

Structures Géologiques pour les Modèles d'Écoulement des Eaux Souterraines

J.P. Brandenburg

Traductrice: Nouha Samlani

Structures Géologiques pour les Modèles d'Écoulement des Eaux Souterraines

The Groundwater Project

J.P. Brandenburg

*Géologue Principal
Haley & Aldrich, Incorporée
Ann Arbor, Michigan, États-Unis*

*Traductrice : Nouha Samlani
Hydrogéologue, TU Dresden*

*Structures Géologiques pour
les Modèles d'Écoulement
des Eaux Souterraines*

*The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada*

Tous droits réservés. Cette publication est protégée par le droit d'auteur. Aucune partie de ce livre ne peut être reproduite sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit sans l'autorisation écrite des auteurs (pour demander l'autorisation, contactez : permissions@gw-project.org). La distribution et la reproduction à des fins commerciales sont strictement interdites.

Les ouvrages du GW-Project peuvent être téléchargés gratuitement sur gw-project.org. Tout le monde peut utiliser et partager les liens gw-project.org pour télécharger les travaux du GW-Project. Il n'est pas permis de rendre les documents du GW-Project disponibles sur d'autres sites web ni d'envoyer des copies des documents directement à d'autres personnes.

Copyright © 2020 J.P. Brandenburg (L'auteur)

Publié par The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2020.

Brandenburg, J.P.

Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models / J.P. Brandenburg - Guelph, Ontario, Canada, 2020. 25 pages.

ISBN: 978-1-7770541-9-9.

Traduction de Nouha Samlani, 2021.

26 pages

ISBN : 978-1-77470-022-8

Pensez à vous inscrire à la liste de diffusion du Groundwater Project pour rester informé des nouvelles sorties de livres, des événements et des moyens de participer au Groundwater Project. Lorsque vous vous inscrivez sur notre liste de diffusion, vous nous aidez à construire une communauté mondiale des eaux souterraine. [S'inscrire](#).

Citation: Brandenburg, J.P., 2020, [Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models](#). The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.



Rédacteurs du domaine: John Cherry et Eileen Poeter

Conseil d'administration : John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira et Eileen Poeter

Comité de pilotage: John Cherry, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Ying Fan, Warren Wood et Yan Zheng.

Image de couverture : J.P. Brandenburg, 2020

Traductrice vers le français : Nouha Samlani

Sommaire

| | |
|---|-------------|
| SOMMAIRE | iv |
| AVANT-PROPOS THE GROUNDWATER PROJECT | v |
| AVANT-PROPOS | vi |
| AVANT-PROPOS DU TRADUCTEUR | vii |
| PREFACE | viii |
| 1 APERÇU | 1 |
| 2 INTRODUCTION | 2 |
| 3 CONTEXTE ET INTERET | 3 |
| 3.1 MODELES CONCEPTUELS | 3 |
| 3.2 GEOLOGIE LOCALE | 3 |
| 3.3 GEOLOGIE STRUCTURALE | 3 |
| 3.4 STRATIGRAPHIE | 4 |
| 4 CONSTRUIRE UNE STRUCTURE | 5 |
| 4.1 CARTES ET COUPES TRANSVERSALES..... | 5 |
| 4.2 LES SURFACES | 5 |
| 4.3 MAILLAGE | 8 |
| 5 CALCUL DE PROPRIETES | 11 |
| 5.1 EPAISSEUR BRUTE | 11 |
| 5.2 ÉPAISSEUR NETTE | 12 |
| 5.3 RAPPORT ENTRE L'EPAISSEUR NETTE ET L'EPAISSEUR BRUTE | 13 |
| 5.4 PROPRIETES | 13 |
| 6 LE MODELE | 15 |
| 7 CONSTRUCTION D'UN MODELE STATIQUE A PARTIR DE LA CARTOGRAPHIE DE FACIES | 16 |
| 8 CONSTRUIRE UN MODELE STATIQUE A PARTIR DE PROPRIETES A ECHELLE PLUS FINE | 17 |
| 9 CONSTRUCTION D'UN MODELE STATIQUE A PARTIR DE DONNEES LITHOLOGIQUES | 18 |
| 10 RESUME | 19 |
| 11 REFERENCES | 20 |
| 12 EXERCICES | 21 |
| EXERCICE 1 | 21 |
| EXERCICE 2 | 21 |
| EXERCICE 3 | 21 |
| ENCADRE 1 MAILLAGE DE DONNEES SPORADIQUES | 22 |
| 13 SOLUTIONS DES EXERCICES | 24 |
| EXERCICE 1 – SOLUTION | 24 |
| EXERCICE 2 - SOLUTION..... | 24 |
| EXERCICE 3 - SOLUTION..... | 24 |
| 14 A PROPOS DE L'AUTEUR | 25 |
| 15 A PROPOS DU TRADUCTEUR | 25 |
| MODIFICATIONS DE LA VERSION ORIGINALE | A |

Avant-propos The Groundwater Project

Les membres et partenaires de l'ONU chargés de l'eau établissent leur thème annuel quelques années à l'avance. Le thème de la Journée mondiale de l'eau du 22 mars 2022 s'intitule "Les Eaux Souterraines : rendre visible l'invisible". Ce thème est tout à fait approprié pour les débuts des premiers livres du Groundwater Project (GW-Project) en 2020, qui ont pour objectif de rendre les eaux souterraines visibles.

Le GW-Project, une organisation à but non lucratif enregistrée au Canada en 2019, s'engage à contribuer à l'avancement de l'éducation et apporte une nouvelle approche à la création et à la diffusion des connaissances pour la compréhension et la résolution des problèmes. Le GW-Project exploite le site web <https://gw-project.org> comme une plateforme mondiale pour la démocratisation des connaissances sur les eaux souterraines et est fondé sur le principe que :

"La connaissance doit être libre et la meilleure connaissance doit être la connaissance libre".

Anonyme

La mission du GW-Project est de fournir un matériel éducatif accessible, engageant, de haute qualité, gratuitement en ligne dans de nombreuses langues, à tous ceux qui veulent apprendre et comprendre comment les eaux souterraines sont liées et soutiennent les systèmes écologiques et l'humanité. Il s'agit d'un nouveau type d'effort éducatif mondial, car il est basé sur le volontariat de professionnels de différentes disciplines et comprend des universitaires, des consultants et des retraités. Le GW-Project implique plusieurs centaines de volontaires associés à plus de 200 organisations de plus de 14 pays et six continents, avec une participation croissante.

Le GW-Project est une entreprise en cours et se poursuivra avec des centaines de livres publiés en ligne au cours des prochaines années, d'abord en anglais, puis dans d'autres langues, à télécharger partout où internet est disponible. Les publications du GW-Project comprennent également du matériel de soutien tel que des vidéos, des conférences, des démonstrations de laboratoire et des outils d'apprentissage, en plus de fournir, ou d'établir des liens vers, des logiciels du domaine public pour diverses applications sur les eaux souterraines, soutenant ainsi le processus éducatif.

Le GW-Project est une entité vivante, donc des éditions ultérieures des livres seront publiées de temps en temps. Les utilisateurs sont invités à proposer des révisions.

Nous vous remercions de faire partie de la communauté du GW-Project. Nous espérons que vous nous ferez part de votre expérience de l'utilisation des livres et du matériel connexe. Les idées et les volontaires sont les bienvenus !

Le comité de pilotage du GW-Project

Novembre 2020

Avant-propos

L'hydrogéologie appliquée nécessite l'application de modèles conceptuels pour représenter les conditions d'écoulement des eaux souterraines, qui sont essentielles pour résoudre les problèmes de développement et de contamination des eaux souterraines. La compréhension des conditions des eaux souterraines commence par l'assimilation de la géologie et l'utilisation de cette information géologique pour estimer la conductivité hydraulique et la porosité. À son tour, la distribution de la conductivité hydraulique et de la porosité déduite des informations géologiques sont utilisées pour créer des représentations hydrogéologiques d'un système d'écoulement des eaux souterraines. Avant les années 1970, cette conversion était réalisée à l'aide d'un crayon et du papier, mais aujourd'hui, elle est effectuée à l'aide de logiciels facilement disponibles. Cependant, pour utiliser efficacement le logiciel, il est essentiel de comprendre ce processus de conversion. Ce livre: *Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models* (Structures Géologiques pour les Modèles d'Écoulement des Eaux Souterraines – en français), de J.P. Brandenburg, est une introduction au processus de conversion qui est bien établi dans l'industrie pétrolière mais qui a pris du retard dans l'industrie de l'hydrogéologie. Les hydrogéologues savent que les modèles numériques d'écoulement tridimensionnels sont essentiels, mais c'est la conversion des données géologiques en modèle hydrogéologique qui doit être mieux reconnue. Cette conversion est connue sous le nom de "modélisation statique", qui est le précurseur de la "modélisation dynamique". La modélisation dynamique fait référence à la modélisation de l'écoulement et du transport (les aquifères ne bougent pas et sont donc statiques, mais les fluides sont en mouvement et sont donc dynamiques).

J.P. Brandenburg, l'auteur de ce livre, est exceptionnellement qualifié pour cette tâche car il a une formation approfondie en géologie et en écoulement des fluides ; il a entrepris des conversions pour des modélisations statiques et dynamiques sophistiquées dans l'industrie pétrolière ; et il se concentre actuellement sur les conversions pour des modèles tridimensionnels complexes d'eaux souterraines.

John Cherry, Leader du The Groundwater Project

Guelph, Ontario, Canada, Novembre 2020

Avant-propos du traducteur

Le présent ouvrage est une ressource précieuse pour tout étudiant en hydrogéologie ou toute personne intéressée par la modélisation des eaux souterraines. La géologie, constituant le réservoir des eaux souterraines, est un élément essentiel à comprendre et à conceptualiser dès les premières étapes de toute étude hydrogéologique. Ce livre présente un guide étape par étape pour la création d'un modèle géologique ainsi que des astuces et des conseils pratiques inspirés de l'expérience du Dr. JP Brandenburg. Le contenu a été conçu pour rendre abordable le sujet, même pour des personnes n'ayant pas de formation en géologie.

Je suis convaincue que ce transfert de connaissances vers le français est nécessaire pour rassembler les efforts et diffuser les compétences liées aux eaux souterraines dans le monde entier. De plus, je crois que cela constituerait un point de départ pour redonner au monde francophone qui a largement contribué au domaine de l'hydrogéologie.

J'ai basé cette traduction, en particulier les mots techniques, sur ma formation en hydrogéologie qui m'a été fournie en français. Cependant, des vérifications et des recoupements ont été nécessaires, principalement à partir d'articles publiés et de plateformes web fiables. La traduction a pris plus de temps que je ne le souhaitais vu que je rédigeais ma thèse en même temps. Par ailleurs, j'invite les lecteurs à signaler toute erreur typographique ou structurale rencontrée afin de garantir l'amélioration continue de la qualité de ce livre.

Je me souviens de la première fois où j'ai entendu la nouvelle que le Prix de l'Eau de Stockholm avait été décerné au Dr. John Cherry. L'hydrogéologue nouvellement diplômée que j'étais en 2020 l'a pris comme une fierté personnelle, car cela permettait de faire parler des eaux souterraines et de les rendre "visibles". Puis, après un certain temps, j'ai entendu parler du Groundwater Project et de son objectif de diffuser les connaissances sur les eaux souterraines dans le monde entier avec l'aide de volontaires. J'y ai vu l'occasion de contribuer et de rendre la pareille tout en apprenant. Outre mon intérêt pour l'hydrogéologie, le volontariat est pour moi ce que la pluie est pour les aquifères peu profonds : une source de recharge. En effet, ça me submerge d'un sentiment d'accomplissement et d'épanouissement. Si vous ressentez la même chose et souhaitez faire partie de cette noble expérience, n'hésitez pas à rejoindre les équipes de traducteurs et d'éditeurs.

