

Document public



Document public

Modélisation maillée des écoulements souterrains Principes, démarche et recommandations

Rapport final – Version 2

BRGM/RP-62549-FR
Octobre 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2012

Y. Barthélémy, J.J. Seguin
avec la collaboration d'A. Wuilleumier, G. Courrioux, B. Bourgine

Vérificateur :

Nom : S. Lallier

Date : 17/11/2015

Signature :

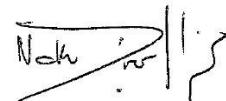


Approbateur :

Nom : N. Dorfliger

Date : 26/11/2015

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots-clés :

Eaux souterraines, Modélisation

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

Yves Barthélémy, Jean-Jacques Seguin (2016) – Modélisation maillée des écoulements souterrains – Principes, démarche et recommandations. Rapport final. BRGM/RP-62549-FR, 140 p., 50 ill., 2 tabl., 3 ann.

Synthèse

Ce document s'inscrit dans une démarche initiée en 2008 par la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du Ministère de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Énergie, (MEDDE¹) pour évaluer l'intérêt de créer un Pôle national de modélisation en hydrogéologie, avec l'objectif de doter la puissance publique d'une structure qui lui apporte expertise scientifique et appui technique opérationnel dans le domaine des écoulements souterrains et de la modélisation numérique.

Les consultations menées en 2009 et l'étude de faisabilité réalisée en 2010-2011 ont montré que le projet de Pôle national de modélisation suscitait un intérêt réel et partagé, avec des attentes fortes et diverses. Des guides méthodologiques font notamment partie des demandes exprimées.

Sans attendre la création et la mise en route du Pôle national de modélisation, la DEB et l'ONEMA ont chargé en 2012 le Brgm de rédiger un premier document sur la modélisation maillée.

Le présent document est essentiellement consacré à la modélisation hydrogéologique maillée, sans référence à des codes de calcul particuliers. Il s'applique à des modèles de taille et de complexité très diverses car les principes et la démarche de modélisation numérique sont invariables. Une attention particulière est cependant portée aux modèles des grands systèmes aquifères parce qu'ils couvrent des configurations hydrogéologiques contrastées et sont à la fois complexes par leur structure géologique multicouche, de grande ampleur par le volume des données impliquées, délicats à mettre en œuvre du fait des difficultés numériques inhérentes aux « gros » maillages, et d'usage récurrent au gré d'actualisations périodiques.

L'objectif est ici de valoriser les expériences acquises et d'analyser les causes de succès et d'échec les plus courantes, afin d'en tirer des enseignements sur les bonnes pratiques en modélisation hydrogéologique maillée, indépendamment des logiciels utilisés. L'expérience montre, en effet, que les difficultés rencontrées relèvent le plus souvent d'une mauvaise appréciation de l'approche numérique à mettre en œuvre, d'un défaut d'organisation et de logistique lors des phases préalables à la modélisation, et/ou d'un manque d'expérience et de suivi au cours de la modélisation elle-même.

Les différents stades du processus de modélisation sont analysés tour à tour, de la synthèse hydrogéologique initiale aux simulations des scénarios prévisionnels, en indiquant les précautions à prendre et les erreurs à éviter aux étapes de conception, construction, calage et exploitation du modèle. Sur ces bases, le document peut servir de guide et d'aide-mémoire aux modélisateurs et aux prescripteurs d'études impliquant une modélisation hydrogéologique.

Ne sont volontairement traités ici que les aspects hydrodynamiques de la modélisation des écoulements souterrains. Le transport hydrodispersif et les couplages thermiques et chimiques sont toutefois mentionnés lorsque leur modélisation ultérieure doit être prise en compte dès la phase de conception et de construction du modèle hydrodynamique, par exemple pour fixer les limites du modèle et définir la discrétisation du maillage.

¹ En 2008, Ministère de l'Énergie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM)

Ces domaines spécifiques pourraient faire l'objet de développements ultérieurs en raison de leur importance pour la remédiation des pollutions de nappe, l'exploitation énergétique du sous-sol, le stockage souterrain, etc.

Le document est structuré en dix grands chapitres décrivant les étapes successives d'un projet de modélisation :

1. Choix de l'approche numérique la mieux adaptée au problème à traiter : solutions analytiques pour résoudre rapidement nombre de problèmes courants, ou modèles numériques adaptés à différents contextes hydrogéologiques (modèles globaux de type boîte noire ou de type conceptuel, modèles spatialisés). Le rapport se focalise ensuite exclusivement sur les modèles maillés.
2. Équipe de modélisation : lorsqu'il couvre une grande extension, un projet de modélisation maillé est un travail pluridisciplinaire requérant une équipe expérimentée capable de valoriser l'ensemble des données disponibles, et collaborant dès le début du projet pour gagner en efficacité.
3. Grandes étapes d'une modélisation hydrogéologique : énumération et rapide description des principales étapes du processus, détaillées ensuite dans les chapitres suivants.
4. Synthèse hydrogéologique préalable à une modélisation maillée : ce chapitre décrit les différentes composantes du travail de collecte, traitement, analyse, interprétation et synthèse des données qui vont être utilisées pour la modélisation. Étape indispensable avant la construction d'un modèle d'écoulement souterrain, ce travail de synthèse, plus ou moins conséquent selon le volume de données à traiter et la complexité du système aquifère à modéliser, doit se concrétiser par un support écrit qui servira ensuite de référence pour la modélisation hydrogéologique *stricto sensu*. À titre indicatif, un sommaire-type détaillé est proposé en Annexe 1 pour les contextes les plus complexes. Au final, le rapport de synthèse propose un modèle conceptuel d'écoulement schématisant le fonctionnement hydraulique du système aquifère, élément capital car le modèle numérique n'en est ensuite qu'une transposition numérique.
5. Modélisation géologique 3D des systèmes aquifères complexes : si le réservoir d'un aquifère monocouche se définit très simplement par les surfaces de son « toit » et de son mur (souvent assimilé à un substratum « imperméable »), il en va tout autrement des systèmes aquifères multicouches. Pour ces derniers, la difficulté d'élaborer une représentation numérique fidèle et cohérente de la structure géométrique des formations modélisées justifie le plus souvent de faire appel à un modeleur géologique 3D. Ce type d'outil est spécifiquement conçu pour exploiter et combiner les caractéristiques géométriques et structurales inhérentes aux données topographiques, géologiques et géophysiques. La représentation numérique des réservoirs et des écrans semi-perméables délivrée par un modèle géologique offre les meilleures garanties de cohérence et de conformité avec les données de terrain. Elle peut ensuite être transférée au logiciel de modélisation hydrogéologique, puis actualisée à moindre coût lorsque de nouvelles données géologiques et géophysiques sont disponibles.

6. Construction d'un modèle maillé, à travers les différentes étapes qui permettent de transcrire le modèle conceptuel d'écoulement - issu de la synthèse hydrogéologique préalable - en un jeu de fichiers numériques utilisés par le logiciel de modélisation. Les étapes de construction d'un modèle maillé sont nombreuses : définition de l'extension horizontale et verticale du domaine à modéliser ; sélection des formations à considérer ; choix d'un logiciel de modélisation ; schématisation des conditions hydrauliques aux limites du modèle ; représentation du réseau hydrographique ; construction du maillage ; définition de la géométrie du système aquifère par assignation des cotes de toit et/ou de mur à chacune des mailles du modèle ; introduction des propriétés hydrogéologiques (perméabilité/transmissivité, emmagasinement) de chaque formation, etc.
7. Calage du modèle : ce chapitre, le plus volumineux du rapport, montre que les deux phases de calage usuellement préconisées, en régime hydraulique permanent puis en régime transitoire, ne peuvent souvent pas être découpées, du moins pour les grands systèmes aquifères faisant preuve d'une forte inertie. Description des jeux de données requis pour le calage (entrées/sorties, conditions aux limites, conditions initiales, paramètres de calage, observations de terrain servant de références pour le calage), règles à respecter pour ne pas biaiser la modélisation, recommandations pour faciliter le calage du modèle.
8. Validation du modèle : cette étape importante du processus de modélisation sert à vérifier que le modèle est capable de reproduire le comportement du système aquifère lorsque celui-ci est soumis à un ensemble de sollicitations internes et externes. À cet effet, le modèle calé est utilisé pour simuler une(des séquence(s) de données volontairement mise(s) de côté pendant la phase de calage ; les résultats de simulation (charges, débits) sont ensuite comparés aux observations de terrain. En pratique, la difficulté de l'opération réside surtout dans le choix de la période d'observation à exclure de la phase de calage. Plusieurs recommandations sont données pour que la validation devienne une étape effective du processus de modélisation, concourant au renforcement progressif de la représentativité et de la robustesse du modèle.
9. Scénarios prévisionnels : pour les simulations prévisionnelles, il faut en général commencer par élaborer des chroniques hydroclimatiques réalistes, sur la base d'une analyse statistique des observations existantes et d'hypothèses probabilistes en adéquation avec les scénarios à traiter. Différentes approches peuvent être utilisées pour constituer une ou des chroniques hydroclimatiques destinées aux scénarios prévisionnels. Quelques pistes sont proposées pour réduire le poids de l'incertitude hydroclimatique sur les résultats des simulations prévisionnelles.
10. Rapport de modélisation hydrogéologique : le rapport qui clôt la modélisation décrit les différentes étapes du travail effectué, de l'analyse des données d'entrée aux résultats des scénarios prévisionnels, sans omettre d'exposer et de commenter les principales étapes de calage, les hypothèses sous-jacentes, les résultats de calage, les bilans hydrauliques, les connaissances acquises sur le fonctionnement du système aquifère, les incertitudes résiduelles, les propositions pour y remédier, etc. Un sommaire-type de rapport descriptif d'une modélisation hydrogéologique maillée est proposé en Annexe 3.

L'archivage des jeux de données constituant un modèle hydrogéologique est une composante essentielle du processus de modélisation, en particulier pour les modèles de gestion des systèmes aquifères régionaux qui sont destinés à être périodiquement actualisés. Ce sujet complexe n'est toutefois pas traité ici car il fait l'objet d'un rapport spécifique.

Synthèse opérationnelle

Cette synthèse opérationnelle reprend les grandes lignes et recommandations exposées dans les chapitres suivants. Elle peut servir d'aide-mémoire pour faire un point rapide sur un projet de modélisation hydrogéologique. Chaque titre renvoie au chapitre concerné.

Choix de l'approche numérique la mieux adaptée au problème à traiter (Chapitre 2)

Solutions analytiques (Ch. 2.1)

De nombreuses solutions analytiques (Ch. 2.1) ont été développées au fil du temps pour apporter des réponses numériques aux problèmes classiquement posés par l'exploitation des eaux souterraines. Elles sont utilisées pour le dimensionnement hydraulique d'aménagements souterrains en zone urbaine, rurale ou côtière. Les conditions d'application sont assez restrictives (milieu homogène, infini ou semi-infini, régime hydraulique permanent ou régime transitoire en réponse à une impulsion brève ou continue, etc.), mais elles peuvent être étendues par le principe de superposition, à la fois dans l'espace avec la méthode des images, et dans le temps avec des techniques de convolution.

Il est ainsi possible de calculer de façon analytique l'impact hydraulique d'un pompage à débit variable, l'impact global et les interférences entre les puits d'un champ captant constitué de plusieurs ouvrages de pompage exploités à des débits variables, la propagation en nappe d'une onde de crue ou d'une onde de marée affectant un cours d'eau ou un plan d'eau voisin (cette fonctionnalité est très efficace pour évaluer les niveaux piézométriques de hautes eaux dans une nappe bordée par un cours d'eau, situation fréquente en milieu urbain où les parkings souterrains, sous-sols, lignes de métro sont menacés d'inondation par les remontées de nappe résultant de crues sur le cours d'eau).

