cours de construction) et le réseau structural des failles majeures. La flèche noire indique le nord.

2.3. RÉSULTATS ATTENDUS ET VALORISATION SCIENTIFIQUE

Les difficultés techniques rencontrées pour intégrer les failles majeures et pour représenter les alluvions récentes ont ralenti les étapes de validation des interpolations du modèle, de même que le traitement de données de forages supplémentaires (informations de qualité variable).

Toutefois, ces difficultés techniques :

- renforcent les étapes de traitement de données à apporter dans le futur ;
- amorcent des réflexions sur l'optimisation de la méthodologie de construction du modèle et le mode de représentation des données ;
- favorisent le développement de nouvelles méthodologies (ex. calcul des vecteurs de pente en lien avec la géomorphologie).

En termes de valorisation scientifique, et au-delà des rapports internes BRGM, une communication orale des résultats du modèle a eu lieu au Congrès de la 24^{ème} réunion des Sciences de la Terre à Pau en octobre 2014 (Bialkowski A., Tourlière B., Prognon-Ricordel C., Quesnel F., Tissoux H., la modélisation du Régolithe : enjeux et applications, livre des résumés, p. 27). Une seconde présentation s'est tenue lors des « Journées des utilisateurs GDM » en janvier 2015 au BRGM à Orléans, présentation davantage orientée vers les applications du Régolithe et les avantages de l'utilisation du logiciel de modélisation GDM-Multilayer.

3. Modélisation des alluvions de la Garonne : mise en place d'une méthodologie semi-automatique

3.1. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet RégoDAPP, un modèle de l'épaisseur des alluvions fluviales de la Garonne et de ses affluents a été initié.

Actuellement, il est difficile de proposer une modélisation automatique satisfaisante et réaliste, du fait de la très forte anisotropie des phénomènes géologiques régissant la mise en place des alluvions. En effet, on peut s'attendre à une autocorrélation (assimilable à la portée) d'un ordre de grandeur en dizaines de mètres en transversal (perpendiculaire à l'axe de la rivière) et en centaines de mètres, voire dizaines de milliers de mètres en longitudinal (le long du cours de la rivière) ; les axes d'anisotropie varient également selon l'orientation de la pente. Les méthodes classiques de modélisation éprouvent des difficultés à approcher ce genre d'objet.

L'idée générale est donc de suivre une procédure qui reproduise mieux la forte anisotropie de distribution des épaisseurs d'alluvions, tout en étant la plus automatisée possible (Figure 4). Néanmoins, certaines actions ne seront pas automatisées ici (Figure 5) ; ces actions pourront l'être sans grande difficulté à l'avenir. Les travaux actuels s'appuient uniquement sur des données de forages et d'extensions selon les cartes géologiques, mais des développements ultérieurs pourront intégrer d'autres données. En particulier, le MNT n'a pas été utilisé, car les épaisseurs sont calculées directement.

Ces difficultés algorithmiques ne seront, probablement, pas levées avant quelque temps. D'ici là, des essais semi-automatiques peuvent être réalisés en s'appuyant sur les nombreux forages enregistrés dans la Banque du sous-sol (BSS).

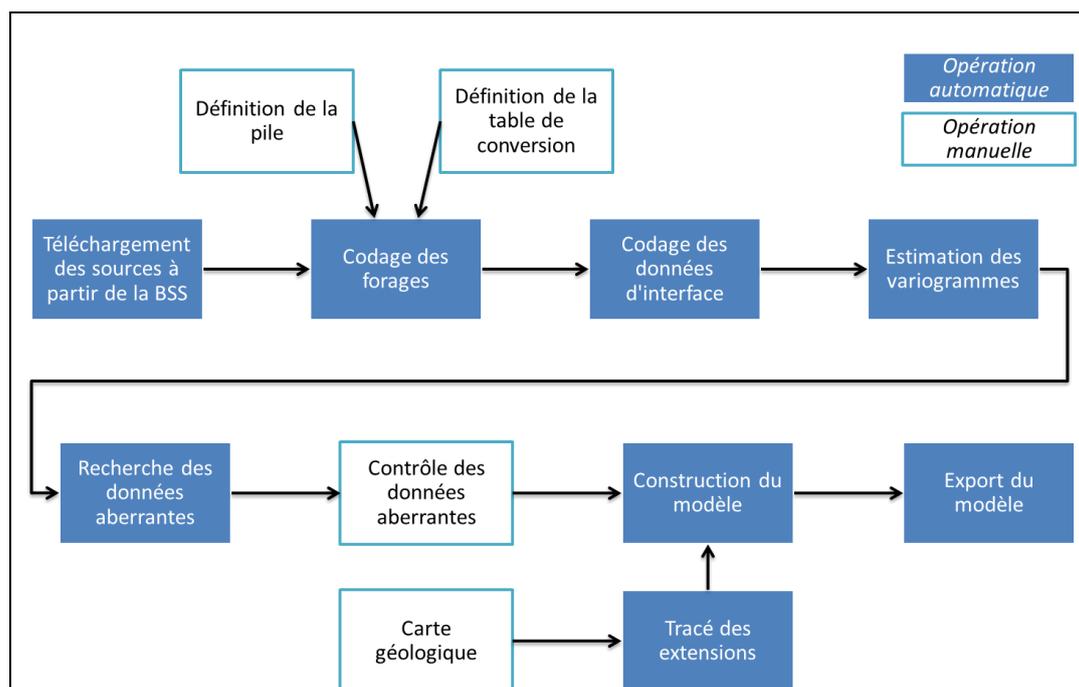


Figure 4 - Procédure idéale de traitement des données.

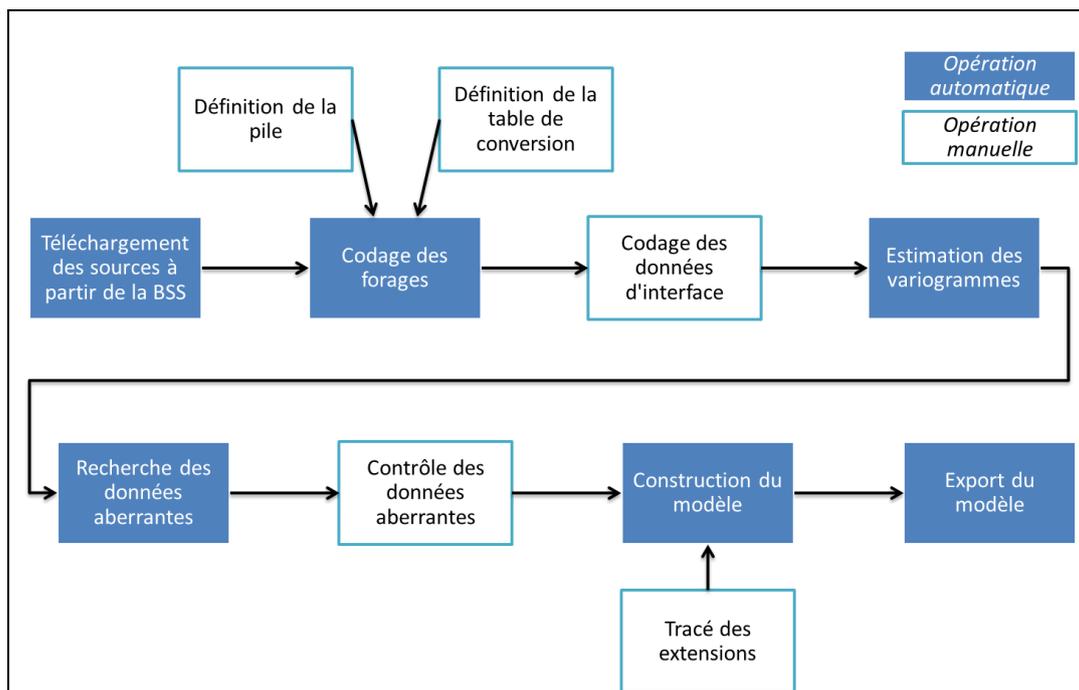


Figure 5 - Procédure de traitement des données exploitée ici.