Enfin, j'aimerais remercier le Dr. Everton de Oliveira pour la confiance et les efforts de coordination et Mme Thaís de Paula Marteleto pour les conseils et le soutien qu'ils m'ont apportés lors de mon travail sur cette traduction. Je tiens également à exprimer ma profonde et éternelle gratitude aux professeurs qui m'ont inculqué l'amour de l'hydrogéologie au département Minéral de l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs.

Nouha Samlani
Dresden, Allemagne, Juin 2021

Préface

Les modélisateurs des eaux souterraines devraient être familiers avec et avoir accès à des méthodes systématiques pour traduire la géologie physique de subsurface en une représentation numérique. Les autres hydrogéologues bénéficieront de la compréhension de ce processus. Ce livre présente des techniques pour créer le cadre géologique sous-jacent des modèles d'écoulement des eaux souterraines. Il s'articule autour d'un site hypothétique dont les eaux souterraines sont contaminées, et commence par une discussion sur la collecte des données et l'interprétation géologique, avant de se pencher sur les étapes nécessaires à la construction d'un modèle numérique réaliste. Le lecteur constatera que bon nombre de méthodes et de calculs peuvent être appliqués avec des outils aussi simples que le papier et le crayon. Des liens vers des ressources informatiques accessibles au public sont fournis quand possible.

Remerciements

Je remercie les personnes suivantes pour leurs critiques approfondies et utiles et leurs contributions à cet ouvrage :

- ❖ John G. Solum, Shell International Exploration and Production;
- ❖ Steve Naruk, professeur adjoint, Département des sciences de la terre et de l'atmosphère, Université de Houston ; et,
- ❖ Murray Einarson, expert technique, Haley & Aldrich, Inc.

Les suggestions et contributions d'Eileen Poeter sont appréciées. Je suis reconnaissant de la supervision de Amanda Sills et de la révision de Elhana Dyck, toutes deux du Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada. Je remercie Eileen Poeter (Colorado School of Mines, Golden, Colorado, États-Unis) pour la révision de la copie, la mise en page et la production de ce livre. La figure de couverture a été réalisée à l'aide du logiciel Visual MODFLOW Flex de Waterloo Hydrogeologic. Je remercie Nouha Samlani pour la traduction de ce livre vers le français.

1 Aperçu

Un modèle de la géologie de subsurface est nécessaire avant de simuler l'écoulement des eaux souterraines. L'industrie pétrolière a mieux défini les procédures de modélisation géologique que l'industrie des eaux souterraines, c'est pourquoi The Groundwater Project propose ce livre pour passer en revue le processus de base de la modélisation de la subsurface, y compris les techniques du point de vue des eaux souterraines et du pétrole. Étant donné les intérêts commerciaux de l'industrie pétrolière, l'attention se concentre sur la simulation précise du volume, de l'écoulement et de l'extraction des fluides de la subsurface. Les techniques décrites dans ce livre, en particulier les concepts d'épaisseur nette (l'épaisseur des strates à grain plus grossier qui supportent l'écoulement des fluides) par rapport à l'épaisseur brute (l'épaisseur verticale totale entre les unités limitrophes), sont non seulement importantes pour la production pétrolière, mais aussi pour la simulation des flux d'eaux souterraines. Cela peut intéresser les modélisateurs des ressources en eau qui estiment les volumes d'eau stockés dans les aquifères.

Les modèles numériques construits pour simuler le devenir et le transport des contaminants nécessitent une délimitation plus détaillée de la géologie. Pour de telles applications, la distribution de propriétés géologiques hétérogènes est nécessaire car les contaminants suivent des chemins préférentiels à travers des zones connectées de haute conductivité hydraulique, et de nombreux processus de devenir et de transport dépendent de l'échange de fluides de composition chimique différente entre des zones de conductivité hydraulique différente.

Les techniques de modélisation présentées ici ne concernent que les aquifères clastiques, qui sont composés de sédiments ou de roches sédimentaires issus de l'altération mécanique, essentiellement une combinaison de gravier, de sable, de limon et d'argile. Ces roches peuvent être non consolidées (grains non cimentés et peu compacts) ou consolidées (grains cimentés et compacts). Ces techniques ne s'appliquent pas aux substrats rocheux fracturés, aux karsts ou à d'autres aquifères où la porosité secondaire est la voie d'écoulement dominante.

Le logiciel [Visual MODFLOW FLEX](#) de Waterloo Hydrogeologic est utilisé dans ce livre. Il s'agit d'un logiciel qui facilite la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines avec l'outil de simulation le plus couramment utilisé : le [code MODFLOW](#) de l'USGS. Il a également l'avantage de partager une certaine ascendance avec le logiciel Petrel de Schlumberger, un standard de l'industrie pétrolière et gazière pour la modélisation géologique de subsurface. Le logiciel de modélisation géologique [RockWorks](#) est également utilisé dans ce livre. Il est utilisé pour générer une distribution de matériaux géologiques auxquels on peut attribuer des propriétés hydrauliques qui sont ensuite converties en valeurs pour une grille de modélisation des eaux souterraines telle que celle définie par MODFLOW.

2 Introduction

Les hydrogéologues collaborent avec des géologues et des ingénieurs pour développer une structure qui sert de base à la définition des propriétés d'un modèle d'écoulement des eaux souterraines dans un processus en deux étapes : une modélisation statique suivie d'une modélisation dynamique de l'écoulement des fluides.

Les propriétés inchangées de la géologie sont caractérisées dans le modèle statique, tandis que le modèle dynamique simule l'écoulement et ajuste les propriétés hydrauliques si les changements dans le système d'écoulement modifient les propriétés.

Par exemple, la baisse de la pression pendant l'extraction du fluide entraîne le compactage des matériaux géologiques, ce qui réduit la conductivité hydraulique et la porosité (propriétés dynamiques). Parallèlement, la quantité de sable au schiste dans le réservoir ne change pas (propriété statique). Un modèle statique est construit à l'aide d'outils géométriques et est utilisé pour alimenter un simulateur d'écoulement avec des propriétés hydrauliques. Un modèle dynamique est construit à l'aide d'un simulateur d'écoulement (pour les eaux souterraines, MODFLOW est couramment utilisé) et est utilisé pour ajuster les propriétés hydrauliques en faisant correspondre la simulation avec les données mesurées sur le terrain afin que le simulateur prédise raisonnablement les changements dans le système d'écoulement en réponse aux contraintes. Traditionnellement, le modèle statique était développé par les géologues puis transmis aux ingénieurs pour la simulation dynamique. Cependant, l'expérience a montré que ce processus à sens unique avait certaines limites, car la calibration du modèle dynamique peut fournir des informations supplémentaires sur la géologie, et la compréhension de la géologie peut limiter les paramètres requis pour la calibration. Aujourd'hui, le processus tend à être plus itératif. Dans l'industrie des eaux souterraines, le modèle est développé par un modélisateur qui est souvent compétent en mathématiques, ingénierie et géologie, ou par un groupe d'experts.

La construction de modèles d'eau souterraine tend à être un processus géographiquement intensif, avec une attention particulière aux détails de la carte et une simplification de la subsurface en une série d'aquifères ou d'unités d'écoulement hydrostratigraphiques. C'est certainement l'approche la plus appropriée pour la modélisation à l'échelle régionale ou du bassin versant, et de nombreux outils SIG (Systèmes d'Information Géographique) sophistiqués sont disponibles pour ce type de travail. Cependant, ces outils et méthodes peuvent s'avérer encombrants lorsqu'il s'agit de modèles à l'échelle d'un site, qui peuvent avoir une superficie de seulement quelques milliers ou centaines de mètres carrés.

Le processus de modélisation statique est présenté ici comme une série d'étapes de construction d'un modèle pour un site contaminé hypothétique (le site d'essai). Cela commence par les exercices de réflexion nécessaires à la construction d'un modèle conceptuel utile, puis passe par les techniques de transformation du modèle conceptuel en un modèle numérique tridimensionnel (3D), et culmine dans le processus d'utilisation du cadre pour créer un modèle d'écoulement.

3 Contexte et Intérêt

Avant de commencer tout projet de modélisation, les objectifs du projet doivent être clairement définis. Des évaluations utiles de l'écoulement et du transport peuvent être entreprises à l'aide de modèles analytiques, souvent via une feuille de calcul. Il est bon de commencer avec un crayon et du papier et de voir combien de questions peuvent trouver une réponse avant de construire un modèle numérique compliqué. Au moins, des calculs minutieux fournissent une base de référence pour évaluer la fonctionnalité de base de futurs modèles plus complexes.

3.1 Modèles Conceptuels

La plupart des projets environnementaux concernant les sites d'eaux souterraines contaminées doivent préparer un modèle conceptuel afin de se conformer aux réglementations gouvernementales. Le modèle conceptuel définit les détails de base de l'aquifère contaminé ; sa géométrie, sa profondeur, son épaisseur, la gamme des conductivités hydrauliques, les hauteurs de charge hydrauliques observées et les éléments du système qui influencent le comportement hydraulique, comme les eaux de surface et les puits de pompage. Pour les sites contaminés de moindre étendue, il est probable que les détails du modèle conceptuel soient adéquats pour répondre aux exigences réglementaires, cependant ils ne fournissent pas suffisamment de détails pour que la modélisation puisse prédire efficacement le comportement du système, et donc pour concevoir le plan d'assainissement. Les modèles conceptuels qui décrivent des couches épaisses avec des propriétés homogènes sont un indicateur qu'un examen plus approfondi peut améliorer le modèle.

3.2 Géologie Locale

La familiarité avec la géologie locale est une nécessité pour toute modélisation du sous-sol. Les forages pour les puits d'approvisionnement en eau, les études géotechniques et d'autres applications sont abondants, notamment avec des logs accessibles au public et des interprétations publiées. Il est utile d'examiner les rapports d'autres projets sur les eaux souterraines dans la région pour glaner des informations sur les propriétés et les conditions de la subsurface, et pour apprendre des problèmes rencontrés par d'autres personnes effectuant un travail similaire.

3.3 Géologie Structurale

Les données requises pour identifier les caractéristiques géologiques structurales sont essentielles mais insuffisantes pour de nombreux sites contaminés. Par conséquent, les failles peuvent ne pas être identifiées, et la surface du substratum rocheux est souvent caractérisée comme une surface plane monotone ou une profondeur typique, alors qu'en réalité elle peut avoir une topographie complexe. La surface du substratum rocheux est

extrêmement importante sur les sites où des contaminants liquides denses non aqueux (communément désignés par l'acronyme anglais DNAPL – *Dense Non-Aqueous Phase Liquid*) existent, car les DNAPLs s'enfoncent dans des couches de faible perméabilité et leur migration ultérieure est contrôlée par la topographie de la surface. On trouve des failles pratiquement partout dans le monde. Par exemple, certaines zones de la côte du Golfe du Texas sont affectées par des déformations de surface liées à des failles en décrochement, bien que cette partie de l'Amérique du Nord soit tectoniquement calme. On identifie souvent les petites failles sur les sites contaminés en notant les endroits où les gradients hydrauliques sont plus abrupts. L'exemple du site d'essai présenté dans ce livre contient une petite faille normale.