Modèles numériques de simulation (Ch. 2.2, 2.3)

Lorsque les solutions analytiques ne sont plus pertinentes, différents types de modèles numériques peuvent être mis en œuvre : modèles globaux de type boîte noire, modèles globaux et semi-globaux de type conceptuel, modèles spatialisés (ou maillés). Ces types de modèles ne sont pas interchangeables, chacun ayant ses spécificités propres.

Les modèles spatialisés (maillés) offrent la plus grande flexibilité, et de ce fait la plus large gamme d'utilisation. Ils sont incontournables pour représenter les systèmes aquifères multicouches. Ils ne peuvent cependant pas être systématiquement utilisés car, s'ils sont bien adaptés aux environnements sédimentaires (milieux poreux et assimilés), ils ne conviennent pas, en général, aux milieux discontinus tels que milieux fissurés et milieux karstiques. Ces deux types de milieux peuvent, en revanche, être simulés efficacement par des modèles globaux puisque ceux-ci représentent l'hydrosystème comme un tout, indépendamment de sa structure interne.

Dans le domaine de la prévision des niveaux et des débits en fonction de scénarios climatiques, les modèles globaux sont performants du fait de leurs temps de calcul très brefs, à condition toutefois que les prélèvements et les caractéristiques physiques du bassin versant modélisé ne soient pas sensiblement modifiés pendant la période modélisée.

Équipe de modélisation (Chapitre 3)

La modélisation hydrogéologique maillée se situe à la croisée de plusieurs disciplines : sciences de la terre, informatique et calcul numérique notamment. C'est donc une activité pluridisciplinaire, requérant de conjuguer une bonne pratique de la modélisation, une expérience approfondie en hydrogéologie et disciplines connexes, et une connaissance détaillée du contexte hydrogéologique à modéliser. Par défaut, le modélisateur doit pouvoir s'appuyer sur un hydrogéologue « régional » qui lui fait bénéficier de sa connaissance de la zone d'étude tout au long du processus de modélisation.

L'ergonomie croissante des logiciels de modélisation peut laisser penser que la modélisation hydrogéologique est un exercice aisément maîtrisé dès lors qu'on a fait le tour des fonctionnalités offertes par le logiciel. En réalité, il n'en est rien. S'il suffit de quelques heures pour explorer les menus d'un logiciel de modélisation, il faut en général plusieurs années de pratique pour maîtriser les subtilités de cette discipline scientifique à part entière, pour concevoir et construire un modèle hydrogéologique pertinent, ni trop simple ni trop complexe, pour procéder à son calage avec efficacité et réalisme, vérifier les résultats de simulation en les comparant à ceux d'approches analytiques simplifiées, acquérir les ordres de grandeur des paramètres hydrogéologiques, conduire des simulations prévisionnelles pertinentes, etc.

Comme de nombreuses disciplines, l'activité de modélisation hydrogéologique s'enrichit beaucoup de discussions et d'échanges entre opérateurs expérimentés, et il y a sans conteste un effet de masse critique pour une équipe de modélisation, sa compétence et son expérience croissant en général avec sa taille, la diversité des cursus de ses membres et l'étendue de leur pratique. Autre avantage d'une équipe de modélisation étoffée : sa pérennité vraisemblable, approximativement corrélée à son effectif. Pour développer des modèles de gestion de grands aquifères régionaux destinés à être régulièrement actualisés et exploités, il s'agit là d'un point capital.

En pratique, on ne peut qu'expressément recommander aux maîtres d'ouvrage d'attacher beaucoup d'importance à la rédaction d'un cahier des charges détaillé, réaliste, et bien ciblé sur les objectifs à atteindre, puis à la sélection d'un prestataire expérimenté en modélisation hydrogéologique, tant la composition et l'expérience de l'équipe qui mènera à bien le projet sont des éléments clefs pour sa réussite.

Chronogramme indicatif d'un projet de modélisation (Chapitre 4.8)

Sans que l'on puisse en faire une règle générale :

- Les temps requis pour mener à bien chacune des grandes étapes d'une modélisation d'écoulement souterrain, à savoir la synthèse hydrogéologique préalable, une éventuelle modélisation géologique 3D, puis le calage du modèle et la simulation de scénarios, sont souvent de même ampleur, de quelques jours à quelques mois chacune selon la complexité du système aquifère, la diversité des sollicitations auxquelles il est soumis, la quantité des observations disponibles pour le calage, et la précision requise pour les simulations prévisionnelles.

- Parce qu'elles font appel à des compétences différentes et occupent sensiblement la même durée, la synthèse hydrogéologique initiale et l'éventuelle modélisation géologique 3D peuvent souvent être menées de front, par des équipes distinctes travaillant de façon concertée, pour s'achever de façon concomitante. Ce faisant, la modélisation géologique 3D ne retarde pas le processus global de modélisation, tout en lui faisant faire un indéniable saut qualitatif et en facilitant grandement les mises à jour ultérieures lors de l'acquisition de nouvelles données géologiques.

La diversité des environnements et des problèmes à traiter par modélisation hydrogéologique ne permet pas d'indiquer des durées moyennes de construction, calage et exploitation des modèles d'écoulement, la fourchette allant de quelques jours à plusieurs mois pour chacune des phases de travail. Alors que quelques jours suffisent en général pour modéliser l'impact d'un petit champ captant, l'expérience montre qu'il faut tabler sur 1.5 à 3 ans pour un système aquifère multicouche d'extension régionale, cette durée globale se répartissant approximativement en 9 à 18 mois pour mener en parallèle la synthèse hydrogéologique et la modélisation géologique 3D, suivis d'un temps équivalent pour la construction, le calage et l'exploitation du modèle d'écoulement souterrain.

Synthèse hydrogéologique préalable à une modélisation maillée (Chapitre 5)

Étapes préalables à la modélisation (Ch. 5.1)

Un travail significatif de collecte, traitement, analyse, interprétation et synthèse des données qui vont être utilisées pour le modèle est toujours nécessaire avant d'entamer la phase de modélisation elle-même. Ce travail de synthèse débouche sur un modèle conceptuel d'écoulement qui schématise le fonctionnement hydraulique du système aquifère. Lorsque le contexte géologique et structural est complexe, une modélisation géologique 3D conduite en parallèle peut apporter une plus-value indéniable, sans allonger la procédure globale parce que la structure géologique est ensuite exportée vers le modèle d'écoulement dont elle va constituer l'ossature.

En pratique, on constate que (i) l'absence ou l'insuffisance de synthèse hydrogéologique initiale, menée dans une perspective de modélisation hydrogéologique, (ii) l'impasse faite sur une modélisation géologique 3D lorsque le système aquifère est complexe, et/ou (iii) un télescopage entre ces différentes tâches, sont des causes fréquentes de déboires, notamment pour les modèles de grande ampleur.

On ne saurait donc trop recommander de bien individualiser ces différentes tâches et de les formaliser par des documents écrits, qui serviront ensuite de référence pour la modélisation hydrogéologique *stricto sensu*.

Synthèse hydrogéologique destinée à une modélisation d'écoulement souterrain (Ch. 5.2)

Un modèle d'écoulement souterrain intègre des données de différente nature, qu'il faut avoir analysées et interprétées au cours d'une phase de synthèse hydrogéologique préalable. Plus ou moins conséquente selon le volume de données à traiter et la complexité du système aquifère à modéliser, la synthèse hydrogéologique doit se concrétiser par (i) un support écrit qui servira ensuite de référence pour la phase de modélisation s.s., (ii) des fichiers de données qui seront utilisés pour construire et caler le modèle d'écoulement.

Cette synthèse hydrogéologique étant destinée à fournir les informations et données nécessaires à une modélisation numérique, elle doit aussi proposer un modèle conceptuel d'écoulement et apporter les éléments chiffrés qui permettront ensuite de construire le modèle numérique d'écoulement et de le caler pour restituer au mieux les observations et mesures de terrain retenues comme références.

En pratique, la représentativité d'un modèle d'écoulement dépend étroitement de (i) la densité et la qualité des données utilisées pour construire le modèle numérique et le caler, (ii) la pertinence des hypothèses de modélisation adoptées, (iii) la qualité de restitution du comportement du système aquifère simulé par le modèle en fin de calage.

Ceci étant, quel que soit le soin apporté aux différentes étapes de modélisation, la représentativité et la capacité prédictive d'un modèle restent inscrites dans la plage de fonctionnement sur laquelle a porté le calage, en termes de débits, charges hydrauliques et conditions hydroclimatiques. Plus on s'éloigne de la zone de fonctionnement balayée pendant le calage, plus le risque augmente que les prévisions du modèle s'écartent des évolutions réelles du système aquifère.

Pour élargir le champ d'exploitation futur du modèle, il faut donc veiller, dès la phase de synthèse hydrogéologique initiale, à sélectionner pour le calage les périodes qui intègrent les plus hauts/bas niveaux/débits observés.

Pour les systèmes aquifères à forte inertie, une analyse rétrospective des évolutions socio-économiques ayant marqué le domaine d'étude est souvent indispensable pour comprendre les évolutions observées sur la nappe, notamment lorsque celles-ci résultent de modifications des pressions anthropiques dont les conséquences peuvent se manifester pendant des années, voire des décennies.

Sommaire-type d'un rapport de synthèse hydrogéologique (Ch. 5.2.3)

Un sommaire-type de rapport de synthèse hydrogéologique est proposé en Annexe 1.

Modèle conceptuel d'écoulement (Ch. 5.3)

Le modèle conceptuel d'écoulement décrit de façon schématique le système aquifère étudié. Il en précise l'extension horizontale et verticale, détaille la succession des aquifères et aquitards, décrit la lithologie et les caractéristiques hydrogéologiques dominantes, explicite les conditions hydrauliques aux limites du système, évalue les principales composantes des débits qui y transitent - si possible avec leurs ordres de grandeur respectifs - et identifie les zones de recharge et d'exutoire.

Extension « horizontale » du domaine modélisé (Ch. 5.3.1)

Dans la mesure du possible, les limites du domaine modélisé doivent coïncider avec celles du système aquifère pour ne pas biaiser les résultats de simulation par des limites artificielles trop proches ou mal calibrées.

Lorsque des limites « artificielles » sont retenues, elles doivent toujours être choisies avec soin, en s'attachant à respecter deux critères :

- Se situer au-delà de la zone d'influence des scénarios les plus contraignants en termes d'extension spatiale des impacts simulés.
- Assigner aux limites artificielles des conditions hydrauliques permettant de restituer au mieux l'influence de la zone non modélisée.

Des contrôles périodiques doivent ensuite être effectués pendant les différentes étapes de calage puis d'exploitation du modèle pour s'assurer que les limites adoptées et les conditions aux limites associées restent appropriées aux différentes configurations simulées et qu'elles ne biaissent pas les résultats de calcul.

Extension et discrétisation « verticale » de la série hydrogéologique (Ch. 5.3.2)

En pratique, la série litho-stratigraphique régionale est d'abord schématisée sur la base de considérations hydrogéologiques, dans le but de regrouper les formations par ensembles de propriétés similaires et de parvenir à une succession d'entités assimilables à des aquifères ou aquitards mineurs/moyens/majeurs. Si nécessaire, la série hydrogéologique ainsi constituée est ensuite condensée en fusionnant les niveaux de même nature (aquifère ou aquitard), de façon à former une alternance d'horizons, aquifères et aquitards. La façon de réaliser ces simplifications progressives dépend étroitement des objectifs assignés au modèle.

Déroulement et phasage des opérations (Ch. 5.4)

Pour éviter des retours en arrière coûteux et retardateurs, la phase de synthèse hydrogéologique préalable doit être aussi découpée que possible de la modélisation elle-même. Dans l'idéal, cette dernière ne devrait être engagée qu'une fois le rapport de synthèse hydrogéologique finalisé et validé par les différentes parties prenantes.