Note : dans la suite, les distances et coordonnées seront indiquées en km, les profondeurs et épaisseurs en m.

3.2. SOURCE ET PILE

La pile décrit, de haut en bas, le sol et les remblais, les alluvions « récentes » (\mathcal{F}_z à \mathcal{F}_y inclus, soit Holocène à Weichsélien), les alluvions anciennes (\mathcal{F}_x et plus âgées), le substratum. Le code Q regroupe les «alluvions quaternaires (indifférenciées)», incluant les alluvions récentes, les alluvions anciennes. Dans la pile (Tableau 1), les couches sont numérotées de haut en bas ; à chaque code sont associées une couche minimale et une couche maximale possibles.

Étage minimal	Étage maximal	Code	Nom
	1	X	Sol et remblais
	2	j	Alluvions récentes
2	3	Q	Alluvions quaternaire
	3	v	Alluvions anciennes
	4	S	Substratum

sol		
1	X	
2	J	Q
3	V	
4	S	

Tableau 1 - La pile et les codages utilisés ; gauche : codages et pile étendue ; droite : regroupement en pile synthétique.

Les extensions des alluvions récentes et anciennes sont fournies par regroupement sur la carte géologique (Figure 8), limité à la Garonne et à ses affluents (positionnement Figure 6).

Les forages sont obtenus depuis la BSS. Après nettoyage (suppression des emplacements en dehors des extensions), 1 868 forages validés sont documentés.

Une fois retirés les doublons et, manuellement, quelques lieux clairement incohérents, il reste 1 857 forages à considérer (Figure 7).

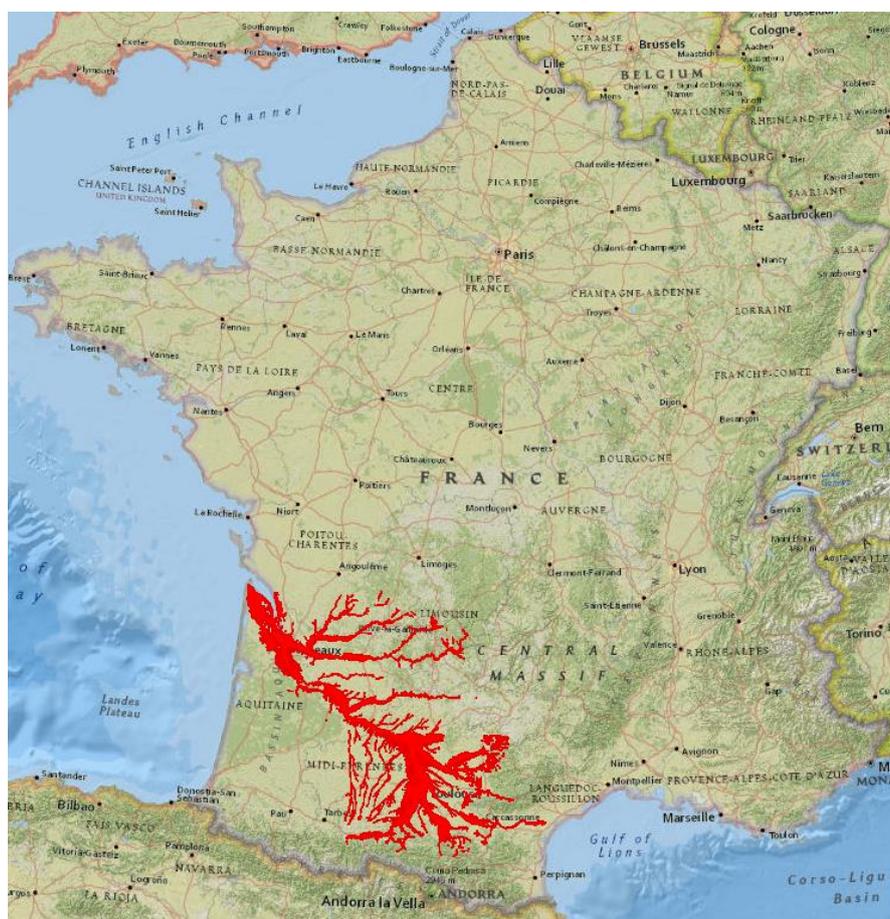


Figure 6 - Extension de la zone d'étude sur la carte de France.

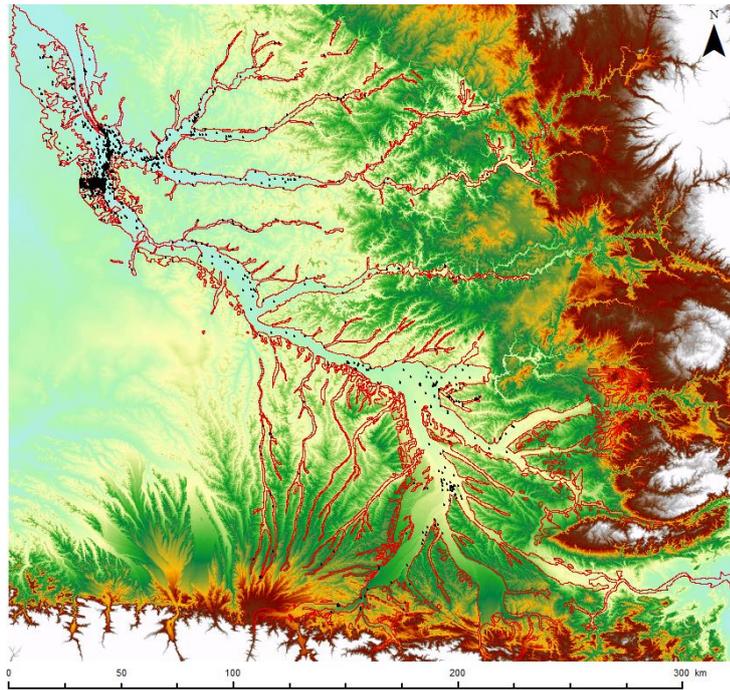


Figure 7 - Emplacement des forages disponibles (points noirs), sur fond topographique. Le liseré rouge indique la limite d'extension des alluvions.

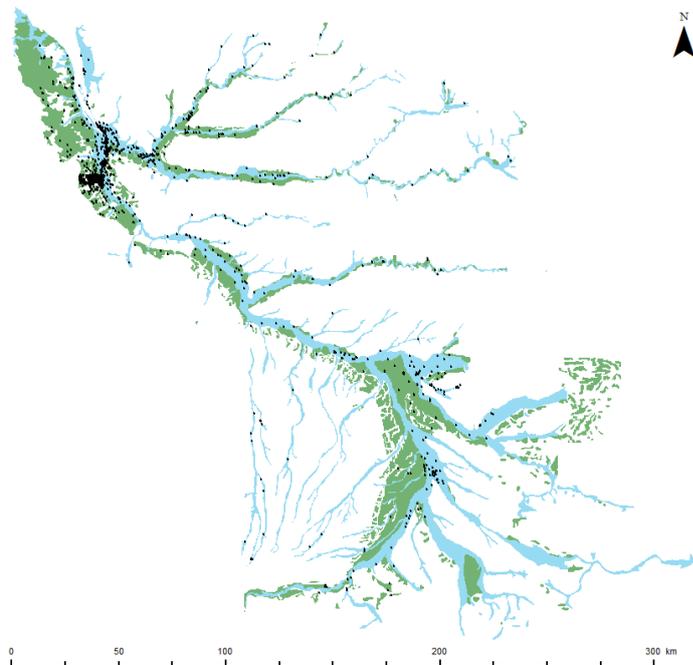


Figure 8 - Alluvions récentes (bleu) et anciennes (vert) ; forages (points noirs).