3.4 Stratigraphie

La dispersion des données sur les sites contaminés pose également des problèmes de délimitation de la stratigraphie. Cependant, davantage de données stratigraphiques ont été collectées ces dernières années, car la complexité stratigraphique s'avère souvent être un facteur limitant essentiel à la réussite de la remédiation. Les méthodes de remédiation qui impliquent l'extraction et l'injection d'eau souterraine peuvent être limitées par le détournement de l'écoulement par des barrières stratigraphiques à faible perméabilité. Les couches minces de sols à grain fin, riches en argile et en matière organique peuvent avoir une grande capacité à piéger les contaminants des eaux souterraines. Une fois que les zones plus perméables de l'aquifère ont été assainies, ces contaminants peuvent se diffuser à nouveau dans les eaux souterraines propres, provoquant un rebond inattendu des concentrations. Des couches de ce type peuvent facilement passer inaperçues à l'aide de technologies plus anciennes telles que le forage à la tarière et le forage rotary. La diagraphie électronique des forages et les outils de détection à poussée directe à haute résolution peuvent être utilisés pour créer des logs avec le niveau de détail nécessaire. Cependant, les principes stratigraphiques sont nécessaires pour déterminer de manière significative comment ces détails s'étendent dans l'espace entre les trous de forage. Des documents d'orientation tels que Schultz et al. (2017) contiennent des procédures et des informations détaillées sur la manière de réaliser ces évaluations stratigraphiques.

Pour les réservoirs de pétrole et de gaz, une grande partie de la caractérisation est effectuée en considérant et en comparant les faciès de dépôt sédimentaire (par exemple, Shepherd, 2009). Par exemple, l'homogénéité relative des faciès éoliens (dunes de sable) permet une meilleure connectivité des réservoirs que la nature stratifiée et fortement disséquée de turbidite canalisées en eau profonde. Ce sujet est digne de son propre manuel et n'est pas abordé ici, sauf pour dire que les projets environnementaux peuvent bénéficier de la même ligne d'enquête. Encore une fois, les sites d'eaux souterraines contaminées sont souvent d'étendue limitée ou le financement pour collecter les données nécessaires fait défaut, rendant une telle analyse stratigraphique impossible.

4 Construire une Structure

La structure géométrique est la base de la modélisation statique. Ceci oriente le site contaminé en trois dimensions par rapport aux forages de définition.

4.1 Cartes et coupes transversales

Pendant de nombreuses années, les cartes et les coupes transversales ont constitué l'ensemble de la structure de la modélisation statique. Grâce aux logiciels informatiques modernes, cette modélisation se fait désormais dans des environnements 3D immersifs qui facilitent la conceptualisation spatiale. Cependant, les cartes et les coupes transversales sous-tendent encore des interprétations 3D de nombreuses façons. Dans cet exemple, des cartes et des coupes transversales traditionnelles sont utilisées pour l'interprétation.

Le site d'essai a une superficie d'environ 9 hectares et a été caractérisé par 14 trous de forage. Les forages sont disposés en deux transects à peu près perpendiculaires et ont été forés à travers des sédiments non consolidés et se terminent au sommet du substratum. La surface du sol se situe entre 70 et 73 mètres au-dessus du niveau de la mer, et s'incline vers le sud. Le substratum rocheux a été rencontré à des profondeurs allant de 40 à 70 mètres sous la surface du sol. Les détails géométriques utilisés pour construire l'interprétation de la structure sont présentés dans la Figure 1 où les deux coupes transversales ont été disposées immédiatement à côté de la carte, tout étant dessiné à l'échelle.

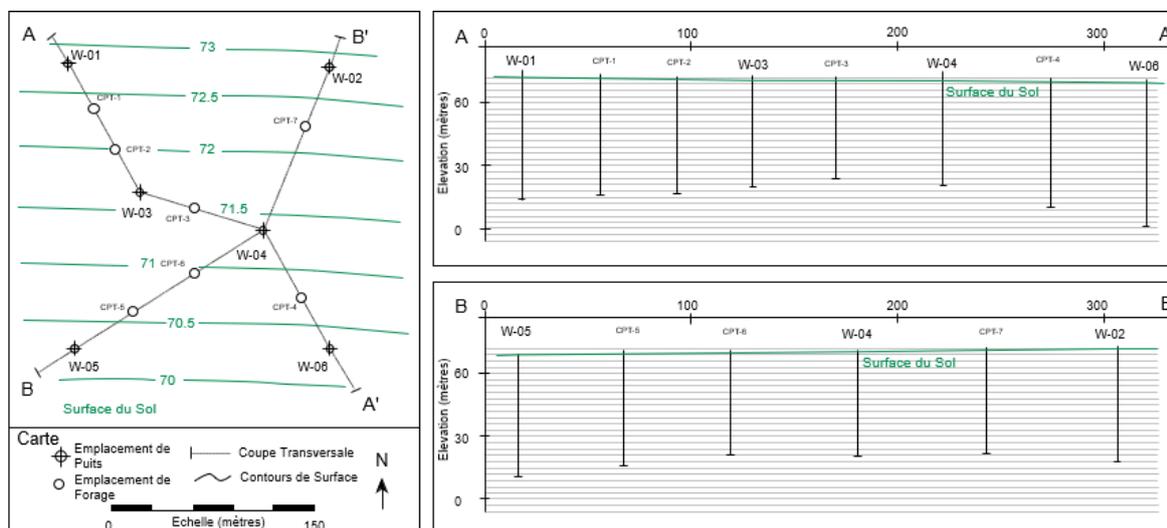


Figure 1 - Interprétation de la structure géométrique (Brandenburg, 2020).

4.2 Les Surfaces

L'interprétation géologique implique la division du sous-sol en couches. Les stratigraphes s'intéressent aux horizons et aux zones représentant des périodes géologiques spécifiques, les géologues structuraux tentent d'identifier les surfaces qui étaient

horizontales à l'origine, et les géophysiciens recherchent des couches présentant des propriétés acoustiques rocheuses contrastées. Quelle que soit l'objectif, la construction de surfaces tridimensionnelles est une partie essentielle de la modélisation géologique de subsurface. La façon la plus robuste de faire ceci est de lier les données définissant la surface d'intérêt, en créant des contours structurels : des cartes avec des lignes d'élévation égale définissant la surface géologique d'intérêt. Les cartes de contours structurels sont analogues aux cartes de contours topographiques.

Le tracé des contours à la main (Figure 2), au lieu de s'appuyer sur un algorithme informatique, présente l'avantage d'intégrer la compréhension humaine des caractéristiques géologiques typiques, alors que les logiciels ne bénéficient pas du bon sens dans les zones où les données sont rares. Les cartes à contours manuels sont utiles pour le contrôle de la qualité des contours générés à l'aide d'un logiciel, en particulier pour les surfaces qui sont discontinues en raison de la présence de failles.

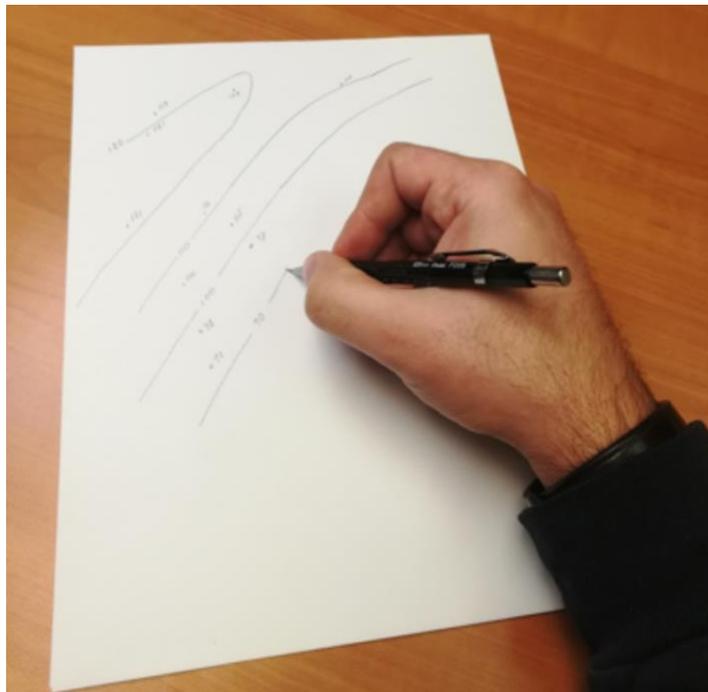


Figure 2 – Le traçage des contours structuraux à la main est une méthode pour l'interprétation géologique (Brandenburg, 2020).

Sur le site d'essai, des logs lithologiques détaillés ont été générés pour chaque trou de forage en utilisant une combinaison d'échantillons collectés pendant le forage et ceux collectés par les dispositifs de détection des trous de forage (Figure 3). Ici, les logs lithologiques ont été générés à l'aide d'un essai au pénétromètre à cône (désigné par l'acronyme anglais CPT – *Cone Penetrometer Test*) : une méthode permettant de détecter directement les changements dans les propriétés mécaniques des matériaux non consolidés pendant le forage. Le CPT est couramment utilisé pour les études environnementales et présente l'avantage de produire des logs à intervalles discrets plutôt qu'une courbe

continue. Pour le site d'essai, les logs lithologiques discrets font la distinction entre le substratum rocheux et six classes d'argile, de limon, de sable et de gravier.

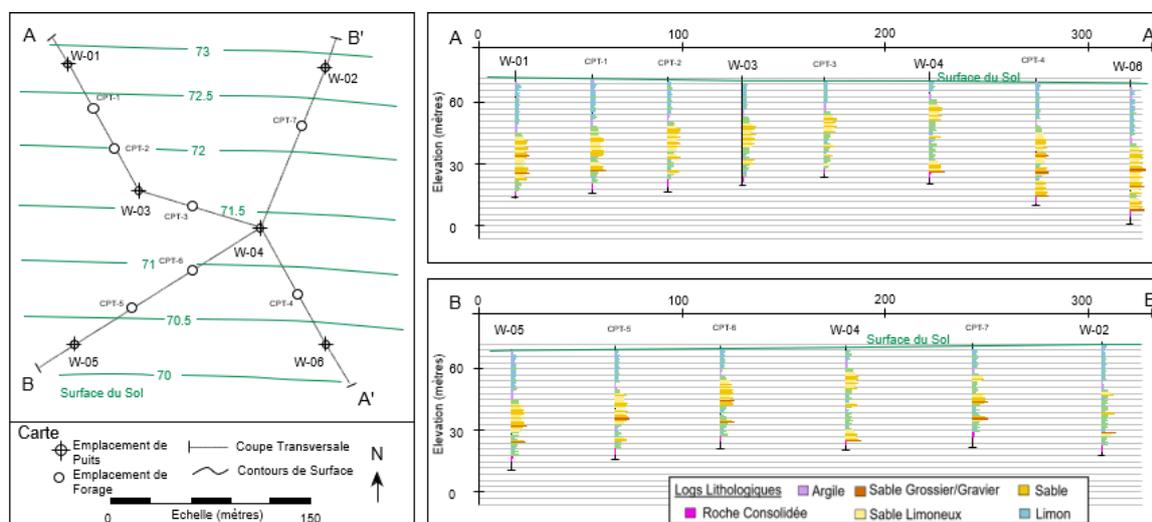


Figure 3 - Logs lithologiques discrets sur le site d'essai. Les contours de surface indiquent l'élévation de la surface du sol au-dessus du niveau de la mer (Brandenburg, 2020).

L'analyse des logs révèle que les sédiments ascendants s'amincissent au-dessus d'un haut substratum rocheux. Les surfaces clés identifiées sont le sommet du substratum rocheux et une argile continue latéralement qui sépare les strates plus grossières des limons et des argiles moins profonds. D'après les conditions légèrement artésiennes observées lors de l'installation des puits de surveillance, la couche d'argile se comporte comme un aquitard fuyant. Elle est cartographiée comme l'horizon stratigraphique H01, comme le montre la Figure 4. Sur la base de la familiarité avec des sites similaires dans la région, l'horizon est cartographié comme un anticlinal grossièrement symétrique.