Quelques dispositions pratiques peuvent améliorer significativement le déroulement et l'efficacité globale des opérations :

- La phase de synthèse hydrogéologique initiale gagne beaucoup à être ponctuée de réunions d'avancement périodiques entre modélisateurs, maître d'ouvrage, et experts régionaux.
- Une fois rédigé, le rapport de synthèse hydrogéologique est transmis pour vérification et validation aux différentes parties prenantes, en particulier au maître d'ouvrage et aux experts qui l'assistent. Cette étape de contrôle est capitale pour s'assurer que toutes les informations et données disponibles ont été prises en considération, qu'elles ont été interprétées à bon escient, que les ordres de grandeur sont respectés et qu'aucune information ou donnée importante n'a été omise.
- Le rapport de synthèse hydrogéologique, qui contient une analyse actualisée des connaissances et des données nécessaires à la modélisation, sert ensuite de référence tout au long de la construction et du calage du modèle d'écoulement.

Modélisation géologique 3D des systèmes aquifères complexes (Chapitre 6)

Géométrie « simple » des aquifères monocouches (Ch. 6.1)

Une forte proportion de modèles maillés d'écoulement souterrain se rapporte à des contextes hydrogéologiques « simples » d'aquifères monocouches, souvent constitués de dépôts alluviaux ou de réservoirs calcaires, crayeux ou gréseux. La structure du réservoir aquifère est alors définie par deux surfaces, celle du « toit » de la formation et celle du mur (souvent assimilé à un substratum « imperméable »).

Sauf exception, la phase de construction de la structure géométrique du réservoir aquifère est ainsi réduite à sa plus simple expression, sans qu'il soit besoin de procéder à analyse géologique détaillée.

Structure complexe des systèmes aquifères multicouches (Ch. 6.2)

En revanche, les modèles destinés à simuler les écoulements souterrains dans les systèmes aquifères complexes, notamment multicouches, se heurtent en général à une première difficulté, celle de disposer d'une représentation numérique fidèle et cohérente de la structure géologique, représentative de l'empilement des formations plus ou moins perméables, d'extensions variables, qui constituent le système aquifère. Qui plus est, ces formations peuvent être recoupées par des accidents structuraux générateurs de discontinuités dans les écoulements, soit du fait de leur rejet vertical, soit par leur propre nature hydraulique (imperméable ou conductrice).

Intérêt d'une modélisation géologique 3D (Ch. 6.3)

Pour régler cette question délicate, la meilleure façon de procéder consiste à conduire une phase de modélisation géologique 3D bien individualisée, préalable à la modélisation hydrogéologique *stricto sensu*, de façon à construire la structure géométrique du futur modèle d'écoulement à l'aide d'un modeleur géologique. Ce type d'outil est spécifiquement conçu pour tirer le meilleur parti de toutes les données susceptibles de nourrir une structure géologique en trois dimensions, qu'elles soient topographiques, géologiques ou géophysiques.

Les structures géologiques ainsi construites sont beaucoup plus cohérentes et conformes aux données de terrain que celles qui résultent d'interpolations indépendantes menées sur chacune des couches. Parce qu'il intègre de façon rationnelle et cohérente l'ensemble des connaissances disponibles, un modèle géologique peut en outre être actualisé assez facilement et sans perte d'informations lorsqu'arrivent de nouvelles données géologiques et/ou géophysiques.

Principales étapes d'une modélisation géologique 3D (Ch. 6.4)

Le travail de modélisation géologique comporte toujours trois étapes successives pour (i) collecter, analyser et traiter les données, (ii) les organiser dans un Système d'Information Géographique (SIG), (iii) les importer dans un modeleur géologique et construire les surfaces de contact entre les formations successives.

La modélisation géologique 3D requiert une véritable expertise en géologie sédimentaire et structurale pour mener à bien, par itérations successives, la construction des surfaces gauches qui correspondent aux murs des différents horizons géologiques, marqués par les discontinuités structurales associées aux failles. Ce travail de construction géométrique s'appuie en outre continuellement sur les implications spatiales des phases successives de dépôt, érosion, transgression/régression marine, phases tectoniques d'effondrement, surrection, basculement, chevauchement, etc.

D'un point de vue structural, la modélisation géométrique contribue activement à améliorer les connaissances, aussi bien géologiques qu'hydrogéologiques, en explicitant les positions relatives des formations les unes par rapport aux autres, en mettant en évidence l'existence ou l'absence de connexions - potentiellement hydrauliques - entre niveaux aquifères, etc. Le modèle géologique peut également servir à optimiser de futurs programmes de reconnaissance dans les zones où de nouvelles données permettraient de lever les inconnues qui affectent la connaissance des écoulements souterrains.

Articulation avec la modélisation hydrogéologique (Ch. 6.5)

Pour que la structure élaborée par modélisation géologique soit en bonne adéquation avec la modélisation hydrogéologique qui va lui succéder, il est indispensable d'assurer dès le départ une concertation étroite et régulière entre les géologues et hydrogéologues intervenant sur le projet.

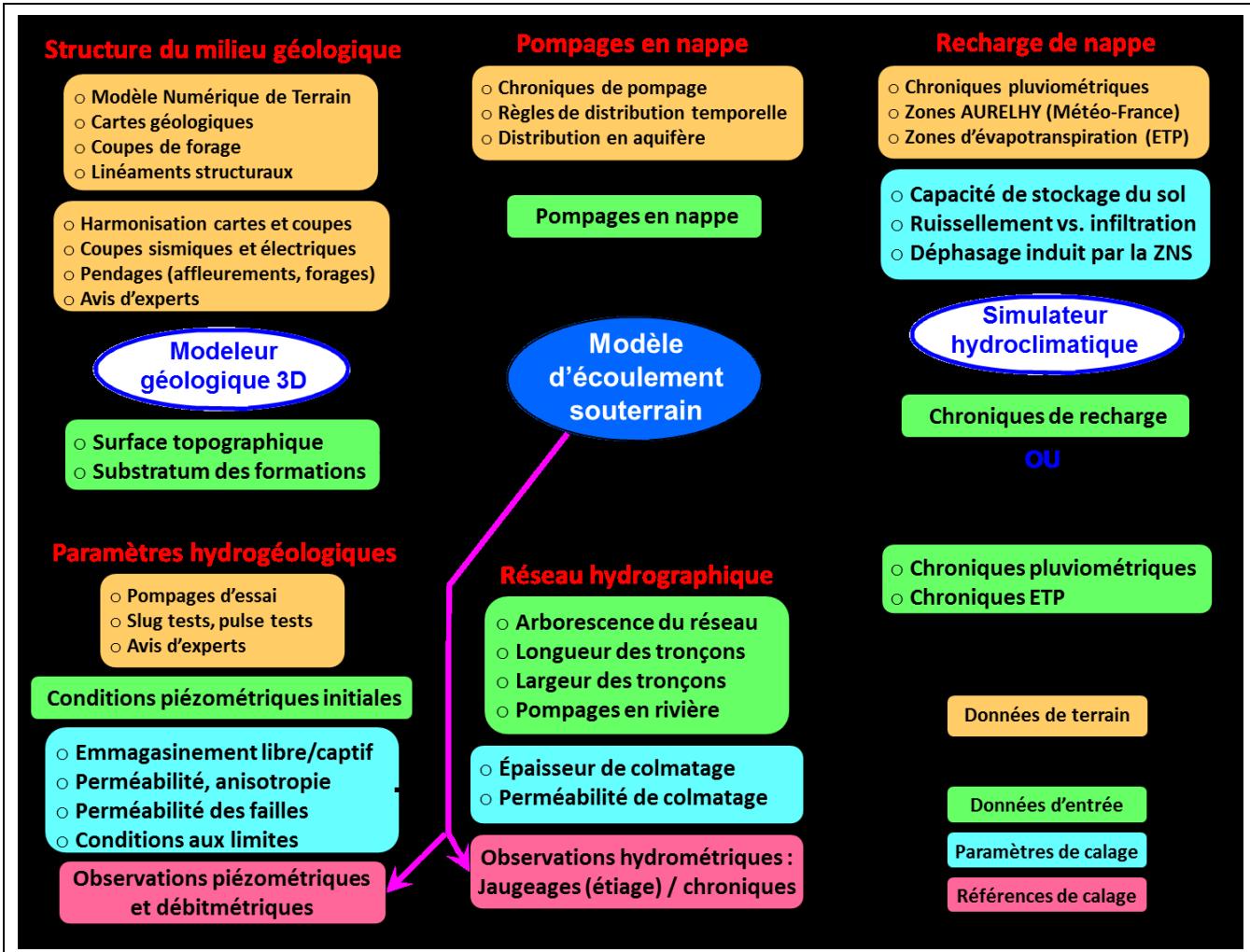
Cette collaboration est essentielle pour sélectionner ensemble les horizons à modéliser, parce que les approches géologique et hydrogéologique ne procèdent pas de la même logique, la première privilégiant la stratigraphie et les corrélations entre forages via des niveaux repères bien identifiables, la seconde cherchant à définir une alternance de séquences de perméabilités contrastées.

Incertitudes inhérentes au modèle géologique (Ch. 6.6)

Quelles que soient la rigueur apportée à la modélisation géologique 3D et la qualité du modèle qui en résulte, la structure géologique ainsi créée est indissociable des données et des connaissances qui la sous-tendent, ainsi que des hypothèses ayant présidé à son élaboration. Autrement dit, même si la structure issue de la modélisation géologique 3D est a priori le meilleur compromis trouvé à la date de sa construction, d'autres variantes pourraient sans doute être proposées et transférées vers le modèle hydrogéologique. Ceci est encore plus vrai lorsque de nouvelles investigations de terrain viennent enrichir les connaissances au fil du temps.

Construction d'un modèle maillé (Chapitre 7)

L'illustration ci-après synthétise les nombreuses données et connaissances qui interviennent dans une modélisation hydrogéologique. Elles sont regroupées par familles (blocs 1 à 5 : milieu géologique, propriétés hydrogéologiques, entrées/sorties hydrauliques, échanges avec le réseau hydrographique), et un code couleur indique leur fonction dans la procédure de modélisation : source d'information en amont (beige), donnée d'entrée du modèle (vert), paramètre de calage (bleu) et référence pour le calage (rose).



Données d'entrée, paramètres de calage et références de calage d'un modèle d'écoulement souterrain

Étapes de construction (Ch. 7.1)

Construire un modèle maillé, c'est traduire numériquement, dans des fichiers reconnus par le logiciel de modélisation, le schéma hydraulique qui sous-tend le modèle conceptuel d'écoulement élaboré à l'issue de la synthèse hydrogéologique initiale. Il s'agit donc de transposer un concept hydrogéologique en une série de fichiers constitutifs d'un modèle numérique, les données concernées ayant déjà été analysées et traitées pendant la synthèse hydrogéologique initiale et l'éventuelle modélisation géologique 3D menée en parallèle.

Différents modes de représentation des formations semi-perméables (Ch. 7.2.2)

Les formations semi-perméables (épontes) intercalées entre les formations aquifères (Ch. 7.2.2) peuvent être simulées de deux façons différentes :

- comme des aquifères de faible perméabilité auxquels sont assignés des champs de perméabilité et d'emmagasinement ;
- comme des horizons intercalaires ne servant qu'à assurer une connexion hydraulique verticale entre les couches aquifères sus- et sous-jacentes.

Discrétisation horizontale en mailles (Ch. 7.3.3)

Il n'existe pas de critère reconnu pour dimensionner un maillage de façon optimale. En pratique, les dimensions affectées aux mailles sont le fruit de compromis entre :

- pas et variabilité spatiale des données de terrain disponibles,
- taille et complexité géométrique et hydrogéologique des aménagements à simuler,
- pour le transport de masse ou de calories, respect de critères numériques assurant la représentativité des calculs (Nombre de Péclet et Nombre de Courant),
- précision de calcul recherchée,
- nombre de mailles compatible avec une durée de calcul « raisonnable ».