3.3. CODAGE

Afin de gagner du temps, un codage automatique est réalisé. L'algorithme convertit les passes décrites dans les logs validés selon les valeurs des colonnes fournies par la BSS : « âge début », « lithologie », « nom appellation », « remarque » (Tableau 2).

colonne	critère	code
age_debut	AAS (<i>note : code de l'Aalénien supérieur</i>)	S
age_debut	BRI (<i>note : code du Briovérien</i>)	S
lithologie	calcaire à biostromes.	S
lithologie	calcaire à silex.	S
lithologie	terre végétale.	X
nom_appellation	Fz	j
nom_appellation	Fy	j
nom_appellation	Sol (terre végétale)	X
age_debut	WUR (<i>note : code du Würm</i>)	j
nom_appellation	Alluvions fluviales anciennes	v
age_debut	ACT (<i>note : code de l'Actuel</i>)	j
...

Tableau 2 - Exemples de conversion entre critère et code stratigraphique.

L'algorithme étend les valeurs des étages minimaux et maximaux, qui doivent être croissantes le long du forage. Ceci permet à la fois d'affiner les résultats (trois passes successives vers le bas Q/*inconnu*/j seront identifiées comme une succession j/j/j) et de contrôler la cohérence des codages (une passe « v » au-dessus d'une passe « j » crée une contradiction).

Cette donnée est ensuite convertie en profondeurs minimales, exactes et maximales des alluvions récentes et anciennes. La transformation est réalisée sous feuille Excel, mais pourrait aisément être automatisée et chaînée avec l'algorithme de codage.

3.4. ESTIMATION DES ÉPAISSEURS

À partir de ces données, une carte des estimations des épaisseurs récentes et anciennes est produite. Il a été choisi de travailler en épaisseur plutôt qu'en cote car cela traduit *a priori* mieux les dynamiques de dépôt. Il a été choisi également de ne pas contraindre les épaisseurs respectives à être nulles à l'affleurement ; en effet, cela introduit de nombreux artefacts de calcul, en particulier dans les régions pauvres en forage.

Considérant le contexte géologique, les couches sont considérées comme érosives (chacune échantonnant les couches sous-jacentes) ; il y a donc deux interfaces à modéliser : la base des alluvions récentes et la base des alluvions anciennes.

3.4.1. Variographie

L'estimation se fait par krigeage. Les variogrammes peuvent être calés automatiquement (algorithme «autofitVariogram» testant plusieurs structures de variogramme selon la technique des moindres carrés, dans la librairie R «automap») selon les épaisseurs exactes fournies par les forages. Un essai a été réalisé en prenant de la distance au bord en tant que dérive, dans une approche de krigeage universel. La différence entre la variographie sans dérive et celle avec la distance au bord comme dérive (Figure 9) montre le faible impact de cette complexification : l'erreur quadratique (somme des carrés des différences entre le modèle et la mesure pour chaque paire de points) est peu ou prou la même avec et sans dérive, constante pour la base des alluvions récentes, et variant de seulement 7 % pour la base des alluvions anciennes. Une modélisation prenant en compte ces dérives sera néanmoins considérée ci-dessous (§ 3.4.5).

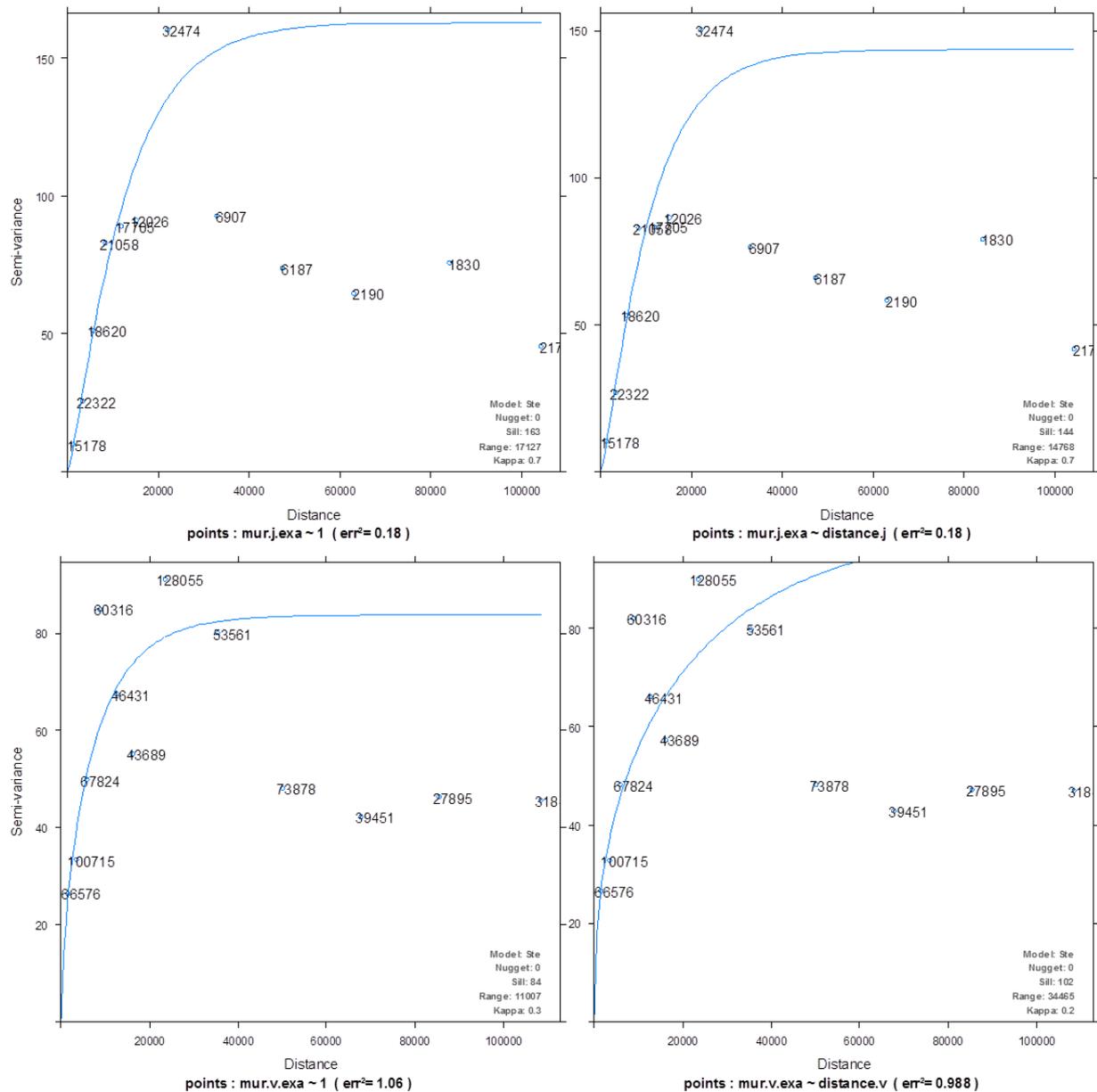


Figure 9 - Points du variogramme expérimental et modèle de variogramme ajusté automatiquement, pour un krigeage ordinaire (gauche) et un krigeage universel utilisant la distance au bord comme dérive (droite); en haut pour le mur des alluvions récentes, en bas pour le mur des alluvions anciennes; « distance.j » et « distance.v » désignent les distances aux bords des extensions récentes et anciennes, « err^2 » désigne l'erreur quadratique totale.

Les variogrammes proposés automatiquement sont, pour la base des alluvions récentes, une structure de Matérn ("Ste") de palier 163 m², portée 17 km, paramètre de forme 0,7, et pour la base des alluvions anciennes, une structure de Matérn de palier 84 m², portée 11 km, paramètre de forme 0,3; dans les deux cas un effet de pépite nul a été imposé. L'opérateur pourrait également exiger des variogrammes renseignés manuellement, soit qu'il fasse une hypothèse sur leur structure, soit qu'il s'en remette à un variogramme linéaire. Enfin, l'opérateur peut ajuster manuellement le palier et/ou la portée, ou laisser l'algorithme « autoVariogram » choisir la meilleure structure.

3.4.2. Variographie de la base des alluvions récentes

Pour le mur des alluvions récentes, l'opérateur impose ici un variogramme sphérique de portée 14 km et de palier 92 m², l'algorithme permet de vérifier que la structure sphérique est la plus indiquée pour ces contraintes. Les modèles automatique et manuel (Figure 10) sont quasiment identiques pour des interdistances inférieures à 10 km, avant que le modèle automatique ne poursuive vers de fortes valeurs de semi-variance.