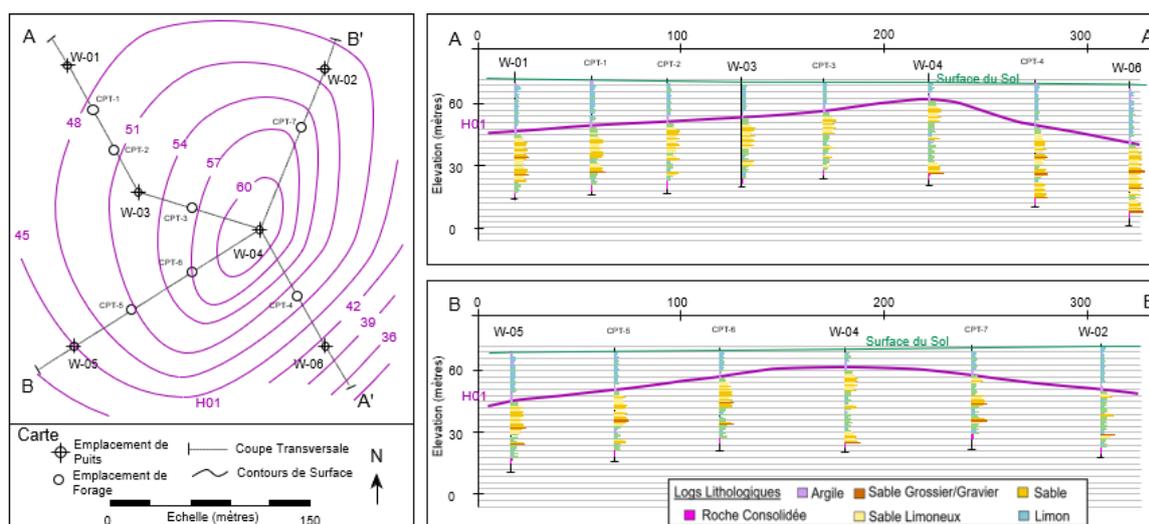


Figure 4 - Horizon stratigraphique H01. Les contours de surface montrent l'élévation de l'horizon stratigraphique H01 au-dessus du niveau de la mer (Brandenburg, 2020).

Le substratum rocheux à cet endroit est connu pour être affecté par des failles normales orientées Nord-Est/Sud-Ouest. L'escarpement a été identifié par une unité à gros grains présente à la base du forage W-04 mais non observée dans les autres puits. L'épaisseur de l'intervalle stratigraphique entre H01 et le substratum rocheux est plus importante dans les puits W-04, CPT-7 et W-02 par rapport à l'épaisseur dans les puits CPT-6, CPT-5 et W-05. Cela indique que la faille est une faille de croissance qui n'atteint très probablement pas le niveau H01. Il en résulte la nécessité d'un décalage de la surface du substratum rocheux dans la carte de contour présentée dans la Figure 5.

Ce type de petites failles d'escarpement enfouies est courant, en particulier dans les régions tectoniquement actives comme l'Ouest des États-Unis. L'interprétation des failles dans les forages est un autre sujet riche qui dépasse le cadre de cet ouvrage. Sur le site d'essai, la faille est importante dans la mesure où la section sablonneuse est plus épaisse et plus grossière du côté de la faille qui est renversée. Si cette caractéristique était importante pour le projet (par exemple, en cas de contamination par des DNAPLs), on pourrait utiliser des méthodes géophysiques sensibles à la profondeur de l'interface sédiments/roche.

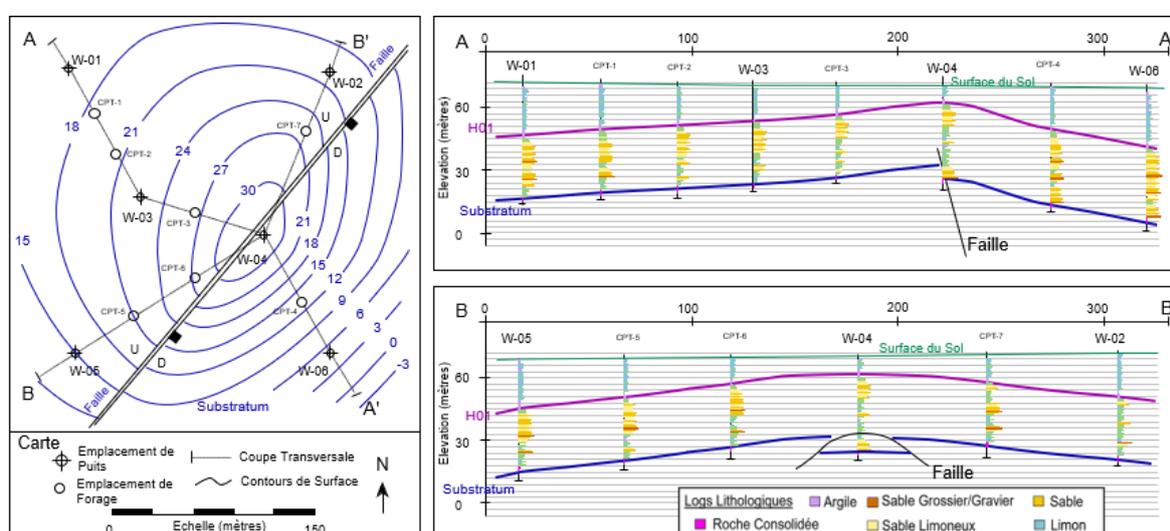


Figure 5 - La surface structurée définissant le sommet de la roche-mère. Les contours de la surface montrent l'élévation du sommet de la roche-mère au-dessus du niveau de la mer. Les contours sont discontinus à travers la faille (Brandenburg, 2020, gw-project.org).

Dans l'industrie pétrolière, les modèles statiques sont axés sur la partie du réservoir contenant des fluides mobiles. Dans cet exemple de site d'essai, la section d'intérêt est la strate grossière entre le sommet du substratum rocheux et H01. Dans les investigations de pétrole et de gaz, le volume de roche entre ces surfaces est appelé réservoir. Ici, il s'agit de l'aquifère. Dans certains projets relatifs aux eaux souterraines, la nature des matériaux à grain fin est importante afin de caractériser leur capacité à stocker ou à libérer de l'eau, ou leur chimie et leur potentiel de transfert de constituants chimiques par diffusion.

4.3 Maillage

Ensuite, les surfaces définies le long des coupes transversales sont étendues à l'aide d'une technique d'interpolation (appelée maillage) afin de définir une vue en plan

bidimensionnelle de leur élévation. Cela permet d'obtenir une élévation pour chaque surface d'intérêt à des intervalles de grille réguliers sur l'ensemble du site et est nécessaire pour les simulations tridimensionnelles. La méthode de construction de grille la plus simple consiste à utiliser des observations ponctuelles, comme l'élévation d'une strate dans des puits particuliers, comme entrée directe dans les algorithmes de grille, ce qui peut être fait dans des programmes commerciaux tels que [EVS](#) ou [Surfer](#). Ces programmes sont principalement destinés à la visualisation des données mais peuvent également être utilisés pour préparer des surfaces maillées pour les modèles.

La qualité des données d'entrée est très importante pour ce processus. Le jeu de données idéal contient des points régulièrement espacés, couvrant toute la zone qui sera maillée, et qui ont été examinés pour détection des incohérences et validés. Avec un tel jeu de données, la plupart des algorithmes produiront la même surface maillée. L'utilisation de données éparées, irrégulièrement espacées et incohérentes est une source majeure d'erreurs dans la modélisation géologique. Les résultats des différents algorithmes de maillage peuvent varier considérablement en fonction des données incohérentes et aberrantes. Parmi les artéfacts de maillage les plus courants, on trouve les isovaleurs en forme d'« œil de bœuf » autour des points de données uniques et les surfaces qui s'étendent de manière significative au-delà des limites des données originales (voir [l'Encadré 1](#) pour des exemples).

Dans les situations où les données sont rares ou irrégulières, une méthode systématique et idéalement basée sur la géologie est nécessaire pour guider l'algorithme de maillage dans cet "espace blanc" entre les observations. Des logiciels sont disponibles pour ce type de modélisation géologique 3D, par exemple [Visual MODFLOW Flex](#) et [RockWorks](#). Pour le site d'essai, la méthode utilisée est la numérisation des contours dessinés à la main pour créer des points de données supplémentaires pour l'algorithme de maillage. Cette méthode est relativement simple car elle ne nécessite aucun logiciel spécial (Figure 6).

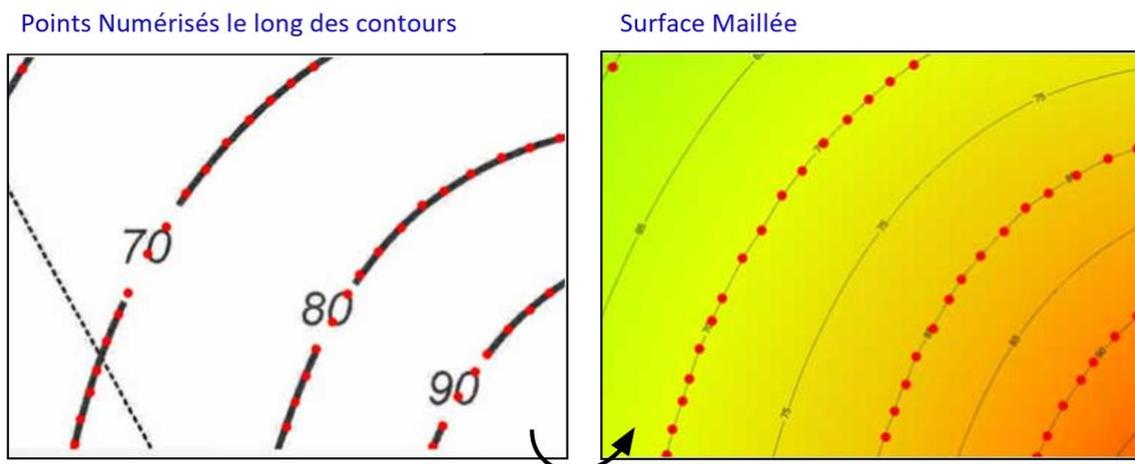


Figure 6 - Les algorithmes de maillage ont besoin de supervision dans les zones où les données sont rares. Ici, les contours dessinés à la main sont numérisés pour fournir des données à l'algorithme de maillage (Brandenburg, 2020).

Dans le modèle du site d'essai, les données de contour manuel ont été numérisées puis maillées avec une discrétisation de 50 par 50 nœuds de grille (les cellules de la grille font environ 15 mètres par 15 mètres). Cette "grille 50x50" est utilisée pour les calculs dans le reste du livre.