En tout état de cause, il ne faut pas céder à la tentation de multiplier les mailles au motif que le code de calcul peut le supporter. La taille des mailles doit rester cohérente avec la densité des données disponibles, ce qui peut conduire à employer de petites mailles dans les secteurs bien renseignés et de grandes mailles dans les zones peu investiguées et/ou de moindre intérêt pour le modèle.

Réseau hydrographique (Ch. 7.4)

Remarques sur les échanges nappe-rivière et leur évolution dans le temps (Ch. 7.4.1)

Le colmatage prévisible du lit d'une rivière « infiltrante » coulant dans un milieu poreux doit être anticipé au stade des simulations prévisionnelles, en évaluant l'impact d'un colmatage progressif du lit des cours d'eau à proximité des champs captants. Les conséquences d'un tel colmatage sont à la fois quantitatives (réduction, voire quasi suppression des apports locaux depuis la rivière, et accroissement induit des interférences hydrauliques entre les deux rives du cours d'eau) et qualitatives (diminution du risque de contamination de la nappe à partir d'une pollution du cours d'eau, mais risque accru de migration des pollutions de nappe d'une rive à l'autre par transit sous le cours d'eau).

Représentation des cours d'eau dans un modèle d'écoulement souterrain (Ch. 7.4.2)

Selon les données disponibles et les objectifs recherchés, plusieurs méthodes sont classiquement utilisées pour simuler les relations nappe-rivière dans les modèles d'écoulement souterrain. Les mailles aquifères situées sur le tracé du réseau hydrographique peuvent être traitées comme des « mailles de débordement », « mailles à potentiel imposé » ou « mailles de drainage ». Le réseau hydrographique peut aussi être explicitement modélisé en tant qu'entité hydraulique à part entière, interagissant avec la/les nappe(s) mais distincte de celle(s)-ci.

Choix de l'approche la mieux adaptée pour représenter les cours d'eau (Ch. 7.4.8)

En l'absence de stations hydrométriques renseignant sur les débits du réseau hydrographique, deux options peuvent être retenues :

- si le réseau hydrographique draine la nappe sur la totalité de son tracé, l'approche par « mailles de débordement » est suffisante ;
- si, dans quelques secteurs, le réseau hydrographique alimente la nappe par infiltration, l'utilisation de « mailles de drainage » est recommandée le long de ces tronçons, avec un colmatage plus ou moins accentué pour moduler les débits échangés entre la nappe et la rivière.

L'approche par « mailles à potentiel imposé » est à éviter en raison des risques d'infiltration excessive qu'elle fait courir si elle n'est pas utilisée avec précaution. Elle peut cependant s'avérer nécessaire pour les rivières équipées de seuils si le code de modélisation utilisé ne permet pas de restituer fidèlement les marches d'escalier de la ligne d'eau.

La modélisation explicite du réseau hydrographique, en tant qu'entité hydraulique à part entière, associée au calcul des pluies efficaces par le modèle, avec partition entre ruissellement et infiltration, constitue sans conteste l'approche la plus complète pour modéliser les systèmes aquifères régionaux. Elle présente en outre l'avantage de permettre un double calage hydrodynamique, sur les chroniques piézométriques et sur les débits enregistrés aux stations hydrométriques.

La prise en compte des données hydrométriques est un puissant levier pour améliorer la qualité et la représentativité d'un modèle de nappe, en termes de débit d'écoulement souterrain et de recharge de nappe. En particulier, il est important de s'assurer qu'en étiage, lorsqu'un cours d'eau est essentiellement alimenté par les eaux souterraines, le cumul des débits de drainage simulés par le modèle le long de son tracé est comparable au débit mesuré à l'aval du cours d'eau.

Quel que soit le mode de représentation adopté pour simuler le réseau hydrographique, il est recommandé de procéder par étapes de difficulté croissante, en commençant par simuler les cours d'eau par des mailles de débordement, qui peuvent ensuite être converties en mailles de drainage, puis en mailles rivière à part entière. La complexité de la schématisation adoptée doit cependant rester adaptée au contexte, aux enjeux, et au degré de connaissance du milieu.

Définir avec soin le profil en long des cours d'eau (Ch. 7.4.9)

Il est essentiel de définir précisément le profil de charge hydraulique des cours d'eau qui composent le réseau hydrographique, car ce profil conditionne à la fois le sens et l'intensité des échanges nappe-rivière. Trois options sont envisageables :

- Si le cours d'eau est simulé par des « mailles de débordement », il faut affecter à chaque maille située sur son tracé une cote topographique égale à l'altitude minimale du Modèle Numérique de Terrain (MNT) dans la maille, de façon à ce que le cours d'eau joue son rôle de drain naturel.
- Pour les autres schémas, une cote de ligne d'eau est à spécifier dans toutes les mailles où les échanges nappe-rivière sont à simuler. Cette composante d'écoulement est particulièrement importante lorsque l'on s'intéresse aux assèchements de rivière ou à l'effet de seuils barrant un cours d'eau. Dans ce cas, il est recommandé de lever précisément le profil en long de la ligne d'eau *via* une campagne de mesure au GPS différentiel (de préférence en période d'étiage pour les assecs). Si nécessaire, des leviers complémentaires en moyennes eaux et/ou hautes eaux éclairent sur la variabilité saisonnière du régime d'écoulement.
- Lorsque la ligne d'eau présente de grandes fluctuations, il peut être préférable de la faire varier automatiquement en fonction du débit d'écoulement, ce que peuvent faire certains codes de modélisation *via* une loi de Manning. Dans ce cas, il faut en plus disposer des profils en long et en travers du fond de la rivière, éléments nécessaires au calcul de la section d'écoulement et de la ligne d'eau associée.

Affectation des propriétés hydrogéologiques (Ch. 7.6)

On attribue souvent deux valeurs de coefficient d'emmagasinement à chaque maille du modèle, une valeur d'emmagasinement libre et une valeur d'emmagasinement captif, le logiciel de modélisation sélectionnant de lui-même la valeur appropriée selon que la nappe est libre ou captive dans la maille considérée. Dans un aquifère captif, il faut bannir la notion d'emmagasinement captif ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot m^{-1}$) et ne retenir que celle de coefficient d'emmagasinement captif spécifique (m^{-1}), seule à même de restituer les variations spatiales de l'emmagasinement captif au prorata de l'épaisseur saturée de la formation.

Les valeurs communément admises pour les perméabilités, les coefficients d'emmagasinement libres et captifs spécifiques, ainsi que pour les porosités d'interstices, sont données en Annexe 2.

Calage du modèle (Chapitre 8)

Calage en régime permanent et en régime transitoire (Ch. 8.1)

Théoriquement, le calage d'un modèle enchaîne deux phases successives :

- une phase de calage en « régime hydraulique permanent » ;
- une phase de calage en « régime hydraulique transitoire ».

En réalité, il est rare que les deux phases de calage puissent être totalement découplées. En pratique, on procède souvent par itérations successives entre calage en régime permanent - pour dégrossir la distribution des perméabilités et reconstituer un état piézométrique stabilisé - et calage en transitoire - pour ajuster les perméabilités et, secondairement, les emmagasinements - afin de restituer au mieux la dynamique des écoulements et les fluctuations piézométriques et hydrométriques aux points d'observation.

Il est important de rappeler que les conditions initiales des simulations en régime transitoire ne peuvent pas être directement interpolées/extrapolées à partir des observations de terrain, par nature discrètes et entachées d'incertitudes. Elles doivent impérativement résulter de simulations préalables effectuées en régime permanent ou transitoire, de façon à être en tout point cohérentes avec les équations qui décrivent le comportement du fluide dans le milieu géologique.

Entrées/sorties (Ch. 8.2.1)

Pour élargir le champ d'exploitation futur du modèle (et renforcer sa capacité prédictive), il faut veiller à sélectionner pour le calage les périodes qui intègrent les plus hauts/bas niveaux/débits observés.

Conditions initiales (Ch. 8.2.3)

En régime transitoire, les conditions initiales ne peuvent pas être directement interpolées/extrapolées à partir des observations de terrain, par nature discrètes et entachées d'incertitudes : elles doivent impérativement résulter de simulations préalablement effectuées en régime permanent ou transitoire, de façon à être en tout point cohérentes avec les équations décrivant le comportement du fluide dans le milieu géologique.

Règles à respecter pour la modélisation (Chapitre 8.3)

Définir des conditions aux limites pertinentes (Ch. 8.3.1)

Les conditions hydrauliques assignées aux limites du modèle doivent être définies avec soin pour restituer sans la fausser l'influence du « monde extérieur ». En pratique, on attribue à chaque limite un type de conditions aux limites en adéquation avec son rôle hydraulique, lequel peut différer selon que la limite se situe en amont ou en aval hydraulique du modèle et que la simulation est conduite en régime permanent ou transitoire.

Dans tous les cas, il convient de limiter au strict nécessaire le nombre de mailles à potentiel imposé, de façon à laisser au modèle la plus grande flexibilité possible pour le calcul des charges hydrauliques.

Définir de façon adéquate la période de calage et les pas de temps (Ch. 8.3.2)

Pour le calage en régime transitoire, la durée de la période à simuler doit couvrir au moins un cycle d'évolution du système aquifère de façon à être en adéquation avec sa dynamique. Selon l'inertie du milieu, le cycle d'évolution peut être annuel ou pluriannuel.

Quel que soit le pas de temps utilisé pour les simulations hydrodynamiques, il est recommandé d'effectuer les calculs hydroclimatiques - pour l'élaboration des chroniques de recharge - à un pas de temps inférieur ou égal à 10 jours. Dans l'idéal, un pas journalier est préférable, surtout en climat méditerranéen où les épisodes pluvieux sont brefs et intenses, l'évapotranspiration potentielle élevée.

Recommandations pour le calage du modèle (Chapitre 8.4)

Contrôler les résultats de simulation (Ch. 8.4.1)

Il appartient au modélisateur de vérifier systématiquement les résultats fournis par le modèle, de façon à s'assurer qu'ils correspondent bien aux conditions de simulation escomptées et que les données d'entrée assignées au modèle ne comportent pas d'erreur.

En premier lieu, il convient d'accompagner les simulations numériques de quelques évaluations de « coin de table » et/ou calculs analytiques pour s'assurer que les ordres de grandeur des différentes approches sont comparables.

À quoi s'ajoutent, en cours de modélisation, les comparaisons systématiques à effectuer entre résultats de simulations successives, puissant moyen de contrôle pour s'assurer que les évolutions piézométriques/hydrométriques simulées par le modèle sont cohérentes avec les modifications apportées aux données d'entrée. En pratique, ce type de comparaison est difficile, voire impossible, si les modifications apportées entre les simulations ont porté sur plusieurs paramètres à la fois ; il est donc recommandé, au moins pendant la phase de calage du modèle, de ne modifier qu'un seul paramètre à la fois de façon à pouvoir anticiper les conséquences des modifications effectuées. Il s'agit ensuite de contrôler que les nouvelles distributions de charge et de débit simulées par le modèle sont conformes aux anticipations.

Utiliser des indicateurs pertinents pour suivre la convergence des calculs (Ch. 8.4.2)

L'état de convergence du modèle ne doit pas être évalué par l'écart de charge hydraulique entre deux itérations successives, ce paramètre étant directement affecté par le coefficient de sous-relaxation utilisé pour les calculs. Il ne faut se fier qu'aux indicateurs portant sur le bilan hydraulique des différentes couches du modèle, et plus particulièrement au déséquilibre du bilan hydraulique dans chaque maille, chaque couche, et pour l'ensemble du modèle (les écarts moyen, médian et maximal sont de bons indicateurs synthétiques).

Privilégier une distribution raisonnée des perméabilités et emmagasinements (Ch. 8.4.3)

Tout au long de la procédure de calage, il est essentiel de s'assurer que les distributions de perméabilité et d'emmagasinement attribuées aux différentes formations modélisées sont homogènes, non biaisées, et conformes aux données de terrain. Des distributions par plages homogènes sont en effet généralement préférables à des mosaïques contrastées, la perte apparente de précision du calage étant amplement compensée par une robustesse accrue du modèle pour les simulations prévisionnelles.