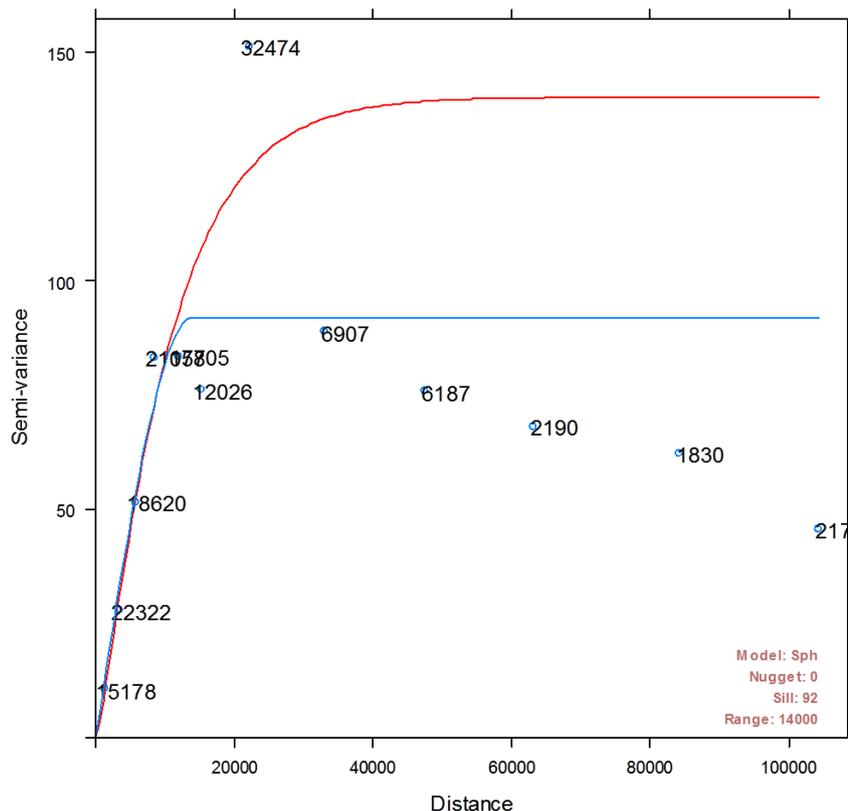


Figure 10 - Ajustement du variogramme de mur.j.exa manuel, à portée et palier imposés (rouge) et ajustement automatique (bleu) comme précédemment (figure 9).

Par rapport à ce modèle semi-automatique, le modèle automatique a une portée légèrement plus grande (17 km face à 14 km), et un palier beaucoup plus fort (163 m² face à 92 m²).

Le choix d'un variogramme posé de manière manuelle ou semi-automatique limiterait les possibilités d'automatisation. Il est choisi ici de faire confiance au modèle automatique, pour poursuivre la démarche d'automatisation : face au modèle manuel, sa portée est légèrement plus grande (17 km face à 14 km), son palier est beaucoup plus fort (163 m² face à 92 m²). Cela n'aura pas une grande incidence sur les estimations, mais sous-estimer les écarts relatifs lors d'un contrôle de la cohérence des forages (§ 3.4.5) ; l'outil risque de ne pas interpréter certaines données comme potentiellement aberrantes. À l'inverse, ce palier fort produit des cartes d'incertitude fortes également, ce qui peut être pertinent eu égard à la mauvaise connaissance du milieu géologique.

3.4.3. Variographie de la base des alluvions anciennes

Pour les mêmes raisons que précédemment, et parce que son variogramme expérimental présente un aspect très peu structuré, le mur des alluvions anciennes sera modélisé en utilisant le variogramme automatique (Figure 11).

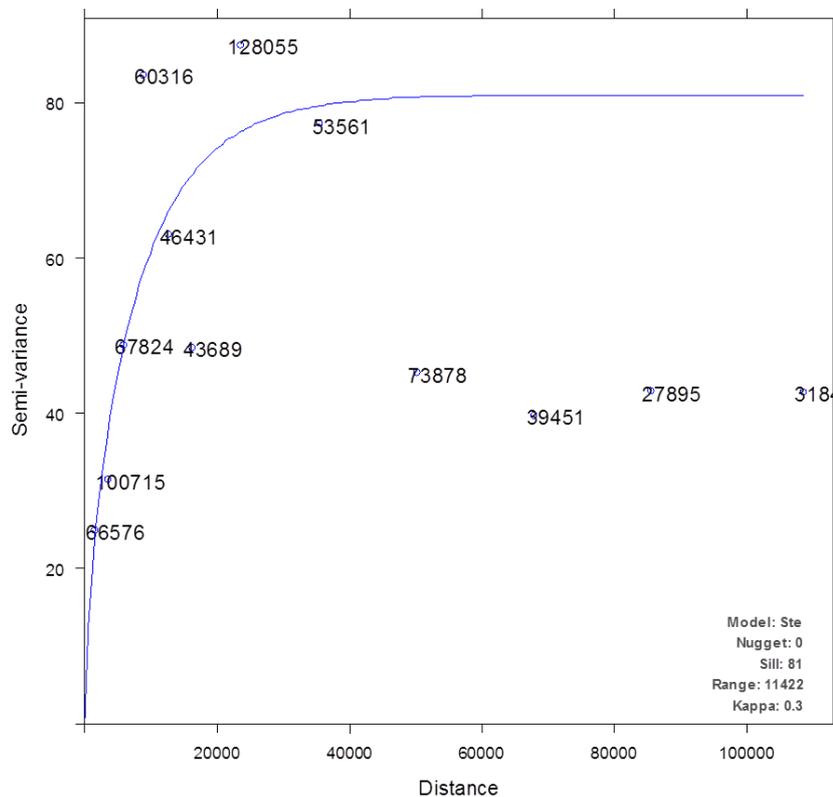


Figure 11 - Variogramme (automatique) pour le mur des alluvions anciennes.

3.4.4. Modélisation

Les épaisseurs minimales et maximales sont respectées au moyen des points de contrainte proposés par l'algorithme « autocontrainte » (non publié).

Les interfaces sont combinées et les couches « j » et « v » sont rognées selon les polygones d'extension respectifs. S'obtiennent les profondeurs estimées du mur des alluvions récentes (Figure 12) et du mur des alluvions anciennes (Figure 13), qui sont au signe près les épaisseurs des alluvions récentes et cumulées ; de là découlent les épaisseurs d'alluvions anciennes (Figure 14).

Remarquons qu'aucune contrainte d'inégalité n'a été posée sur les points de modélisation de la grille : il n'était donc pas exclu *a priori* que, localement, la profondeur des interfaces soit négative, et donc, après combinaison des interfaces, que l'épaisseur ne soit nulle sur de larges zones. Néanmoins, seulement 74 points de la grille (soit 1 %) ont une épaisseur d'alluvions récentes de moins de 10 cm (Figure 15), et 26 points (soit 0,03 %) ont une épaisseur d'alluvions anciennes de moins de 10 cm.