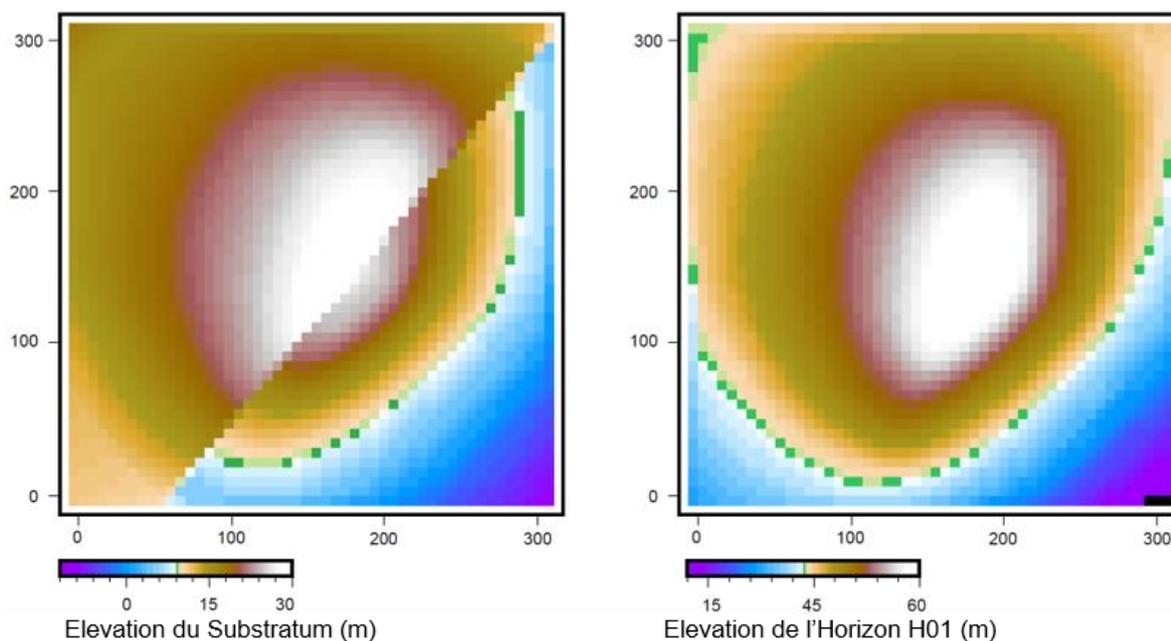


Figure 7 - Surfaces maillées pour le substratum rocheux supérieur (à gauche) et H01 (à droite). Chaque carré est une valeur interpolée de l'élévation de la surface, sa magnitude étant indiquée par la couleur du carré. Tracé avec les outils de cartographie générique Open-Source ([GMT](https://gmt.soest.hawaii.edu/)) (Brandenburg, 2020).

5 Calcul de Propriétés

Une fois que la structure tridimensionnelle est définie et maillée, l'étape suivante consiste à remplir la grille avec les valeurs des propriétés hydrauliques nécessaires à la simulation.

5.1 Epaisseur brute

La propriété la plus simple est l'épaisseur du réservoir ou de l'aquifère, qui correspond à la distance verticale entre les surfaces de délimitation (Figure 8).

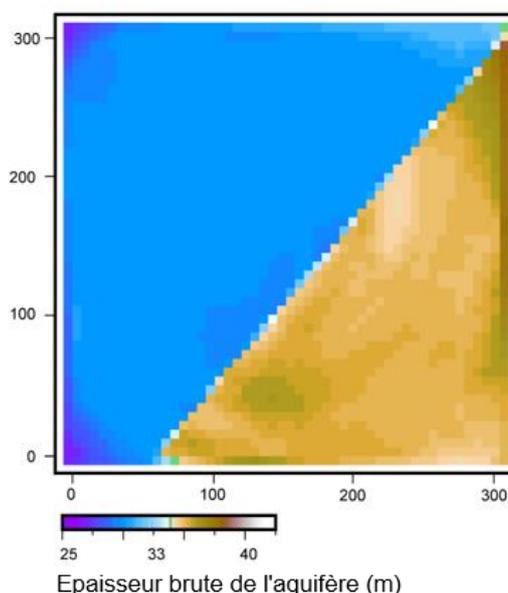


Figure 8 - L'épaisseur de l'aquifère maillé est la différence entre la grille pour H01 et la surface du substratum rocheux (Brandenburg, 2020).

Pour les strates inclinées ou pliées, il peut être nécessaire d'appliquer une correction trigonométrique du pendage (Figure 9). Dans l'exemple du site d'essai, la déformation structurelle est relativement mineure, donc aucune correction de pendage n'est appliquée.

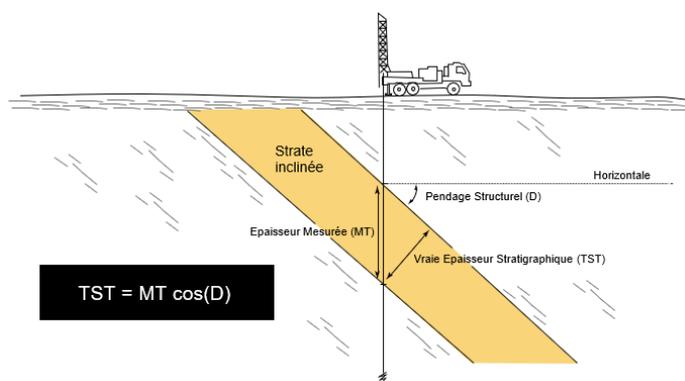


Figure 9 - Calcul de l'épaisseur stratigraphique réelle à partir de la mesure en forage d'une strate inclinée (Brandenburg, 2020).

5.2 Épaisseur nette

Les argiles et les roches apparentées telles que les schistes ont une porosité volumétriquement importante mais déconnectée et représentent un volume de l'aquifère qui n'est pas impliqué dans l'écoulement actif, ce qui est important dans l'évaluation des sites de contamination des eaux souterraines (Payne et al., 2008). La partie participant à l'écoulement du réservoir ou de l'aquifère est identifiée comme "section nette". Pour déterminer cela, une valeur seuil de la rugosité est sélectionnée, et les logs géologiques sont classifiés en blocs de zones nettes (sédiments grossiers) et de zones non nettes (sédiments fins). L'épaisseur de la section nette est calculée pour chaque log, puis utilisée pour créer des contours d'épaisseur nette, comme le montre la Figure 10. Dans ce cas, la carte est une isopaque où les isocontours représentent des lignes d'épaisseur constante plutôt que d'élévation constante.

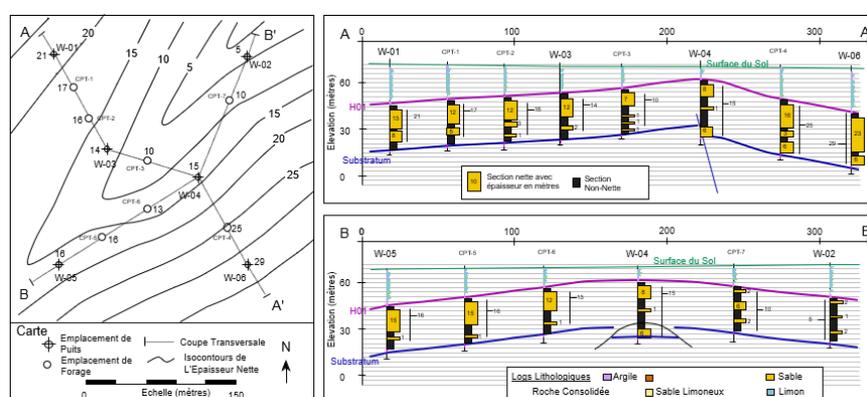


Figure 10 - Quantification de l'épaisseur nette à l'aide de logs discrets et d'une carte isopaque (Brandenburg, 2020).

Les contours d'épaisseur sont ensuite maillés en utilisant le même processus que les horizons dans les étapes précédentes (Figure 11).

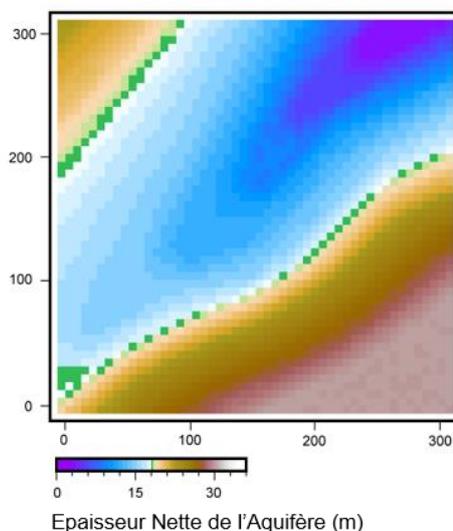


Figure 11 - Carte d'épaisseur nette maillée (Brandenburg, 2020, gw-project.org)

5.3 Rapport entre l'épaisseur nette et l'épaisseur brute

Une fois que les données relatives à l'épaisseur nette et à l'épaisseur brute ont été cartographiées et maillées, il est facile d'établir le rapport entre les deux. L'épaisseur nette divisée par l'épaisseur totale est le rapport entre l'épaisseur nette et l'épaisseur brute, une valeur comprise entre 0 et 1 qui est généralement désignée par l'expression "nette à brute" (Figure 12). Quel que soit le faciès sédimentaire, les couches à fort rapport net/brut ont tendance à être perméables et bien connectées hydrauliquement. Bien que les couches à faible rapport net/brut puissent être perméables au niveau de puits individuels, elles sont beaucoup plus susceptibles d'être fragmentées en compartiments déconnectés.

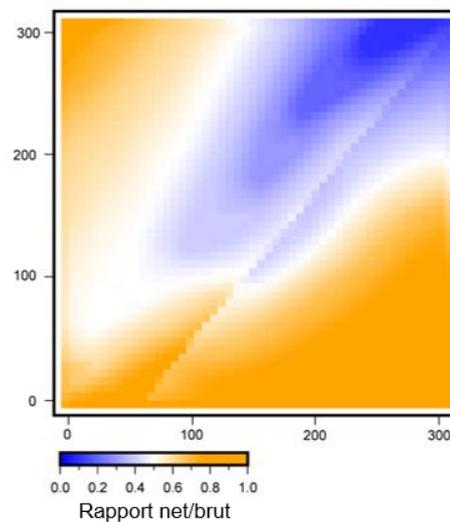


Figure 12 - Rapport net/brut maillé (Brandenburg, 2020).

5.4 Propriétés

Dans le cadre de l'investigation des réservoirs de pétrole et de gaz, on sait depuis longtemps que le rapport entre l'épaisseur nette et l'épaisseur brute dans les réservoirs clastiques présente une corrélation fiable avec plusieurs propriétés du réservoir. La porosité et la perméabilité sont souvent cartographiées directement à partir de la valeur nette à brute en utilisant des fonctions d'interpolation propres à un champ pétrolifère particulier. Sur le site d'essai, la porosité et la conductivité hydraulique sont estimées sur la base de la corrélation entre le rapport net/brut et les mesures de porosité et de conductivité hydraulique effectuées dans les puits d'observation permanents, comme le montre la Figure 13.

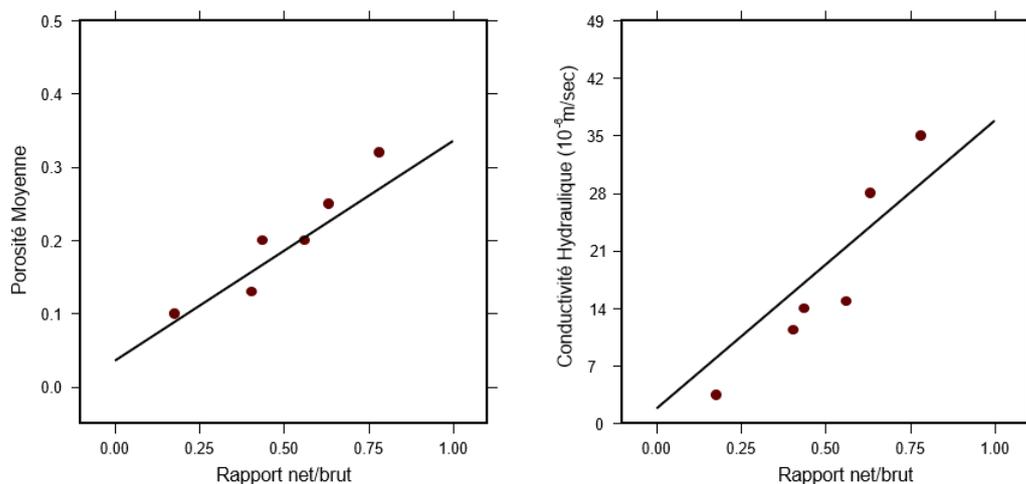


Figure 13 - Relation entre le ratio net/brut de chaque puits et les mesures de porosité et de conductivité hydraulique effectuées dans le puits (Brandenburg, 2020).