Fournir des éléments permettant d'apprécier la qualité du calage et du modèle (Ch. 8.4.4)

En cours et en fin de calage, les éléments de contrôle les plus courants pour apprécier la façon dont le modèle restitue le comportement du système aquifère prennent la forme de diagrammes de dispersion, cartes piézométriques, chroniques de charge, débits sortant aux exutoires, bilans hydrauliques, etc.

Ajuster les pluies efficaces sur la lame d'eau éculée à l'exutoire du bassin hydrographique (Ch. 8.4.5)

La lame d'eau moyenne interannuelle s'écoulant à l'exutoire d'un bassin hydrographique est un indicateur direct de la pluie efficace moyenne sur ce bassin, aux prélèvements souterrains près.

Améliorer le calage du modèle à l'aide de chroniques hydrométriques (Ch. 8.4.6)

Un double calage du modèle, portant à la fois sur des chroniques piézométriques et sur des chroniques de débit observées en quelques exutoires de surface (sources, stations hydrométriques sur le réseau hydrographique), renforce significativement la représentativité d'un modèle, au moins dans la plage de fonctionnement balayée pendant la phase de calage en transitoire, sous réserve de vérifier que la répartition entre ruissellement et écoulement souterrain est conforme à l'hydrologie du système (composante souterraine généralement dominante en étiage).

Appliquer une correction piézométrique aux puits de pompage/injection (Ch. 8.4.7)

Lorsqu'une maille représente une portion d'aquifère dans laquelle sont implantés un ou plusieurs puits de pompage/injection, l'écart entre la charge piézométrique moyenne simulée dans la maille et la charge effective régnant dans un puits de pompage/injection est d'autant plus grand que le rapport entre le côté de la maille et le rayon du puits est grand. Une correction doit donc être appliquée pour évaluer correctement les niveaux dynamiques dans les ouvrages de pompage/injection.

Simuler un « état naturel » sans pompage (Ch. 8.4.8)

Faute de disposer d'observations de terrain sur un état naturel initial, quelquefois dissipé depuis des décennies, il est courant d'utiliser comme référence pour le calage en régime permanent un état piézométrique réputé « stabilisé », associé à une distribution spatiale des pompages plus ou moins approximative, supposée elle aussi stabilisée. Compte tenu des incertitudes affectant les jeux de données utilisés, il est indispensable de simuler en outre un état « naturel » permanent, sans aucun pompage, de façon à s'assurer que le modèle calcule un état piézométrique réaliste où les sources coulent à des débits plausibles et la nappe ne déborde pas dans des secteurs où aucune source ou zone humide n'était connue auparavant. Ce contrôle très simple doit être systématique car il peut révéler une faiblesse cachée du modèle.

Utiliser une anisotropie de perméabilité pour les formations en sandwich (Ch. 8.4.9)

Un aquifère présentant une succession de niveaux perméables et semi-perméables (p. ex. alternance de bancs calcaires et d'horizons marneux, limons varvés des dépôts lacustres, etc.) doit être schématisé par une couche aquifère associée à un coefficient d'anisotropie entre perméabilité horizontale (K_h) et perméabilité verticale (K_v). De la sorte, il est possible de combiner une perméabilité horizontale forte à une perméabilité verticale réduite.

Ajuster le coefficient d'anisotropie et la perméabilité des couches semi-perméables à l'aide de profils verticaux de charge (Ch. 8.4.10)

Pour accélérer le processus de calage et ajuster de façon rationnelle les perméabilités des niveaux semi-perméables, une approche efficace consiste, pour chaque piézomètre du réseau de suivi, à reporter sur un même graphique la chronique de charge mesurée dans le piézomètre d'observation et les chroniques simulées dans la couche observée et dans les couches sus- et sous-jacentes.

L'analyse comparative de ces différentes chroniques peut apporter des indications fort utiles pour ajuster la perméabilité verticale des épontes intermédiaires et/ou les coefficients d'anisotropie K_v/K_h des couches aquifères.

S'aider de la grille AURELHY (Météo-France) pour ajuster la distribution spatiale des précipitations, ou mieux, utiliser les données SAFRAN pour calculer les chroniques de pluie efficace (Ch. 8.4.11)

L'intérêt de la grille AURELHY est de fournir un découpage spatial en zones de précipitations homogènes, qui peut aider à améliorer la délimitation strictement géométrique des polygones de Thiessen, souvent utilisée pour délimiter les zones de pluie efficace.

La mosaïque SAFRAN, développée par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), fournit une série de paramètres météorologiques - dont les précipitations solides et liquides - sur une grille de calcul régulière (8 km x 8 km) et à un pas de temps horaire sur le territoire français. Les chroniques d'ETP sont dérivées de ces différents paramètres.

Utiliser les évapotranspirations Penman-Monteith (Ch. 8.4.12)

Les chroniques d'évapotranspiration (ETP) nécessaires aux calculs de pluie efficace, puis de ruissellement et d'infiltration, sont disponibles auprès de Météo-France. En règle générale, c'est l'ETP Penman-Monteith qui est utilisée pour le calcul des pluies efficaces.

Respecter les spécificités des différents coefficients d'emmagasinement (Ch. 8.4.13)

En aquifère captif, il faut impérativement proscrire l'utilisation de coefficients d'emmagasinement captif ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot m^{-1}$) et n'utiliser que des coefficients d'emmagasinement captif spécifique (m^{-1}). Ce second paramètre correspondant à la fonction capacitive intrinsèque de l'aquifère, son usage permet de moduler le coefficient d'emmagasinement captif en fonction de l'épaisseur aquifère saturée.

Lorsqu'une nappe libre est modélisée par le biais de plusieurs couches de mailles, chaque couche doit se voir assigner un coefficient d'emmagasinement libre et un coefficient d'emmagasinement captif spécifique. Le coefficient d'emmagasinement libre n'est appliqué qu'à la couche où se situe la surface libre au pas de temps considéré ; dans les autres couches, c'est le coefficient d'emmagasinement captif spécifique qui est utilisé.

Contrôler les oscillations numériques (Ch. 8.4.14)

Pour lutter efficacement contre les oscillations numériques souvent constatées au cours du processus de convergence, il convient d'abord de localiser les difficultés (quelles zones sont affectées ?), puis d'en identifier les causes, les remèdes à apporter différant selon la nature du problème.

Si les moyens proposés par le logiciel de modélisation (sous-relaxation, pseudo-ZNS, gestion des dénoyages, etc.) ne viennent pas à bout des difficultés rencontrées, il faut agir directement sur les paramètres hydrogéologiques assignés aux mailles récalcitrantes et/ou aux mailles voisines, après analyse détaillée du contexte hydraulique local.

Par exemple, un cas classique de dénoyage intempestif – avec les oscillations numériques associées – se manifeste souvent sur les mailles situées en limite d'affleurement d'une formation aquifère, configuration où plusieurs facteurs défavorables peuvent se conjuguer : faible épaisseur de l'aquifère et de la nappe, importante pente du substratum, surface d'impluvium réduite limitant les apports hydrauliques par l'amont. Une solution efficace pour supprimer le dénoyage de telles mailles consiste à y réduire significativement les perméabilités horizontales et verticales de façon à limiter le drainage par l'aval et la percolation vers les formations sous-jacentes.

Simuler un pseudo-transitoire pour faciliter la convergence en régime permanent (Ch. 8.4.15)

Lorsqu'une simulation en régime permanent se heurte à des difficultés de convergence, il peut être intéressant de simuler un régime transitoire de quelques pas de temps en affectant aux différentes formations de faibles coefficients d'emmagasinement.

Raisonner en termes de gradients piézométriques pour restituer les charges hydrauliques (Ch. 8.4.16)

Lorsque la densité des observations piézométriques le permet, il est plus efficace de concentrer le calage du modèle sur une bonne restitution des gradients piézométriques entre points d'observation successifs à l'intérieur d'un tube de courant, plutôt que de chercher à réduire les écarts entre charges simulées et charges observées aux points de suivi. Un avantage majeur de l'approche par gradients tient en sa stabilité, un différentiel de charge bien restitué entre deux piézomètres voisins n'étant pas significativement remis en question par des modifications ultérieures apportées aux perméabilités alentour.

Pour accélérer le processus de calage, il est recommandé d'appliquer cette démarche en partant des zones où les charges hydrauliques sont quasi fixées par les contraintes assignées au modèle (potentiels imposés, cotes de débordement, secteurs drainés par le réseau hydrographique). Le calage des gradients piézométriques se traduit alors très vite par une bonne restitution des charges hydrauliques.

Effectuer des analyses de sensibilité pour améliorer la connaissance du système aquifère (Ch. 8.4.17)

En cours ou en fin de calage, une série d'analyses de sensibilité, globales ou sectorielles, peut se révéler fort utile pour apprécier la réactivité du modèle aux principaux paramètres de calage.

Cette étape d'analyse peut contribuer significativement à améliorer la connaissance du système aquifère, à cerner les sources d'incertitude dominantes et à orienter de nouvelles investigations de terrain pour préciser le comportement du système aquifère et améliorer la représentativité du modèle.

Validation du modèle (Chapitre 9)

La validation du modèle est une étape du processus de modélisation qui sert à vérifier que le modèle est capable de reproduire le comportement du système aquifère lorsque celui-ci est soumis à un ensemble de sollicitations internes et externes. Concrètement, le modèle calé est utilisé pour simuler une/des séquence(s) de données volontairement mise(s) de côté pendant la phase de calage ; les résultats de simulation (charges, débits) sont ensuite comparés aux observations de terrain.

En pratique, la difficulté de l'opération réside surtout dans le choix de la période d'observation à exclure de la phase de calage. En effet, plusieurs arguments militent en général pour étendre au maximum la période de calage, en incluant notamment les dernières observations disponibles car les périodes les plus récentes contiennent souvent des informations déterminantes pour le calage du modèle, soit pour le consolider avec des observations inédites, soit pour le confronter à de nouvelles configurations d'écoulement. À l'inverse, les périodes les plus anciennes sont souvent trop peu documentées ou insuffisamment contraignantes pour permettre une réelle validation du modèle.

Concrètement, les meilleures séquences de validation sont celles qui peuvent être faites lors des actualisations périodiques commandées par le maître d'ouvrage car elles permettent de comparer les résultats de simulation aux observations de terrain tout au long de la période d'actualisation. Ces mises à jour successives conduisent en général à procéder à quelques retouches sur le modèle et son calage, ce qui contribue à en renforcer progressivement la représentativité et la robustesse.

Scénarios prévisionnels (Chapitre 10)

La principale différence entre simulations prévisionnelles et calage du modèle en transitoire tient au fait qu'avant de simuler des scénarios prévisionnels il faut commencer par élaborer des chroniques hydroclimatiques réalistes, sur la base d'une analyse statistique des observations existantes et d'hypothèses probabilistes en adéquation avec les scénarios à simuler.

Il s'ensuit que les résultats des simulations prévisionnelles doivent être interprétés et utilisés avec discernement, sans perdre de vue l'incertitude fondamentale attachée à la future recharge des nappes. Les précautions d'utilisation doivent encore être accrues lorsque les pompages en nappe sont corrélés au contexte hydroclimatique, cas fréquent pour les pompages agricoles où les années sèches s'accompagnent de prélèvements accentués, aggravant *de facto* l'effet des recharges déficitaires et amplifiant l'impact des aléas climatiques.

La règle intangible de vérification des résultats de simulation doit bien entendu s'appliquer aux simulations prévisionnelles, aussi bien pour s'assurer que les conditions aux limites adoptées pour le calage du modèle restent valides pour chacun des scénarios modélisés que pour détecter d'éventuels dénoyages ou débordements de nappe qui nécessiteraient des mesures correctives.