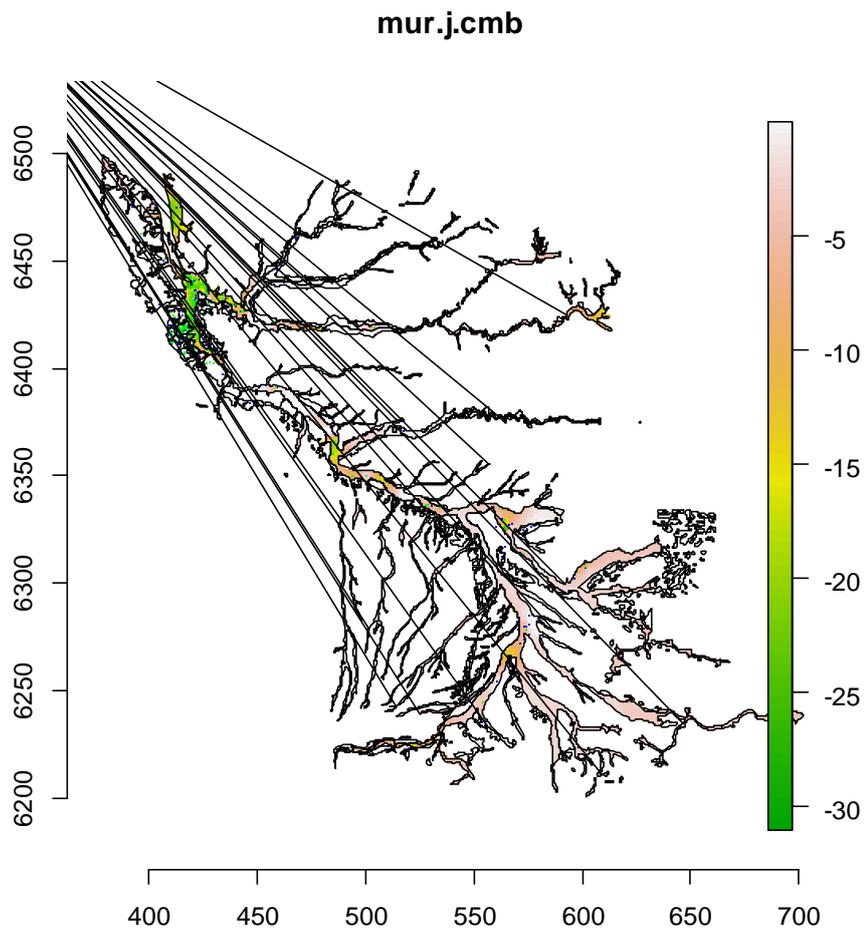


Figure 12 - Profondeur du mur des alluvions récentes dans le modèle final (opposée de l'épaisseur des alluvions récentes).

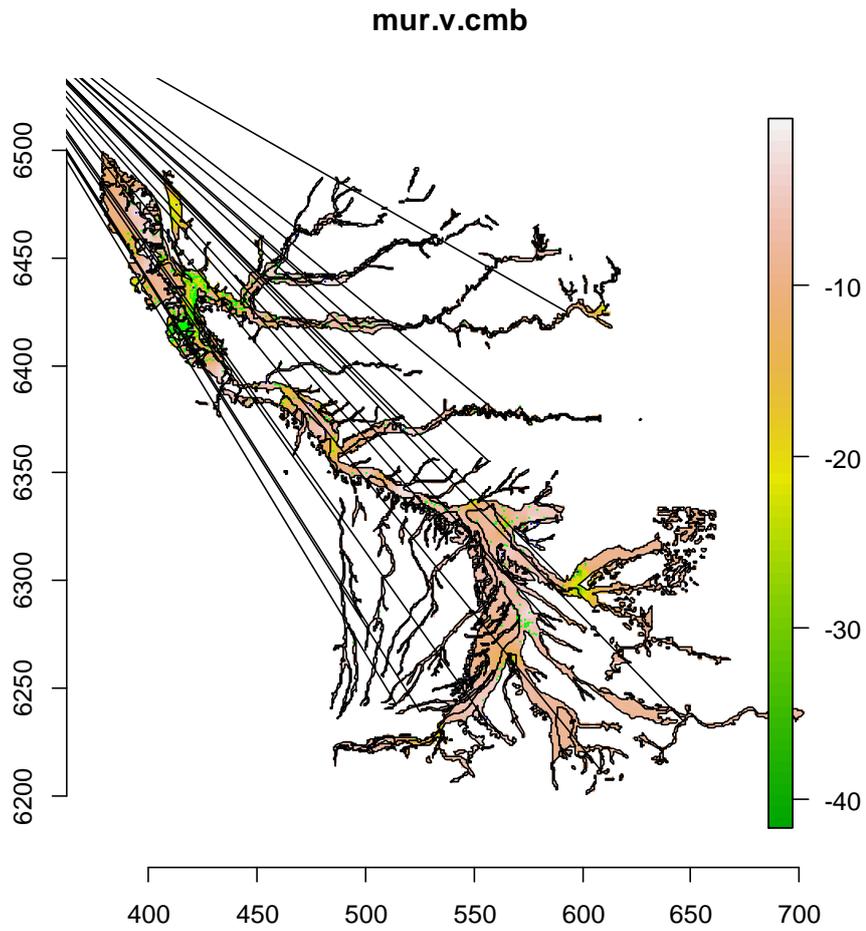


Figure 13 - Profondeur du mur des alluvions totales dans le modèle final (opposée de l'épaisseur des alluvions cumulées).

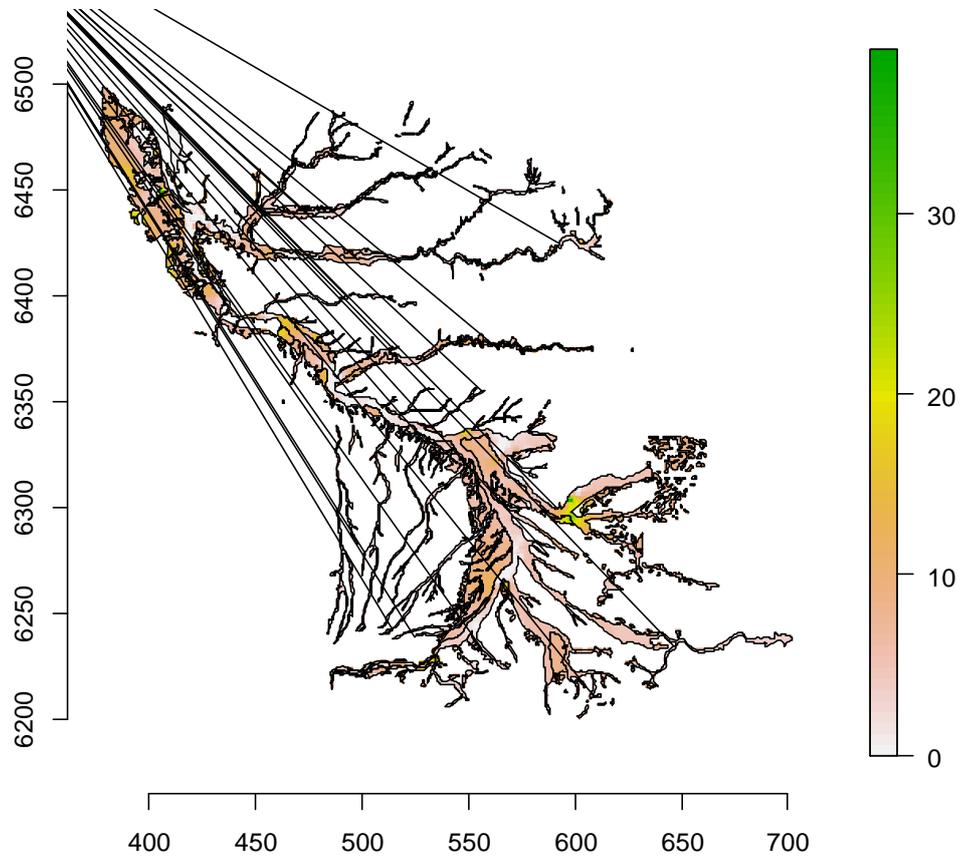


Figure 14 - Épaisseur des alluvions anciennes seules.