Les équations des lignes de la Figure 13 sont (Equations 1 et 2) :

$$Porosité = \phi = 0.3 \left[\frac{N}{G} \right] + 0.035 \quad (1)$$

$$Conductivité\ Hydraulique = K = (35 \times 10^{-6}) \left[\frac{N}{G} \right] + (1.8 \times 10^{-6}) \quad (2)$$

Une fois que ces relations spécifiques à l'aquifère ont été établies, elles peuvent être calculées pour chaque emplacement de la grille en fonction de sa valeur nette par rapport à sa valeur brute afin de créer les propriétés de l'aquifère pour chaque cellule de la grille 50x50 (Figure 14).

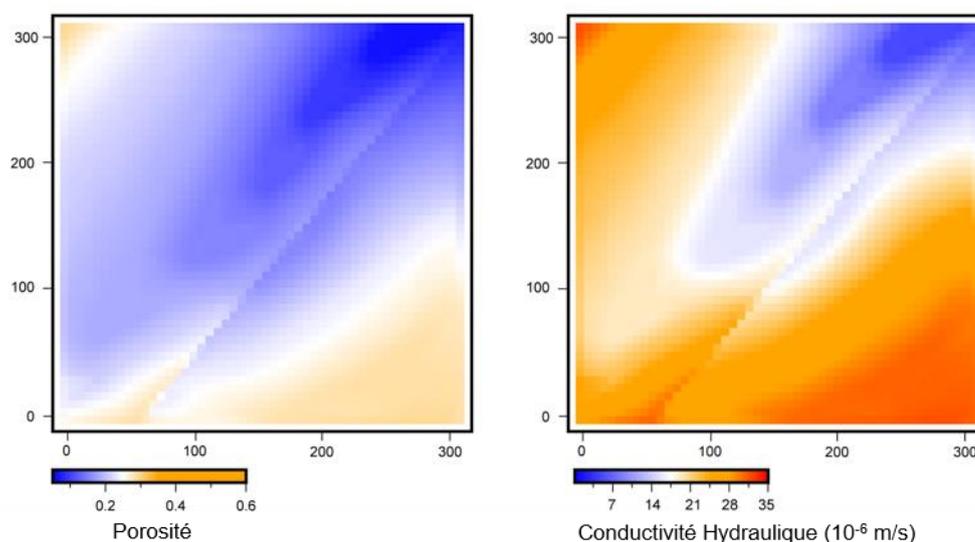


Figure 14 - Porosité et conductivité hydraulique maillées calculées à partir des équations 1 et 2 (Brandenburg, 2020)

6 Le Modèle

Le modèle présenté dans la Figure 15 a été assemblé à l'aide de Visual Modflow FLEX, la grille étant remplie à l'aide des relations de porosité et de conductivité hydraulique de la section précédente.

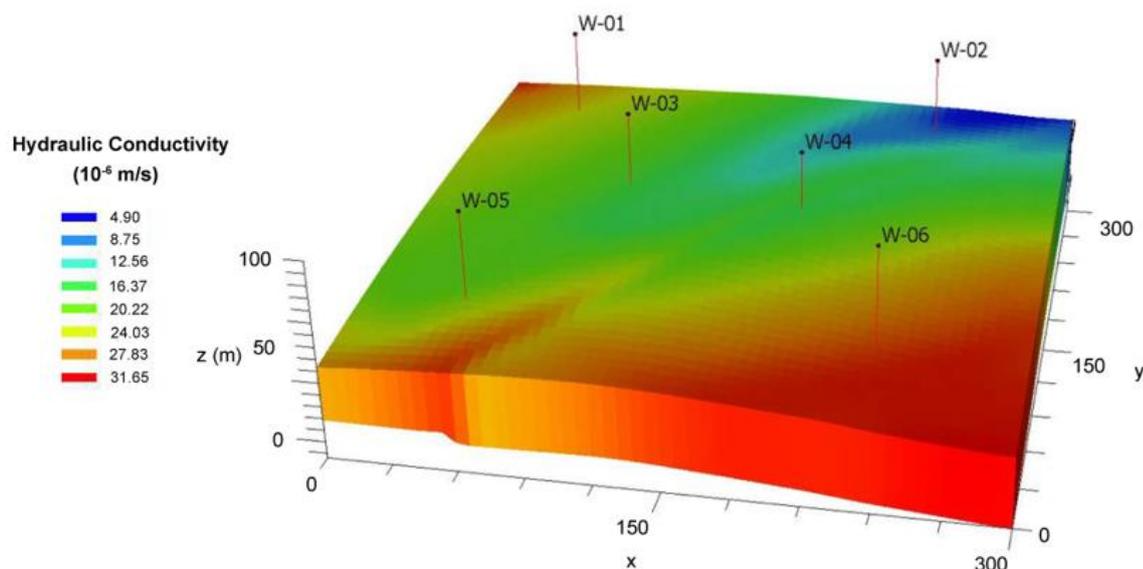


Figure 15 - Conductivité hydraulique cartographiée sur la grille du modèle tridimensionnel dans Visual MODFLOW FLEX (Brandenburg, 2020).

A ce stade, le modèle est prêt à être utilisé pour des simulations dynamiques. Cependant, ce modèle est présenté pour illustrer les principes de délimitation de la subsurface à partir de données de forage. Il représente le site comme une seule couche, alors que les modèles d'eau souterraine nécessitent généralement plusieurs couches pour représenter les systèmes d'eau souterraine avec plusieurs aquifères, des caractéristiques techniques dans un système d'eau souterraine, et/ou une hétérogénéité géologique complexe, en particulier lorsque le transport des contaminants ou la remédiation sont simulés.

Pour un modèle multicouche, les horizons stratigraphiques peuvent être modélisés en utilisant les mêmes méthodes que celles décrites dans ce livre. Des méthodes géostatistiques peuvent également être appliquées ; par exemple, la plupart des logiciels de prétraitement de modélisation des eaux souterraines permettent d'interpoler des propriétés telles que la conductivité hydraulique entre les valeurs observées à l'aide d'un algorithme géostatistique tel que le krigeage.

7 Construction d'un modèle statique à partir de la cartographie de faciès

Une méthode fréquemment utilisée pour capturer l'hétérogénéité dans les modèles statiques pétroliers est la cartographie des faciès. Les faciès géologiques sont des assemblages de roches, de sédiments ou de sols ayant une origine et une histoire géologique communes, qui dans ce contexte conduiraient à un comportement hydrologique similaire. Par exemple, dans un système fluvial, les sédiments de la plaine d'inondation auraient tendance à avoir une abondance de boues à grain fin et en couches, créant une faible conductivité hydraulique, et un rapport de connectivité verticale à horizontale bien inférieur à l'unité. À l'inverse, un dépôt de barres de méandre en gravier aurait une conductivité hydraulique élevée, le rapport de la conductivité verticale à la conductivité hydraulique étant plus proche de l'unité. Dans la cartographie des faciès, chaque cellule de la grille se voit attribuer un code de faciès, qui est ensuite "cartographié" à un ensemble correspondant de paramètres hydrauliques (Figure 16).

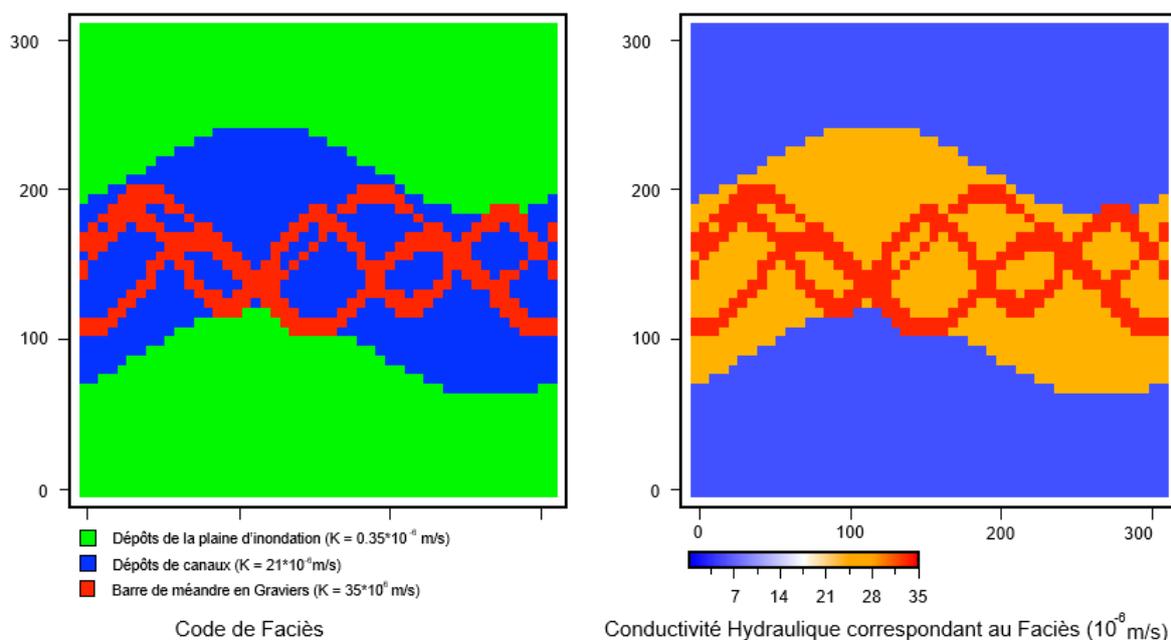


Figure 16 - Propriétés de conductivité hydraulique à partir de la cartographie des faciès (Brandenburg, 2020).

Bien entendu, les faciès ne sont connus qu'à l'emplacement des forages ; le reste doit être attribué par un processus déterminé. Dans le scénario le plus simple, cette attribution est basée sur l'intuition du modélisateur. Cependant, de nombreuses cartes de faciès différentes mais tout aussi valables pourraient être développées. C'est la base de modèles géostatistiques plus avancés qui respectent simultanément les contraintes statistiques et les principes géologiques. Certains de ces modèles sont très complexes et représentent les types d'hétérogénéité observés dans des affleurements rocheux soigneusement mesurés et d'autres études géologiques à une échelle beaucoup plus fine que la résolution de la grille du modèle d'écoulement. L'utilisation de ces modèles comme base d'un modèle d'écoulement nécessite une technique quantitative de mise à l'échelle pour s'assurer que les propriétés d'écoulement à échelle fine sont conservées dans la maille plus grossière.

8 Construire un modèle statique à partir de propriétés à échelle plus fine

Une méthode plus directe, mais qui demande également beaucoup de travail, consiste à alimenter le modèle en utilisant des propriétés hydrauliques "mises à l'échelle" à partir des données de la plus fine échelle disponible. Si des carottes sont prélevées dans un forage, des échantillons de sol ou de roche non perturbés peuvent être envoyés à un laboratoire pour des tests de porosité et de conductivité hydraulique. Cela permet de corréler la lithologie et les propriétés hydrauliques à l'échelle du pouce. Un volume représentatif est ensuite construit avec un schéma de stratification suivant les principaux types de lithologie de la carotte. Chaque couche se voit attribuer une conductivité hydraulique "mixte" qui représente une moyenne statistique des mesures de laboratoire pour cette lithologie. Ces couches sont ensuite converties en une conductivité hydraulique globale verticale (K_v) et horizontale (K_h) (Figure 17).