Idéalement, les scénarios prévisionnels constituent une phase de modélisation autonome, menée avec un modèle dûment calé et validé, sur lequel il n'y a pas lieu de revenir. En pratique, cependant, il n'est pas rare de devoir reprendre le calage à la marge pour améliorer les conditions aux limites, affiner le calage sur quelques secteurs clefs, remédier à une dérive piézométrique qui n'avait pas été perçue sur une période de calage plus courte, etc.

Rapport de modélisation hydrogéologique (Chapitre 11)

Le rapport d'étude qui clôt la modélisation hydrogéologique décrit les différentes étapes du travail effectué, de l'analyse des données d'entrée aux résultats des scénarios prévisionnels, sans omettre de commenter les principales étapes de calage, les hypothèses sous-jacentes, les résultats de calage, les bilans hydrauliques, les connaissances acquises sur le fonctionnement du système aquifère, les incertitudes résiduelles, les propositions pour y remédier, etc.

Un sommaire-type de rapport descriptif d'une modélisation hydrogéologique maillée est proposé en Annexe 3.

Archivage du modèle (Chapitre 12)

L'archivage des jeux de données constituant un modèle est une composante essentielle du processus de modélisation, en particulier pour les modèles de gestion des systèmes aquifères régionaux qui sont destinés à être périodiquement actualisés. Ce sujet complexe n'est toutefois pas traité ici car il fait l'objet d'un rapport spécifique.



Sommaire

1. Contexte	35
1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE	35
1.2. OBJECTIFS DE CE DOCUMENT	35
1.3. PLAN DU RAPPORT	36
2. Choix de l'approche numérique la mieux adaptée au problème à traiter	37
2.1. SOLUTIONS ANALYTIQUES	37
2.2. MODÈLES NUMÉRIQUES DE SIMULATION	38
2.2.1. Les modèles spatialisés (dits aussi distribués ou maillés)	38
2.2.2. Les modèles globaux (et semi-globaux) de type conceptuel	38
2.2.3. Les modèles globaux de type boîte noire	39
2.3. CHAMPS D'APPLICATION	39
2.3.1. Représentation d'un hydrosystème	39
2.3.2. Utilisation des modèles numériques d'écoulement	40
2.3.3. Simulations prévisionnelles de scénarios climatiques	40
3. Équipe de modélisation	41
3.1. MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE = TRAVAIL PLURIDISCIPLINAIRE	41
3.2. MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE = LONG APPRENTISSAGE	41
3.3. NOTION DE MASSE CRITIQUE POUR UNE ÉQUIPE DE MODÉLISATION	41
3.4. SÉLECTION D'UN PRESTATAIRE DE MODÉLISATION	42
4. Les grandes étapes d'une modélisation hydrogéologique	43
4.1. DÉFINITION DU CADRE DE LA MODÉLISATION	43
4.2. COLLECTE, ANALYSE ET SYNTHÈSE DES DONNÉES	43
4.3. CONSTRUCTION OPTIONNELLE D'UN MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D	43
4.4. CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT	44
4.5. CALAGE DU MODÈLE (OU CALIBRATION)	44

4.6. VALIDATION DU MODÈLE	45
4.7. EXPLOITATION DU MODÈLE CALÉ	45
4.8. CHRONOGRAMME INDICATIF D'UNE OPÉRATION DE MODÉLISATION	45
5. Synthèse hydrogéologique préalable à une modélisation maillée	47
5.1. ÉTAPES PRÉALABLES À LA MODÉLISATION	47
5.2. SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE	47
5.2.1. Données requises pour une modélisation hydrogéologique	47
5.2.2. Synthèse hydrogéologique destinée à une modélisation d'écoulement souterrain	49
5.2.3. Sommaire-type d'un rapport de synthèse hydrogéologique destiné à une modélisation d'écoulement souterrain	50
5.3. MODÈLE CONCEPTUEL D'ÉCOULEMENT	50
5.3.1. Extension « horizontale » du domaine modélisé	51
5.3.2. Extension et discrétisation « verticale » de la série hydrogéologique	52
5.4. DÉROULEMENT ET PHASAGE DES OPÉRATIONS	54
6. Modélisation géologique 3D des systèmes aquifères complexes	55
6.1. GÉOMÉTRIE « SIMPLE » DES AQUIFÈRES MONOCOUCHES	55
6.2. STRUCTURE COMPLEXE DES SYSTÈMES AQUIFÈRES MULTICOUCHES	55
6.3. INTÉRÊT D'UNE MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D	56
6.4. PRINCIPALES ÉTAPES D'UNE MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D	56
6.4.1. Collecte, analyse et traitement des données	56
6.4.2. Organisation et gestion des données dans un SIG	57
6.4.3. Mise en œuvre d'un modèleur géologique	58
6.5. ARTICULATION AVEC LA MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE	63
6.6. INCERTITUDES INHÉRENTES AU MODÈLE GÉOLOGIQUE	63
7. Construction d'un modèle maillé	65
7.1. ÉTAPES DE CONSTRUCTION	65
7.2. DISCRÉTISATION VERTICALE ET SEMI-PERMÉABLES	65
7.2.1. Discrétisation verticale du modèle numérique	65
7.2.2. Différents modes de représentation des formations semi-perméables	66
7.3. SCHÉMAS NUMÉRIQUES ET MAILLAGES ASSOCIÉS	66
7.3.1. Schémas numériques et types de maillage associés	66

7.3.2. Discrétisation verticale en couches de modèle.....	68
7.3.3. Discrétisation horizontale en mailles	70
7.4. RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE	70
7.4.1. Remarques sur les échanges nappe-rivière et leur évolution dans le temps.....	71
7.4.2. Représentation des cours d'eau dans un modèle d'écoulement souterrain.....	72
7.4.3. Mailles de débordement.....	72
7.4.4. Mailles à potentiel imposé.....	73
7.4.5. Mailles de drainage.....	74
7.4.6. Modélisation explicite du réseau hydrographique.....	75
7.4.7. Bilan hydroclimatique calculé par le logiciel de modélisation.....	76
7.4.8. Choix de l'approche la mieux adaptée pour représenter les cours d'eau.....	77
7.4.9. Définir avec soin le profil en long des cours d'eau	78
7.5. DONNÉES À FOURNIR AU MODÈLE	79
7.6. AFFECTATION DES PROPRIÉTÉS HYDROGÉOLOGIQUES	80
8. Calage du modèle.....	83
8.1. CALAGE EN RÉGIME PERMANENT ET EN RÉGIME TRANSITOIRE	83
8.2. DONNÉES COMPLÉMENTAIRES REQUISES POUR LE CALAGE.....	84
8.2.1. Entrées/sorties	84
8.2.2. Conditions aux limites	85
8.2.3. Conditions initiales	86
8.2.4. Données servant de références pour le calage	86
8.3. RÈGLES À RESPECTER POUR LA MODÉLISATION	87
8.3.1. Définir des conditions aux limites pertinentes.....	87
8.3.2. Choisir de façon adéquate la période de calage et les pas de temps	90
8.4. RECOMMANDATIONS POUR LE CALAGE DU MODÈLE	91
8.4.1. Contrôler les résultats de simulation	91
8.4.2. Utiliser des indicateurs pertinents pour suivre la convergence des calculs.....	93
8.4.3. Privilégier une distribution raisonnée des perméabilités et emmagasinements.....	93
8.4.4. Fournir des éléments permettant d'apprécier la qualité du calage et du modèle	96
8.4.5. Ajuster les pluies efficaces à la lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin hydrographique.....	99
8.4.6. Améliorer le calage du modèle à l'aide de chroniques hydrométriques	101
8.4.7. Appliquer une correction piézométrique aux puits de pompage/injection	102
8.4.8. Simuler un « état naturel » sans pompage	103

8.4.9. Utiliser une anisotropie de perméabilité pour les formations en sandwich	104
8.4.10. Ajuster le coefficient d'anisotropie et la perméabilité des couches semi-perméables à l'aide de profils verticaux de charge.....	105
8.4.11. S'aider de la grille AURELHY (Météo-France) pour ajuster la distribution spatiale des précipitations, ou mieux, utiliser les données SAFRAN pour calculer la pluie efficace	106
8.4.12. Utiliser les évapotranspirations Penman-Monteith.....	108
8.4.13. Respecter les spécificités des différents coefficients d'emmagasinement	108
8.4.14. Contrôler les oscillations numériques induites par le dénoyaage de mailles	109
8.4.15. Simuler un pseudo-transitoire pour faciliter la convergence en régime permanent	110
8.4.16. Raisonnner en termes de gradients piézométriques pour restituer les charges hydrauliques	111
8.4.17. Effectuer des analyses de sensibilité pour améliorer la connaissance du système aquifère	111
9. Validation du modèle	113
10. Scénarios prévisionnels	117
11. Rapport de modélisation hydrogéologique.....	119
12. Archivage du modèle	121
13. Bibliographie	123

Liste des illustrations

Illustration 1 – Chronogramme indicatif des grandes étapes d'une modélisation hydrogéologique régionale	46
Illustration 2 – Exemple de schéma conceptuel, avec bilan hydraulique associé (N.B. : les chiffres indiqués ont été révisés après calage du modèle - source : SOGREAH).....	51
Illustration 3 – Système aquifère des plaines côtières de Gabès (Tunisie). Simplifications successives pour condenser les 20 unités litho-stratigraphiques (colonne gauche) en 18 entités hydrogéologiques (col. centrale), puis 11 couches du modèle d'écoulement (col. droite).....	53
Illustration 4 – Exemple de données examinées pour une modélisation géologique 3D (source : Modélisation des principaux aquifères jordaniens, Brgm, 2010).....	57
Illustration 5 – Modèle géologique de Sarrola-Carcopino, Corse (logiciel Multilayer™) (source : Estimation des volumes d'eau brute mobilisables en rive gauche de la Gravone, Brgm 2011)	60
Illustration 6 – Coupes des aquifères jurassique et crétacé de Basse-Normandie (Multilayer™) (source : Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives, Brgm 2013).....	60
Illustration 7 – Modèle géologique des aquifères jurassique et crétacé de Basse-Normandie. Géométrie 3D vue depuis la côte normande (logiciels MARTHE™ et Paraview™) (source : Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives, Brgm 2013)	61
Illustration 8 – Modèle géologique de la Jordanie Vue en coupe des seules formations aquifères (logiciel Earthvision™) (source : Modélisation des principaux aquifères jordaniens, Brgm 2010).....	61
Illustration 9 – Modèle géologique des plaines côtières de Gabès (Tunisie). Logiciel Geomodeller™ (source : Modélisation géologique des aquifères du bassin de Gabès, Brgm 2013)	62
Illustration 10 – Extraits du modèle géologique 3D de la région de Gabès (Tunisie, GeoModeller™). Chronologie des phases de dépôt et d'érosion, avec mise en contact de formations aquifères déposées à des époques très différentes. Logiciel Geomodeller™	62
Illustration 11 - Discrétisation d'un modèle maillé monocouche	68
Illustration 12 - Exemple de discrétisation d'un modèle maillé multicouche	69
Illustration 13 - Exemple de discrétisation d'un modèle maillé tridimensionnel	69
Illustration 14 – Principales configurations de recharge, débordement et drainage	70
Illustration 15 – Données d'entrée et paramètres de calage d'un modèle d'écoulement souterrain	79
Illustration 16 – Chroniques piézométriques à inertie pluriannuelle (Beauce) et annuelle (Nord)	90
Illustration 17 – La sur-paramétrisation nuit à la capacité prédictive d'un modèle.....	94
Illustration 18 – Distribution des perméabilités à l'issue d'une 1 ^{ère} phase de calage (logiciel FEFLOW©)	95
Illustration 19 – Distribution des emmagasinements spécifiques à l'issue d'une 1 ^{ère} phase de calage	95
Illustration 20 – Diagramme de dispersion entre charges hydrauliques simulées et mesurées	96