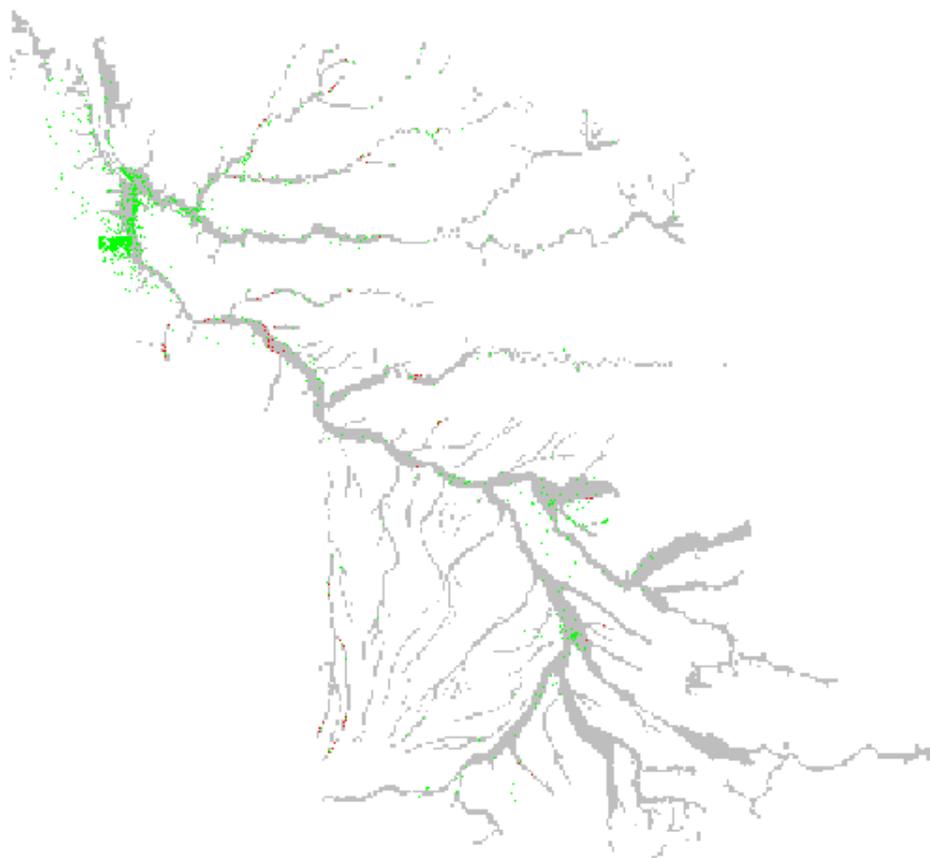


Figure 15 - Points où l'épaisseur d'alluvions récentes modélisée est inférieure à 10 cm (rouge) ; en vert, les forages, en gris, l'extension des alluvions récentes.

Le code sous R tel qu'il est écrit à ce jour ne prévoit pas d'estimer l'exactitude du modèle final. Néanmoins, son adaptation permet en quelques minutes de fournir les cartes d'écart-type de krigeage (Figure 16). Même si cela permet une estimation des imprécisions par interface, cette vue reste parcellaire ; en effet, le calcul de ces écarts-type de krigeage présuppose la justesse des données et du modèle du phénomène (variogramme), le respect des inégalités et des règles de combinaison des interfaces dans le modèle. Ceci étant dit, les cartes permettent de minorer les incertitudes et de mettre en lumière les régions les plus fidèlement reconstruites.

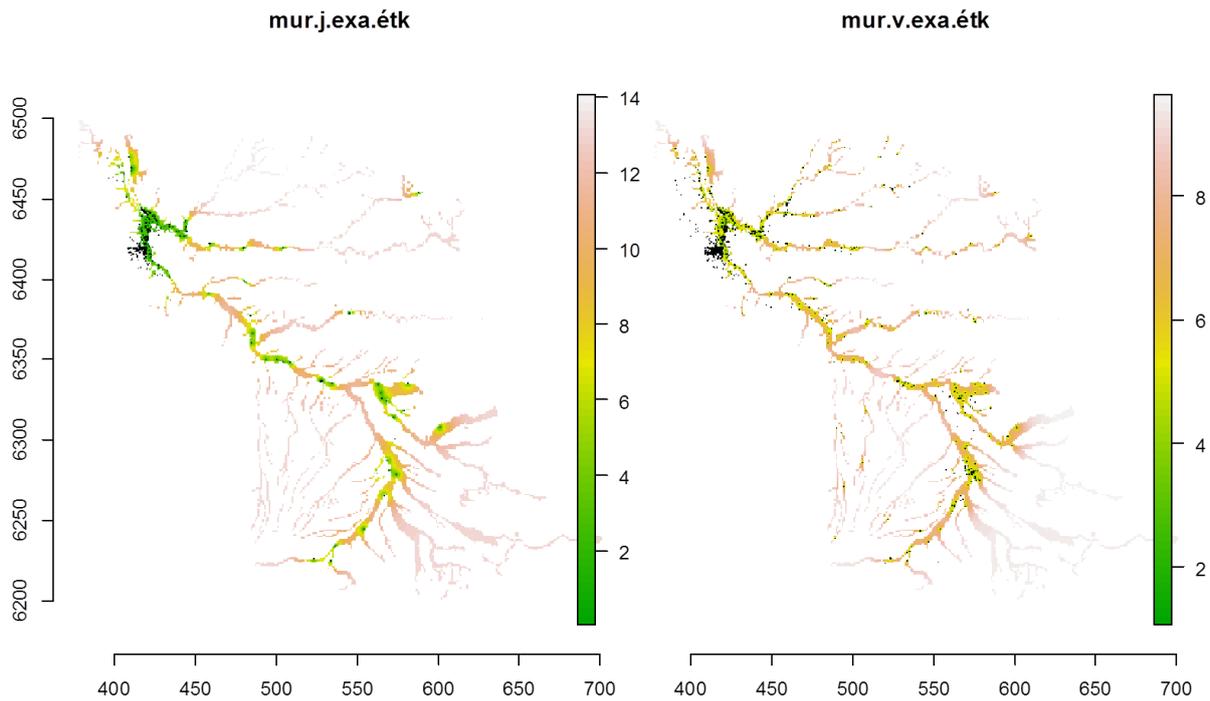


Figure 16 - Cartes des écarts-types de krigeage du mur des alluvions récentes (gauche) et du mur des alluvions anciennes (droite), selon les données exactes (points noirs).

3.4.5. Essai avec dérive

À titre d'illustration, l'exercice a été réalisé en prenant en compte la distance au bord comme dérive d'un krigeage universel. Le variogramme est ajusté automatiquement, sans autre contrainte qu'un effet de pépité nul. Le modèle ne s'écarte pas fortement du précédent (Figure 17), même si l'on note, loin des points de données, une tendance à un léger approfondissement des horizons et à une courbure plus représentative (Figure 18).