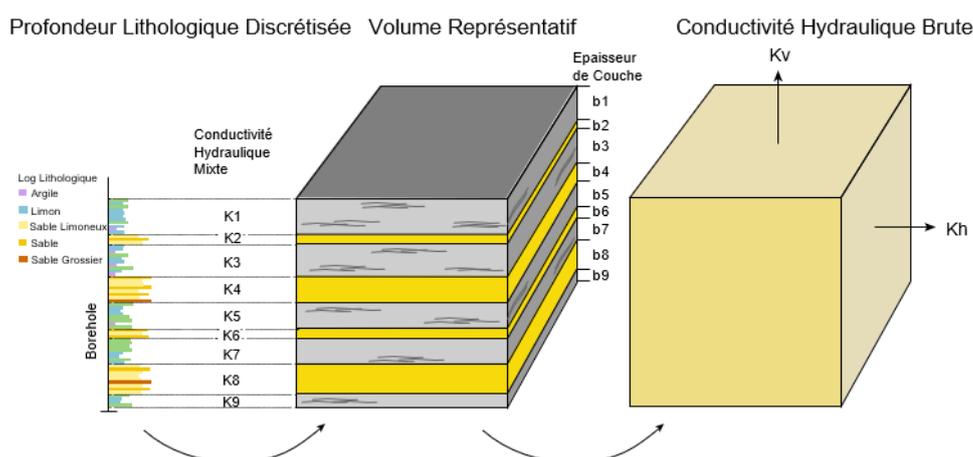


Figure 17 - Mise à l'échelle à partir de la profondeur discrète vers la conductivité hydraulique globale (Brandenburg, 2020).

La conductivité hydraulique horizontale globale est calculée comme la moyenne arithmétique des couches mixtes, comme le montre l'Equation 3 pour l'exemple de la Figure 17.

$$K_h = \frac{K_1 b_1 + K_2 b_2 + K_3 b_3 + K_4 b_4 + K_5 b_5 + K_6 b_6 + K_7 b_7 + K_8 b_8 + K_9 b_9}{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_9} \quad (3)$$

La porosité globale est également calculée par une moyenne arithmétique. La conductivité hydraulique verticale globale est calculée comme la moyenne harmonique des couches mixtes, comme le montre l'Equation 4 pour l'exemple de la Figure 17.

$$K_v = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_9}{\frac{b_1}{K_1} + \frac{b_2}{K_2} + \frac{b_3}{K_3} + \frac{b_4}{K_4} + \frac{b_5}{K_5} + \frac{b_6}{K_6} + \frac{b_7}{K_7} + \frac{b_8}{K_8} + \frac{b_9}{K_9}} \quad (4)$$

En général, la moyenne harmonique est représentative de K pour les couches perpendiculaires à la direction de l'écoulement, tandis que la moyenne arithmétique représente K pour les couches parallèles à l'écoulement. Bien que les moyennes soient précises dans un volume entourant immédiatement le trou de forage, une méthode systématique est toujours nécessaire pour étendre ces résultats au reste du volume du modèle. En pratique, ceci est souvent accompli en combinant la mise à l'échelle avec des méthodes de modélisation stochastique.

9 Construction d'un modèle statique à partir de données lithologiques

Lorsque des données géologiques suffisantes sont disponibles pour définir une structure de modélisation des eaux souterraines, un logiciel de modélisation tel que [RockWorks](#) peut être utilisé pour créer une grille des types lithologiques dans tout le domaine du modèle, avec des propriétés hydrauliques attribuées à chaque type lithologique (Figure 18). Une vue animée du modèle est présentée dans cette vidéo . L'animation de 35 secondes (~80Mb) fait tourner le bassin dans un espace tridimensionnel tout en montrant : la surface du substratum rocheux ; les logs lithologiques utilisés pour déterminer la distribution lithologique ; les diagrammes de clôture le long de quelques sections transversales ; et le modèle solide final découpé séquentiellement de l'Ouest à l'Est et inversement, puis du Sud au Nord et inversement. Les matériaux à grain fin sont représentés en violet, ceux à grain moyen en jaune, et ceux à grain grossier en orange avec les failles en rouge.

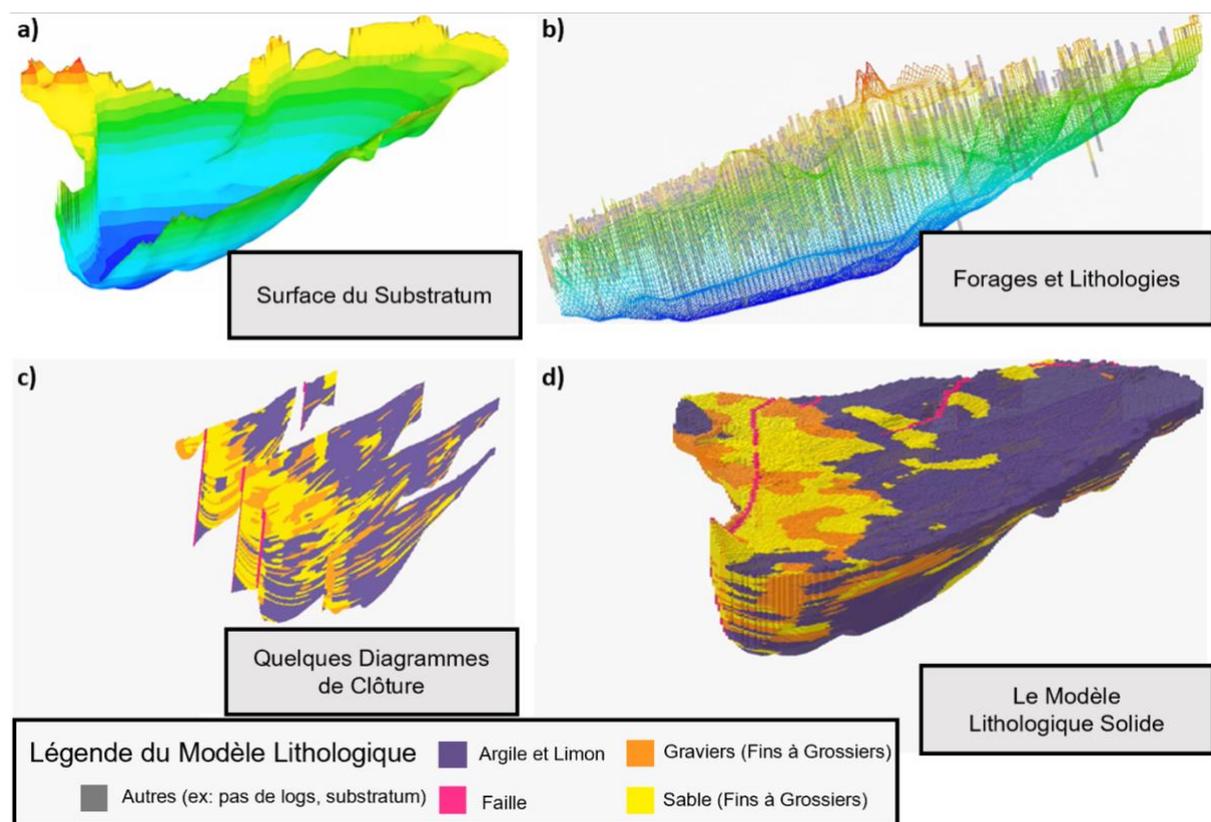


Figure 18 - Modèle lithologique commençant par a) la définition de la surface du substratum rocheux ; b) la définition des types lithologiques dans chaque forage ; c) quelques diagrammes de clôture après interpolation et extrapolation des types lithologiques entre les puits ; et d) le modèle lithologique solide complet. Images fournies par RockWare (2020).

10 Résumé

Les concepts de modélisation de la subsurface présentés dans ce livre l'ont été dans le contexte du processus de travail du modèle statique au modèle dynamique. Chaque projet d'eau souterraine est unique, et de tels processus de travail doivent être considérés plus comme une structure organisationnelle recommandée que comme une procédure stricte. La dispersion typique des contraintes de données au niveau d'un site ou d'une zone d'étude fait de la conceptualisation initiale des modèles structuraux et stratigraphiques la première étape critique du processus.

Les approches de flux de travail ont l'avantage de fournir un processus permettant de s'assurer que les modifications apportées aux hypothèses et aux contraintes de données se propagent à tous les niveaux du projet terminé.

Bien que certaines des techniques abordées ne s'appliquent qu'aux aquifères clastiques, la méthode de construction d'une structure de modèle 3D à partir de cartes, de coupes transversales et de surfaces profilées est universellement applicable. Toutes les modélisations statistiques et lithologiques plus avancées abordées reposent toujours sur une structure 3D robuste. L'esquisse de structures 3D avec un crayon et du papier ou un tableau blanc en équipe est également un excellent moyen d'établir un consensus, de définir

des hypothèses et de faciliter la communication. L'utilisation de cette méthode comme point de départ des projets de modélisation est une bonne pratique.

11 Références

Brandenburg, J.P., 2020, Original figures.

Payne, F., J. Quinnan, and S. Potter, 2008, Remediation Hydraulics, first edition. Chemical Rubber Company (CRC) Press.

RockWare, 2020, www.rockware.com/product/rockworks/.

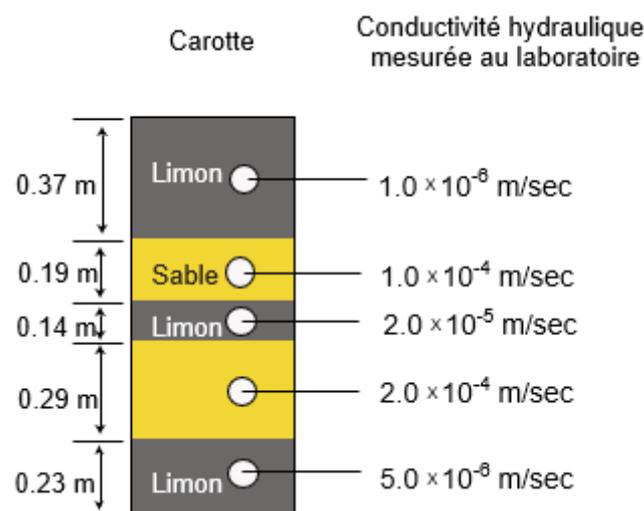
Schultz, M., R. Cramer, C. Plank, H. Levine, K. Ehman, 2017, Best practices for environmental site management: A practical guide for applying environmental sequence stratigraphy to improve conceptual site models. Technical Report. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=536250&Lab=NRMRL.

Shepherd, M., 2009, Oil field production geology, AAPG Memoir 91, The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 350 pages, <https://doi.org/10.1306/M911316>.

12 Exercices

L'une des méthodes d'analyse des carottes de sol et de roches prélevées lors d'un forage consiste à mesurer les propriétés hydrauliques de petits échantillons centimétriques prélevés dans la carotte ("bouchons de carotte") dans un laboratoire. Avant de pouvoir utiliser les résultats pour des simulations d'écoulement, il est nécessaire de calculer les propriétés globales.

Considérons la carotte suivante, prélevée dans un dépôt de limon et de sable stratifiés. La carotte mesure 1,22 mètres de long et est orientée verticalement. La conductivité hydraulique a été calculée pour cinq bouchons de carotte :



Exercice 1

Si seul le flux d'eau souterraine à travers le sable est significatif, quel est le rapport net/brut de cette carotte ?

[Cliquez ici pour la solution de l'exercice 1 ↴](#)

Exercice 2

Quelles sont les conductivités hydrauliques globales verticale et horizontale calculées pour le volume représentatif ?