Illustration 21 – Chroniques piézométriques et hydrométriques simulées (rouges) et observées (bleues)	97
Illustration 22 – Moyenne et écart-type des écarts entre chroniques simulées et observées.....	99
Illustration 23 – Principales composantes du bilan hydraulique d'un modèle multicouche (extrait)	99
Illustration 24 - Lame d'eau moyenne internanuelle éculée pour des stations hydrométriques de Basse-Normandie (source : banque HYDRO).....	100
Illustration 25 – Chroniques hydrométriques de la rivière Aronde à la station de Clairoix. Bonne adéquation entre débits simulés (courbe magenta) et débits mesurés (courbe bleue), mais déficit d'apport souterrain (courbe rouge) en étiage.....	101
Illustration 26 - Charges hydrauliques simulées et réelles avec des puits de pompage.....	103
Illustration 27 – Ajustement du coefficient d'anisotropie Kh/Kv guidé par un profil vertical de charge (courbes bleue/verte : niveaux piézométriques mesurés/simulés dans les sables miocènes ; courbe rouge-orangé : charges simulées dans les calcaires crétacés)	106
Illustration 28 - Pluviométrie moyenne annuelle selon la grille AURELHY (Météo-France) au pas de 1 km, établie à partir des stations pluviométriques existantes (extrait pour la Basse-Normandie)	107
Illustration 29 - Stations Météo-France disposant de chroniques d'ETP Penman (Basse-Normandie)	108
Illustration 30 – Indice de Développement et de Persistence des Réseaux sur la zone d'étude. L'IDPR est un indice développé par le Brgm pour qualifier le caractère plus ou moins infiltrant des formations géologiques affleurantes.Une valeur faible (rouge sombre) indique une prédominance de l'infiltration,tandis qu'une valeur forte (vert foncé) signe un ruissellement prépondérant.....	131
Illustration 31 – Distribution spatiale des sources sur fond géologique	131
Illustration 32 – Distribution spatiale des valeurs de transmissivité obtenues par pompages d'essai	132
Illustration 33 - Représentation en boîtes à moustaches des transmissivités connues dans les aquifères : la moyenne figure en rouge, la valeur médiane correspond à la barre au milieu de la boîte.....	132
Illustration 34 – Localisation des stations de mesure hydrométrique et fond géologique	133
Illustration 35 – Chroniques de débit de cours d'eau	133
Illustration 36 - Localisation des pompages en eau de surface	134
Illustration 37 – Ventilation des volumes pompés dans les eaux de surface, en 1994 (à gauche) et en 2010 (à droite).....	134
Illustration 38 - Volume annuel prélevé pour l'AEP dans les eaux de surface.....	135
Illustration 39 - Volume annuel prélevé pour l'industrie dans les eaux de surface	135
Illustration 40 - Volume annuel prélevé pour l'agriculture dans les eaux de surface	135
Illustration 41 - Localisation des prélèvements en eau souterraine	136
Illustration 42 – Ventilation des pompages en eau souterraine, en 1994 (à gauche) et en 2010 (à droite).....	136
Illustration 43 - Volume annuel prélevé pour l'AEP dans les eaux souterraines	137
Illustration 44 - Volume annuel prélevé pour l'industrie dans les eaux souterraines	137

Illustration 45 - Volume annuel prélevé pour l'agriculture dans les eaux souterraines	137
Illustration 46 – Localisation des piézomètres de suivi et fond géologique	138
Illustration 47 – Chroniques piézométriques (fluctuations annuelles avec inertie pluri-annuelle en haut, oscillations annuelles en bas)	138
Illustration 48 - Perméabilité des roches (Collin, 2004).....	140
Illustration 49 - Valeurs théoriques du coefficient d'emmagasinement spécifique.....	142
Illustration 50 - Porosités d'interstices, hors porosité de fissures (Marsily, 2004)	143

Liste des tableaux

Tableau 1 - Données de base pour une modélisation d'écoulement souterrain.....	48
Tableau 2 - Données complémentaires pour modéliser explicitement le réseau hydrographique et/ou un réseau de drains souterrains	49

Liste des annexes

Annexe 1 Sommaire-type d'un rapport de synthèse hydrogéologique préalable à une modélisation maillée d'écoulement souterrain.....	127
Annexe 2 Valeurs usuelles de perméabilité, emmagasinement (libre et captif spécifique) et porosité d'interstices	139
Annexe 3 Sommaire-type d'un rapport descriptif d'une modélisation hydrogéologique maillée.....	145

"De la rigueur de la science"

« ...En cet empire, l'Art de la Cartographie fut poussé à une telle Perfection que la Carte d'une seule Province occupait toute une Ville et la Carte de l'Empire toute une Province. Avec le temps, ces Cartes Démesurées cessèrent de donner satisfaction et les Collèges de Cartographes levèrent une carte de l'Empire qui avait le Format de l'Empire et qui coïncidait avec lui, point par point. Moins passionnées pour l'étude de la Cartographie, les Générations Suivantes réfléchirent que cette Carte Dilatée était inutile et, non sans impiété, elles l'abandonnèrent à l'Inclémence du Soleil et des Hivers. Dans les déserts de l'Ouest, subsistent des Ruines très abîmées de la Carte... »

J.L. Borges, Histoire universelle de l'infamie. Histoire de l'éternité

cité dans " *La simulation par ordinateur change-t-elle les sciences ?*"

J.P. Delahaye, F. Rechenmann
Pour la Science, dossier n° 52 - 2006

Remarque liminaire :

Le terme « modèle » prête à confusion parce qu'il est utilisé à la fois pour désigner les logiciels de modélisation (MODFLOW®, MARTHE®, FEFLOW®, MODCOU®, etc.), souvent appelés à tort « modèles », et les jeux de données utilisés pour simuler les écoulements dans un système aquifère particulier (p. ex. modèle de la nappe de Beauce, modèle du Nord aquitain, etc.).

Dans ce document, le terme « modèle » désigne exclusivement la seconde acceptation, et l'on parle indifféremment de « code de calcul » ou de « logiciel de modélisation » pour la première.

1. Contexte

1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Ce document s'inscrit dans une démarche initiée en 2008 par la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) pour évaluer l'intérêt de créer un Pôle national de modélisation en hydrogéologie, avec l'objectif de doter la puissance publique d'une structure lui apportant expertise scientifique et appui technique opérationnel dans le domaine des écoulements souterrains et de la modélisation numérique.

Les consultations menées en 2009 et l'étude de faisabilité réalisée en 2010-2011 (rapport BRGM/RP-58605-FR²) ont montré que le projet de Pôle national de modélisation suscitait un intérêt réel et partagé, avec des attentes fortes et diverses. Des guides méthodologiques font notamment partie des demandes exprimées.

Sans attendre la création et la mise en route du Pôle de modélisation, la DEB et l'ONEMA ont chargé en 2012 le Brgm de rédiger un premier document sur la modélisation maillée.

1.2. OBJECTIFS DE CE DOCUMENT

Construire un modèle d'écoulement reste une entreprise délicate, surtout lorsque le modèle est d'extension régionale, aussi bien par la nécessité de collecter et de traiter des données très diverses que par la difficulté de les organiser et de les exploiter dans un modèle numérique. La démarche de modélisation se heurte souvent à des obstacles de différente nature, susceptibles d'entraîner retards, dérives budgétaires, atteinte partielle des objectifs, autant de menaces qui pèsent sur le projet.

Ce document est essentiellement consacré à la modélisation hydrogéologique maillée, sans référence à des codes de calcul particuliers. Il s'applique à des modèles de taille et de complexité très diverses car les principes et la démarche de modélisation numérique sont invariables. Une attention particulière est cependant portée aux modèles des grands systèmes aquifères parce qu'ils couvrent des configurations hydrogéologiques contrastées et sont à la fois complexes par leur structure géologique multicouche, de grande ampleur par le volume des données impliquées, délicats à mettre en œuvre du fait des difficultés numériques inhérentes aux « gros » maillages, et d'usage récurrent au gré d'actualisations périodiques.

Il ne s'agit ici ni d'un cours de modélisation, ni d'un exposé des moyens à employer pour résoudre des problèmes hydrogéologiques particuliers. Ne sont donc décrits ni les principes des modèles, ni les équations mises en œuvre, ni les algorithmes de résolution, ni les domaines d'application des différents types de modèles, sujets déjà largement traités ailleurs. Ne sont pas non plus détaillées les données requises pour une modélisation d'écoulement souterrain, sauf pour en donner une brève énumération, rappeler leur diversité et proposer quelques pistes d'amélioration pour leur analyse préalable.

² « Pôle national de modélisation en hydrogéologie. Étude de faisabilité ». Barthélémy Y. et Seguin J.J. Rapport BRGM/RP-58605-FR. Avril 2011.

Le document balaie les différentes étapes du processus de modélisation, de la synthèse hydrogéologique initiale aux simulations des scénarios prévisionnels, en indiquant les précautions à prendre et les erreurs à éviter aux étapes de conception, construction, calage et exploitation du modèle. Il peut donc être utile à la fois aux prescripteurs d'études impliquant une modélisation hydrogéologique et aux opérateurs de modèles d'écoulement souterrain, en leur servant d'aide-mémoire avant et pendant un projet de modélisation hydrogéologique.

L'objectif est ici de valoriser les expériences acquises et d'analyser les causes de succès et d'échec les plus courantes, afin d'en tirer des enseignements sur les bonnes pratiques en modélisation hydrogéologique maillée, indépendamment des logiciels utilisés. L'expérience montre, en effet, que les difficultés rencontrées relèvent le plus souvent d'une mauvaise appréciation de l'approche numérique à mettre en œuvre, d'un défaut d'organisation et de logistique lors des phases préalables à la modélisation, et/ou d'un manque d'expérience et de suivi au cours de la modélisation elle-même, sans exclure que les codes de calcul puissent être parfois mal adaptés à la résolution de problèmes hydrauliques concrets (gestion plus ou moins efficace des dénoyages, débordements, relations nappe-rivière, etc.).

Ne sont volontairement traités ici que les aspects hydrodynamiques de la modélisation des écoulements souterrains. Le transport hydrodispersif et les couplages thermiques et chimiques sont toutefois mentionnés lorsque leur modélisation ultérieure doit être prise en compte dès la phase de conception et de construction du modèle hydrodynamique, par exemple pour fixer les limites du modèle et définir la discrétisation du maillage. Ces domaines spécifiques pourraient faire l'objet de développements ultérieurs en raison de leur importance pour la remédiation des pollutions de nappe, l'exploitation énergétique du sous-sol, le stockage souterrain, etc.

1.3. PLAN DU RAPPORT

Le document est structuré en dix chapitres décrivant les grandes étapes d'un projet de modélisation :

- Choix de l'approche numérique la mieux adaptée au problème à traiter (Ch. 2)
- Équipe de modélisation (Ch. 3)
- Les grandes étapes d'une modélisation hydrogéologique (Ch. 4)
- Synthèse hydrogéologique préalable à une modélisation maillée (Ch. 5)
- Modélisation géologique 3D des systèmes aquifères complexes (Ch. 6)
- Construction d'un modèle maillé (Ch. 7)
- Calage du modèle (Ch. 8)
- Validation du modèle (Ch. 9)
- Scénarios prévisionnels (Ch. 10)
- Rapport de modélisation hydrogéologique (Ch. 11)

2. Choix de l'approche numérique la mieux adaptée au problème à traiter

Remarque :

Le contenu de ce chapitre fait largement appel à deux rapports publiés par le Brgm en 2001 et 2008 :

- « *Principes de résolution et solutions analytiques de quelques problèmes simples d'écoulement et de transport de masse en milieux poreux saturés et non saturés* », J.J. Seguin, 2001.
- « *Modélisation des hydrossystèmes : une aide à la gestion des ressources en eau* », J.J. Seguin, D. Thiéry, 2008.

2.1. SOLUTIONS ANALYTIQUES

En hydraulique souterraine, de nombreuses solutions analytiques ont été développées au fil du temps pour apporter des réponses numériques aux problèmes classiquement posés par l'exploitation des eaux souterraines.