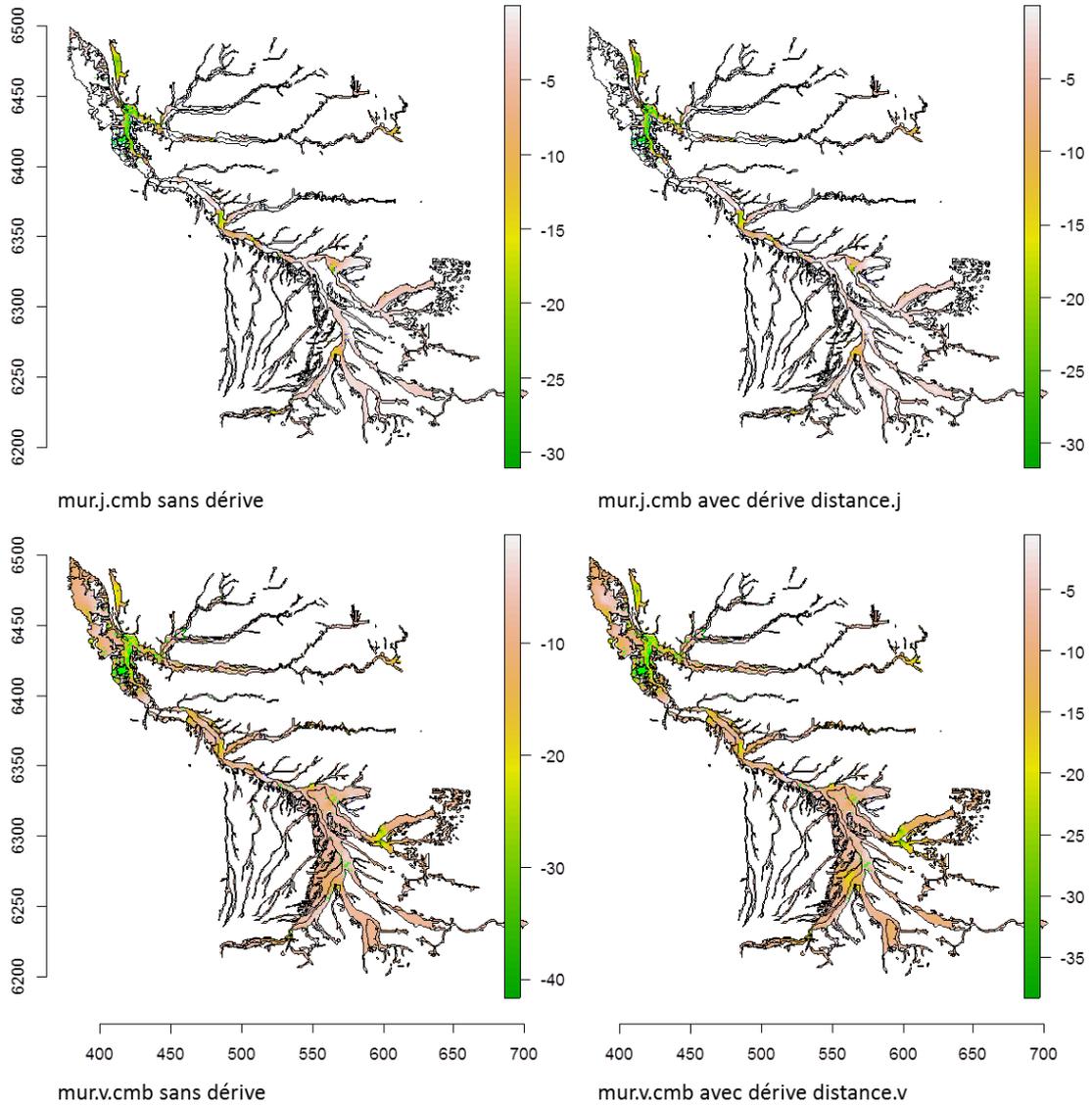


Figure 17 - Comparaison des résultats de modélisation par krigeage ordinaire (gauche) et krigeage universel sur la distance au bord (droite), pour les deux horizons base des alluvions récentes (haut) et anciennes (bas).

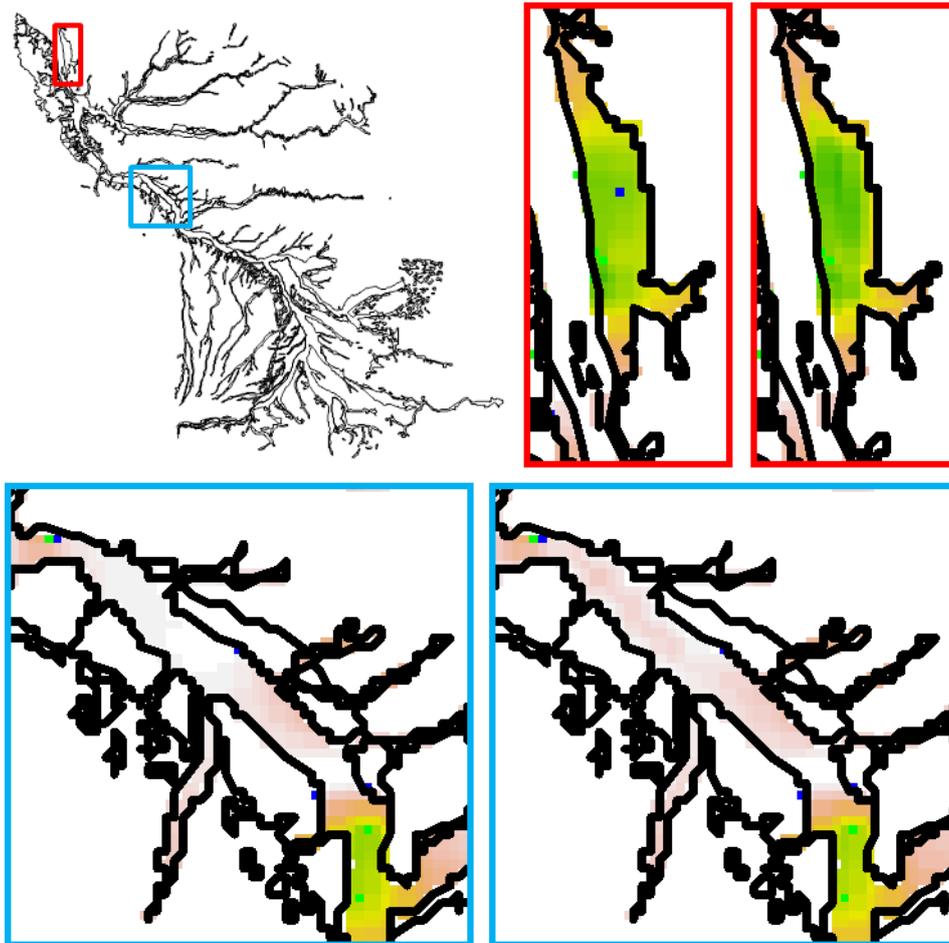


Figure 18 - Agrandissement des modèles de la base des alluvions récentes sur deux zones du modèle ; à gauche, modèle sans dérive, à droite, avec la distance au bord comme dérive ; les points verts indiquent les données exactes, les points bleus, les données d'inégalités ajoutées par l'algorithme d'autocontrainte.

L'ajout de cette dérive semble permettre une modélisation plus fidèle ; néanmoins, rappelons que la variographie (§ 3.4.1 ci-dessus) ne justifie pas cette complication du modèle. Tout au plus, cela montre l'importance du bon choix du modèle variographique.

3.5. CONTRÔLE DE LA COHÉRENCE DES FORAGES

Il n'est pas question ici de faire une revue complète des données de forage ; néanmoins, un contrôle de cohérence peut être effectué. L'algorithme permet d'estimer, pour chaque forage, sa cohérence en termes d'écart absolu (en mètres) et d'écart relatif (par rapport à l'écart-type de krigeage, sans unité) ; cet algorithme se base sur le principe de validation croisée de krigeage ; le mode de krigeage et les variogrammes sont les mêmes que précédemment.

Ici, sont considérés comme forages déviants ceux qui s'écartent de leur validation croisée de plus de ± 5 m (5 mètres plus haut ou plus bas que l'estimation par validation croisée) et de plus de $\pm 2\sigma$ (un écart entre la validation croisée et la donnée d'au moins 2 fois l'écart-type de validation croisée local) ; pour chaque, l'algorithme met en lumière un petit nombre de forages déviants (Figure 19) : 63 pour la base des alluvions récentes, et 32 pour la base des alluvions anciennes. Ceux-ci sont à faire vérifier en priorité par un géologue. Cette approche peut être itérée, entre détection de points aberrants par le modèle et validation de leur conservation ou retrait par le géologue. La méthode n'a pas été poussée plus loin ici.