[Cliquez ici pour la solution de l'exercice 2 ↴](#)

Exercice 3

De quoi auriez-vous besoin avant d'utiliser les propriétés hydrauliques globales calculées pour un modèle d'écoulement ?

[Cliquez ici pour la solution de l'exercice 3 ↴](#)

Encadré 1 Maillage de Données Sporadiques

Avec des données provenant d'un nombre suffisant de forages, tous les algorithmes de maillage devraient reproduire la même surface géologique. Avec des données éparses, les surfaces vont diverger les unes des autres. Pour le site d'essai, le maillage de la surface H01 à l'aide des seules données d'élévation mesurées dans les 14 forages est illustré à l'aide de quelques méthodes différentes dans la **Figure Encadré 1-1**.

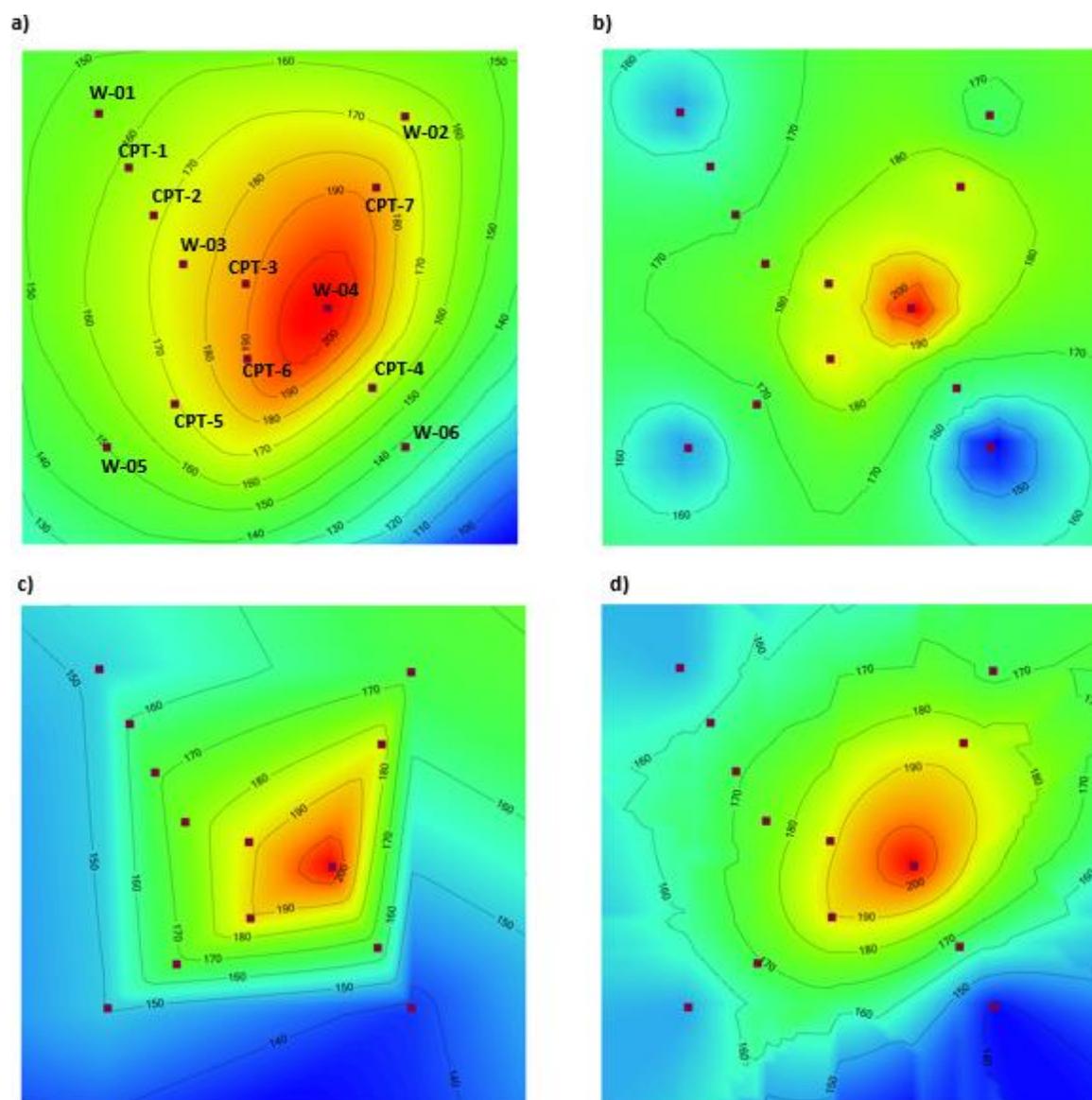


Figure Encadré 1-1 - Maillage de la surface H01 en utilisant uniquement les données d'élévation mesurées dans les 14 forages en utilisant : a) des contours structuraux dessinés à la main représentant la "réalité" géologique ; b) l'algorithme de distance inverse ; c) l'algorithme des voisins naturels ; et, d) l'algorithme de Krigeage. (Brandebourg, 2020, gw-project.org).

Ces images ont été créées avec les algorithmes de maillage disponibles dans Visual MODFLOW FLEX (Waterloo Hydrogeologic, 2020) en utilisant principalement les paramètres par défaut. Avec l'expérience, les paramètres de maillage peuvent être ajustés pour créer une surface plus proche de ce qui est attendu pour H01. Ceci est particulièrement vrai pour le Krigeage, qui est conçu pour des ensembles de données géologiques irréguliers. Cependant, quel que soit le choix de l'algorithme, une certaine conception préalable de la géologie est nécessaire.

La performance des algorithmes de maillage est toujours plus faible près de la périphérie de la grille. Les algorithmes effectuent une interpolation à l'intérieur de la zone délimitée par les points de données, et une extrapolation à l'extérieur. L'extrapolation est par nature plus incertaine, ce qui peut entraîner des artéfacts de maillage lorsque la limite est éloignée des points de données.

[Retour à l'endroit où le texte est lié à l'Encadré 1](#) ↑

13 Solutions des exercices

Exercice 1 – Solution

Si seul l'écoulement des eaux souterraines à travers le sable est significatif, quel est le rapport net/brut de cette carotte ?

$$Net/Brut = \frac{0.19 + 0.29}{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23} = \mathbf{0.39}$$

[Retour à l'exercice 1](#) ↑

Exercice 2 - Solution

Quelles sont les conductivités hydrauliques globales verticale et horizontale calculées du volume représentatif ?

$$Kv = \frac{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23}{\frac{0.37}{1.0 \times 10^{-6}} + \frac{0.19}{1.0 \times 10^{-4}} + \frac{0.14}{2.0 \times 10^{-5}} + \frac{0.29}{2.0 \times 10^{-4}} + \frac{0.23}{5.0 \times 10^{-6}}}$$

$$\text{Conductivité hydraulique globale verticale} = Kv = \mathbf{2.9 \times 10^{-6} \frac{m}{s}}$$

$$Kh = \frac{(1.0 \times 10^{-6} * 0.37) + (1.0 \times 10^{-4} * 0.19) + (2.0 \times 10^{-5} * 0.14) + (2.0 \times 10^{-4} * 0.29) + (5.0 \times 10^{-6} * 0.23)}{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23}$$

$$\text{Conductivité hydraulique globale horizontale} = Kh = \mathbf{6.7 \times 10^{-5} \frac{m}{s}}$$

[Retour à l'exercice 2](#) ↑

Exercice 3 - Solution

De quoi auriez-vous besoin avant d'utiliser les propriétés hydrauliques globales calculées pour un modèle d'écoulement ?

Vous auriez besoin de savoir comment cette carotte s'intègre dans le cadre géologique du modèle. Quelques questions clés à poser : Quelle est l'échelle du modèle par rapport à l'échelle de la carotte ? Cette carotte serait raisonnablement représentative d'unités d'écoulement de quelques mètres d'épaisseur, mais pas d'unités de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Les horizons stratigraphiques sont-ils horizontaux, ou présentent-ils un pendage mesurable ? Si c'est le cas, il peut être nécessaire d'appliquer une correction de pendage, comme dans la section 5. Gardez à l'esprit que la géologie varie probablement autant horizontalement que verticalement, de sorte que des carottes supplémentaires seraient nécessaires pour appliquer cette méthodologie de façon rigoureuse.

[Retour à l'exercice 3](#) ↑

14 A propos de l'auteur



JP Brandenburg est un géologue professionnel chez Haley & Aldrich, où il effectue la modélisation des eaux souterraines pour diverses applications environnementales, minières et de ressources en eau. Il a commencé sa carrière de modélisateur numérique en géodynamique, en étudiant la convection visqueuse dans le manteau terrestre à l'Université du Michigan. Il a ensuite rejoint l'organisation de recherche de Royal Dutch Shell, où il a développé des méthodes de modélisation de la géologie structurale

complexe de la subsurface dans les réservoirs d'hydrocarbures. Après avoir déployé ces techniques pendant plusieurs années au sein de l'organisation d'exploration et de production de Shell, Dr. Brandenburg a changé d'orientation pour se tourner vers l'industrie de l'environnement. En plus de la modélisation appliquée, il continue de s'appuyer sur une expérience interdisciplinaire pour développer de nouvelles méthodes permettant de saisir l'hétérogénéité géologique de subsurface. Dr. Brandenburg a publié de nombreux articles sur la géodynamique, la géologie pétrolière, la géologie structurale et la modélisation numérique.

15 A propos du traducteur



Nouha Samlani est ingénieure en Hydrogéologie et Géotechnique de l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs de Rabat, Maroc. Au cours de son cursus d'ingénieur, elle a eu l'occasion de faire partie de différents types d'institutions liées aux eaux souterraines et aux ressources du sous-sol, comme des agences de bassin hydraulique, des mines de phosphate, des ministères et des bureaux d'études et de conseils en environnement.

Désireuse d'adapter ses connaissances au contexte occidental, elle a intégré le Joint Master Erasmus Mundus : « Groundwater and Global Change » (GroundwatCh). Elle aspire à devenir chercheuse en hydrogéologie. Elle est principalement intéressée par l'hydrogéologie qualitative et environnementale et est enthousiaste des nouvelles technologies au service de l'hydrogéologie telles que la télédétection et l'intelligence artificielle.

Pensez à vous inscrire à la liste de diffusion du GroundWater Project pour restez informé des nouvelles sorties de livres, des événements et des moyens de participer au GroundWater Project. Lorsque vous vous inscrivez sur notre liste de diffusion, vous nous aidez à construire une communauté mondiale des eaux souterraines. [S'inscrire](#).



Modifications de la version originale

Modifications générales :

Les caractères gras dans les équations ont été supprimés, sauf pour la réponse finale dans les solutions des exercices.

Les liens externes en caractères bleus dans le corps du livre ont été remplacés par des caractères noirs.

Le symbole de lien externe a été ajouté après les liens où il manquait.

Le symbole de lien interne a été ajouté après les liens où il manquait.

Les faux signets ont été supprimés du panneau de navigation.

Changements spécifiques :

page iii, ajout d'informations sur les citations et le numéro d'identification du livre.

page 10, "20 par 20" a été remplacé par "50 par 50"

page 10, "20x20" a été remplacé par "50x50".

page 9, un trait d'union a été ajouté dans la légende de la figure 7 entre les mots "Open" et "Source" : "Open" et "Source".

page 14, "20x20" a été remplacé par "50x50".

page 17, le dénominateur de l'équation 4 a été corrigé pour remplacer b_8/K_5 par b_8/K_8 et pour inclure le terme supplémentaire b_9/K_9 .

page 18, un saut de ligne erroné a été supprimé de la dernière référence.