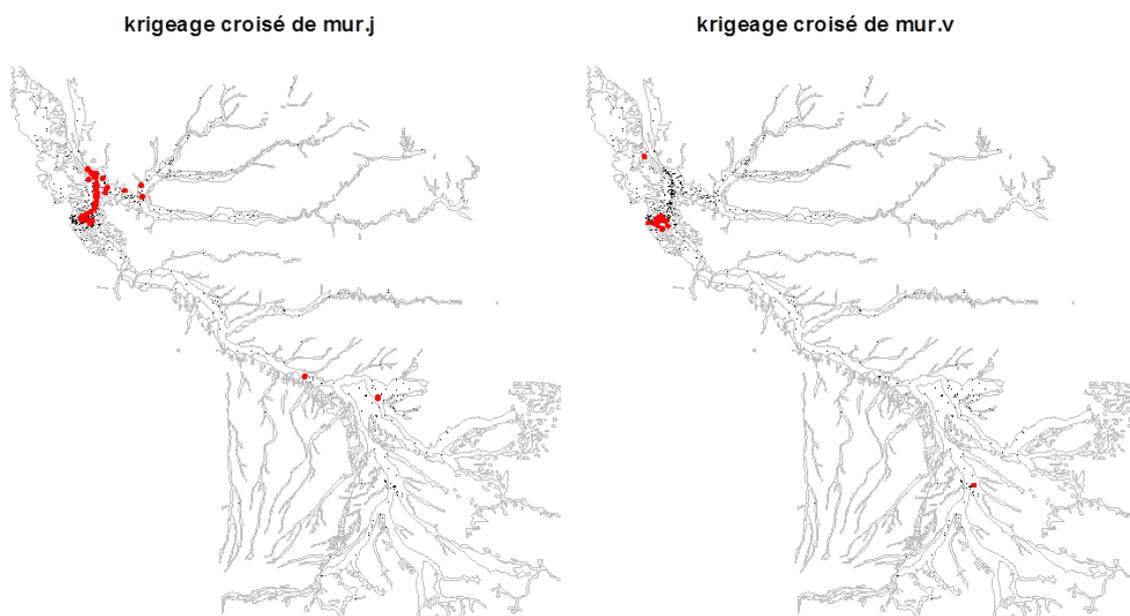


Figure 19 - Forages dont la valeur de la base des alluvions récentes (gauche) ou celle des alluvions anciennes (droite) est considérée comme aberrantes (points rouges).

À titre d'illustration, le contrôle sur le mur des alluvions récentes a été réalisé sur la base du variogramme proposé par l'opérateur au § 3.4.2. (sphérique, 14 km, 92 m²). Le contrôle identifie alors 38 forages à vérifier, principalement localisés sur l'amont de la Gironde (Figure 20). Le variogramme choisi entraîne donc un contrôle plus ou moins libéral, même si ici des mêmes forages sont identifiés dans les deux cas.

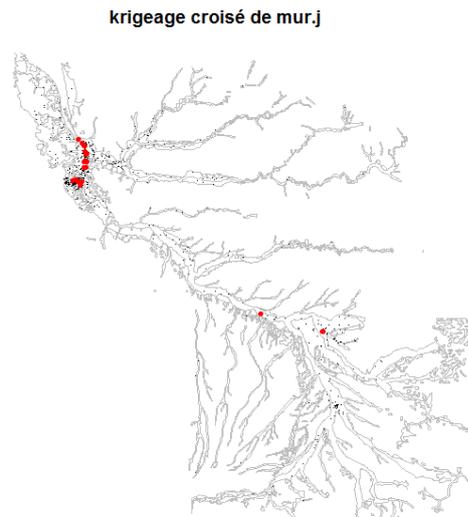


Figure 20 - Forages dont la valeur de la base des alluvions récentes est considérée comme aberrante (points rouges) pour le variogramme proposé par l'opérateur (§ 3.4.2).

3.6. LIMITATIONS ET AVANTAGES

Soulignons ici les limitations, fortes, de la méthode :

- elle ne permet pas de produire un profil (coupe orthogonale à l'axe de la rivière) géologiquement correct des alluvions ;
- l'algorithme d'autocontrainte garantit le respect des inégalités au sens large : si une épaisseur positive est exigée au regard des données de forage, elle sera positive ou nulle dans le modèle final. Par exemple, si un forage donne localement une épaisseur d'alluvions de 10 m : l'inégalité sera validée si le modèle fournit naturellement une épaisseur locale de plus de 10 m ; dans le cas contraire, un point de contrainte sera placé à 10 m ;
- l'anisotropie de la construction finale est le résultat des données, et non de la méthode choisie. Nous ne disposons pas en routine d'approche permettant une description de l'anisotropie locale, ni *a fortiori* de moyen de traiter cette information ;
- le choix du modèle (dérives et variogrammes) influence légèrement le résultat. La dérive agit surtout sur l'allure des cartes loin des données, alors que l'ajustement du variogramme a surtout une influence sur le nombre de points douteux. Nous avons choisi l'approche d'un variogramme automatique sans dérive pour pousser dans le sens d'une automatisation ; une autre approche peut être d'ajuster manuellement les variogrammes, soit à l'initialisation, soit régulièrement, suivant les retraits, modifications et ajouts de données ;
- d'autres sources de données ne sont pas considérées ; une approche plus complète pourrait tirer parti du MNT, d'une régionalisation des comportements fondée sur les lithologies sous-jacentes, ... ;

Cependant, soulignons également les avantages suivants :

- l'approche est très facilement reproductible, puisque des données supplémentaires peuvent être incluses sans autre modification, à condition qu'elles conservent la cohérence globale ;
- l'approche peut être incluse dans une chaîne de travail, d'un côté en se branchant sur un réservoir de sources de données, de l'autre en fournissant des modèles à la volée ;
- l'approche permet au géologue de se consacrer aux problèmes de haut niveau (concepts géologiques, tests d'hypothèses) ;
- le calcul est très rapide (les imports et calculs s'effectuent en moins de 5 minutes sur un ordinateur de bureau, l'essentiel du temps étant passé à la partie d'autocontrainte) ;
- étant simple et flexible, le code peut être enrichi et adapté pour tirer profit d'un algorithme existant.

4. Mise à disposition des informations sur InfoTerre™

InfoTerre™ constitue le portail géomatique d'accès aux données géoscientifiques du BRGM telles que : les cartes géologiques à 1/1 000 000 et 1/50 000, les dossiers de la Banque de données du Sous-Sol et logs géologiques, les cartes des risques naturels et industriels, les données sur les eaux souterraines...etc. InfoTerre™ utilise exclusivement les standards de l'interopérabilité internationale édités par l'Open Geospatial Consortium (OGC). Il est cohérent avec les prochaines obligations techniques de la Directive européenne INSPIRE.

Dans la rubrique « Géologie de surface » une couche dédiée aux modèles d'épaisseur des formations du Régolithe est disponible. Les modèles réalisés en 2014 seront mis à disposition dès 2015.

5. Conclusions et perspectives

Le travail réalisé a permis de produire un modèle géologique des altérites de Loire-Atlantique ainsi que des alluvions de la Garonne et de ses affluents.

Le modèle géologique des altérites de Loire-Atlantique sera étendu en 2015 au département de la Vendée et à la partie nord du département des Deux-Sèvres afin de finaliser la couverture de la partie sud du Massif armoricain. Deux articles scientifiques sont envisagés dans le cadre de cette tâche en 2015, dont un prioritaire sur la publication des résultats pour la valorisation géologique des cartes issues des interpolations du modèle et un second orienté vers la géomorphologie appliquée aux manipulations des données issues du MNT pour la reconstitution des contours des alluvions.

L'approche entreprise pour la modélisation de l'épaisseur des alluvions de la Garonne pourrait être largement automatisée afin de traiter un grand volume de données. Elle est facilement adaptable à d'autres contextes, ainsi qu'à la mise à jour d'une carte au fil de l'arrivée de nouvelles données, tant que celles-ci ne remettent pas en cause la cohérence du modèle. Les incertitudes pourraient être gérées d'une manière plus satisfaisante, afin d'orienter les besoins en acquisition future. Couplée avec une rétroaction vers la Banque du sous-sol (BSS), elle pourrait permettre de repérer les données incohérentes avec le modèle, et donc de dépister et rectifier (ou écarter) des forages mal enregistrés.

En termes de perspectives, au-delà des apports en termes de connaissances des formations superficielles en tant qu'objet géologique, les usages de ces modélisations pour la société sont multiples :

- exploration/production d'eaux souterraines de qualité ;
- évaluation des épaisseurs et des géométries des formations meubles pour la planification des infrastructures ;
- gestion et exploitation des matériaux de carrière (dont épaisseur des mort-terrains) ;
- gestion des terrains excavés (présentant ou non des pollutions) pour les besoins des travaux en génie civil, estimation de la distribution des matériaux et de leurs propriétés géotechniques ;
- évaluation des terrains pour la mise en œuvre des implantations de la géothermie de basse et moyenne énergie ;
- identification de zones potentielles de stockage de déchets.



**Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34