Certaines de ces solutions peuvent être utilisées avec une simple calculatrice ou avec un tableur. D'autres nécessitent des connaissances plus ou moins poussées en programmation. Les plus simples à mettre en œuvre sont rassemblées dans un manuel du Brgm (Seguin, 2001), afin qu'elles puissent être programmées et exploitées dans le cadre d'études, pour tester une hypothèse, fixer un ordre de grandeur, dimensionner ou valider un modèle numérique, etc.

Le manuel publié en 2001 présente un ensemble de solutions analytiques correspondant à des problèmes classiques d'écoulement et de transport de masse en milieu poreux saturé et non-saturé. Face à la multiplicité des solutions élaborées dans le domaine de l'hydrogéologie quantitative (au sens large), il a bien fallu faire un choix et les solutions retenues en dernière instance ne représentent qu'un petit pourcentage des solutions publiées. En particulier, le milieu fissuré n'a pas été abordé (les solutions analytiques y sont d'ailleurs rares) et les solutions complexes, de programmation parfois délicate, ont été délaissées (réaliser un modèle numérique peut alors être plus rapide).

Ce sont donc des problèmes simples et susceptibles d'être rencontrés fréquemment qui ont été sélectionnés : ils correspondent à des écoulements monophasiques dans des milieux poreux homogènes (ou poreux homogènes équivalents). Certaines des solutions présentées constituent la base de l'hydrogéologie quantitative et sont bien connues (par exemple, les formules de Theis et de Jacob pour les pompages), mais leur champ d'application l'est peut-être moins et c'est la raison pour laquelle il a été jugé bon de le rappeler.

Les solutions analytiques atteignent cependant vite leurs limites parce que les conditions d'application sont en général très restrictives : milieu homogène, infini ou semi-infini, régime hydraulique permanent, ou régime transitoire en réponse à une impulsion brève ou continue.

Ces conditions d'utilisation restrictives peuvent cependant être étendues par le principe de superposition, à la fois dans l'espace avec la méthode des images, et dans le temps avec les techniques de convolution.

La combinaison de ces deux procédés étend beaucoup le domaine d'utilisation des solutions analytiques. **Il est ainsi possible de calculer de façon analytique :**

- **L'impact hydraulique d'un pompage à débit variable**, sous réserve que la formation exploitée puisse être assimilée à un aquifère captif, infini ou limité par 1, 2, 3 ou 4 limites étanches ou à potentiel imposé, orthogonales ou parallèles entre elles.
- **L'impact global et les interférences entre les puits d'un champ captant** constitué de plusieurs ouvrages de pompage exploités à des débits variables et évolutifs, dans les mêmes conditions hydrogéologiques que ci-dessus.
- **La propagation en nappe – dans un aquifère supposé homogène et semi-infini – d'une onde de crue ou d'une onde de marée survenant dans un cours d'eau ou dans un plan d'eau en relation hydraulique avec la nappe.** Cette fonctionnalité est très efficace pour estimer les niveaux piézométriques de hautes eaux dans une nappe bordée ou traversée par un cours d'eau (**situation fréquente en milieu urbain où les parkings souterrains, sous-sols, lignes de métro sont menacées d'inondation par les remontées de nappe résultant de crues sur le cours d'eau**).

2.2. MODÈLES NUMÉRIQUES DE SIMULATION

Différents types de modèles numériques sont mis en œuvre pour traiter les problèmes d'hydraulique souterraine lorsque les solutions analytiques ne sont plus pertinentes. On a l'habitude de les regrouper en trois catégories, brièvement décrites ci-après : les modèles spatialisés (dits aussi distribués ou maillés), les modèles globaux et semi-globaux de type conceptuel, les modèles globaux de type «boîte noire».

2.2.1. Les modèles spatialisés (dits aussi distribués ou maillés)

Sous-tendus par les équations de la physique des écoulements souterrains, les modèles maillés représentent l'approche de modélisation la plus aboutie pour rendre compte d'une réalité complexe.

Lorsque les équations sont traitées de façon déterministe (sans variable aléatoire), les modèles correspondants sont aussi dits "déterministes".

Pour tenter de rendre compte de la variabilité du milieu souterrain et des incertitudes associées, il existe aussi des approches stochastiques où les propriétés hydrogéologiques des différentes formations sont attribuées par tirage aléatoire.

2.2.2. Les modèles globaux (et semi-globaux) de type conceptuel

Ils utilisent un concept physique pour représenter le fonctionnement de l'hydrosystème, par exemple un assemblage de réservoirs en liaison hydraulique les uns avec les autres.

Ces modèles sont aussi appelés modèles "pluie-débit", "pluie-niveau" ou « pluie-débit-niveau ». Tout en utilisant des concepts ayant un sens physique pour représenter le comportement du système (des réservoirs et, pour certains, des lois de remplissage et de vidange), ils ne prennent cependant pas en compte la géométrie du milieu souterrain ni les équations physiques réelles. Les paramètres de ces modèles sont généralement dimensionnels : lames d'eau, constantes de temps, etc.

Cependant, bien que certains paramètres renvoient à une réalité physique (capacité de rétention d'un sol, coefficient d'emmagasinement, par exemple), d'autres paramètres (temps de demi-tarissement, etc.) résultent de la combinaison de paramètres physiques moyens sur le bassin (perméabilité, structure des formations, etc.) et ne peuvent en aucun cas être directement déduits de mesures de terrain.

Le modèle est global lorsque l'hydrosystème (un bassin versant, par exemple) est représenté par un seul assemblage de réservoirs superposés : le fonctionnement hydraulique du bassin est alors caractérisé par un ensemble de 5 ou 6 paramètres. Le modèle est dit semi-global quand le bassin est représenté par plusieurs modèles globaux indépendants distribués dans l'espace pour rendre compte de la variabilité spatiale de l'hydrosystème, ou pour simuler des échanges hydrauliques entre sous-bassins.

2.2.3. Les modèles globaux de type boîte noire

Ils sont ainsi qualifiés parce qu'ils consistent uniquement (ce qui ne signifie pas qu'ils soient simples) en une mise en relation d'une sortie du système modélisé (niveaux de nappe, débit d'un cours d'eau à l'exutoire de l'hydrosystème) avec une ou plusieurs variables d'entrée (pluie, ETP, débit de pompage, etc.). Les mises en relation s'opèrent par l'intermédiaire de fonctions paramétrées similaires à des lois de comportement des phénomènes physiques impliqués dans le fonctionnement hydraulique du bassin versant, ou bien par l'intermédiaire de fonctions sans forme analytique *a priori*, calculées de façon purement numérique.

2.3. CHAMPS D'APPLICATION

2.3.1. Représentation d'un hydrosystème

Ces trois types de modèles (spatialisés, globaux conceptuels, globaux boîte noire) ne sont pas interchangeables, chacun ayant ses spécificités propres.

Les modèles spatialisés (maillés) offrent la plus large gamme d'utilisation. Ils sont notamment incontournables pour la représentation des systèmes aquifères multicouches, systèmes complexes pouvant contenir plusieurs nappes libres ou captives, où chaque couche aquifère peut échanger de l'eau par drainance verticale avec les couches sus- et sous-jacentes. **Ils ne peuvent cependant pas être systématiquement utilisés pour tous les contextes hydrogéologiques car, s'ils sont bien adaptés aux environnements sédimentaires (milieux poreux et assimilés), ils ne conviennent pas, en général, pour modéliser les milieux discontinus tels que :**

- **milieux fissurés** (zone de socle, p. ex.), à moins de considérer que le milieu est assimilable à un milieu poreux, ce qui suppose une importante densité de fissures et fractures hydrauliquement bien interconnectées ;
- **milieux karstiques** : même si certains logiciels de modélisation maillée permettent de simuler des drains souterrains pour représenter les galeries de mine et les conduits karstiques, cette potentialité est rarement exploitée pour les réseaux karstiques faute d'en connaître la configuration géométrique détaillée.

Les milieux fissurés et les milieux karstiques peuvent, en revanche, être simulés par des modèles globaux puisque ceux-ci représentent l'hydrosystème comme un tout, indépendamment de sa structure interne.

2.3.2. Utilisation des modèles numériques d'écoulement

Les modèles numériques ont deux utilisations principales :

Outils de compréhension :

Ils permettent d'organiser, comparer, confronter et exploiter numériquement les données collectées sur un site d'étude, dans le but de comprendre et de quantifier le fonctionnement d'un système aquifère. Un modèle d'écoulement peut de ce fait aider à implanter un réseau de suivi et à identifier les secteurs en déficit d'information (qui pourront si nécessaire faire l'objet d'investigations complémentaires).

Outils de gestion et de prédition des ressources et/ou de la qualité des eaux :

Les modèles sont aussi largement utilisés pour prédire l'influence de pompages, estimer l'impact d'aménagements souterrains (parois moulées, excavations, drains...) sur les niveaux d'eau dans les nappes et sur les débits dans les cours d'eau, prévoir la migration de pollutions (trajectoires, temps de transfert, concentrations), aider à la gestion des ressources en eau, et évaluer les conséquences de changements climatiques sur ces ressources.

2.3.3. Simulations prévisionnelles de scénarios climatiques

Dans le domaine de la prévision des niveaux et des débits en fonction de scénarios climatiques, les modèles globaux sont performants du fait de leurs temps de calcul très brefs. Il est ainsi possible de simuler plusieurs centaines de scénarios climatiques, élaborés par un générateur de pluies et d'ETP, ou de longs scénarios de changement climatique fournis par les services météorologiques spécialisés, puis de faire une analyse statistique des résultats obtenus pour en déduire les fréquences d'occurrence à chacun des pas de temps de la période de simulation. Avec un modèle global, ce type de prévision ne prend que quelques minutes de calcul, alors qu'il faudrait plusieurs jours avec un modèle spatialisé de plusieurs dizaines de milliers de mailles et de centaines de pas de temps. Ceci étant, les résultats des modèles globaux n'étant pas spatialisés, l'usage de ces modèles se limite à l'étude de comportements aquifères globaux.

Limitations des modèles globaux dans la prévision

Si les caractéristiques physiques d'un bassin versant modélisé changent durant la période de prévision (p. ex., extension d'un réseau de drainage, modification de la couverture végétale, ...), **ou si les prélèvements sont sensiblement modifiés (à moins qu'ils ne constituent aussi une "entrée" du modèle)**, les prévisions ne sont plus valables car, pour ces modèles, les paramètres issus du calage sont rattachés aux caractéristiques du bassin versant et, en partie, à son état hydraulique, même si ces éléments sont masqués dans la procédure de calcul.

3. Équipe de modélisation

3.1. MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE = TRAVAIL PLURIDISCIPLINAIRE

La modélisation hydrogéologique maillée est une activité pluridisciplinaire et polymorphe impliquant de nombreuses thématiques : géologie, hydrogéologie, hydrologie, hydrochimie, hydroclimatologie, bases de données, systèmes d'information géographique (SIG), informatique, analyse numérique, télédétection, géophysique, etc.

En général, **il s'agit d'un travail complexe et difficile (particulièrement dans le cas d'un système multicouche d'extension régionale)**, requérant de conjuguer une bonne pratique de la modélisation, une expérience approfondie en hydrogéologie et sciences de la terre, et une connaissance détaillée du contexte hydrogéologique à modéliser. Par défaut, le modélisateur doit pouvoir s'appuyer sur un hydrogéologue « régional » qui lui fait bénéficier de sa connaissance de la zone d'étude tout au long du processus de modélisation.

3.2. MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE = LONG APPRENTISSAGE

L'ergonomie croissante des logiciels de modélisation peut laisser penser que la modélisation hydrogéologique est un exercice aisément maîtrisé dès lors qu'on a fait le tour des fonctionnalités proposées par le logiciel.

En réalité, il n'en est rien. S'il suffit de quelques heures pour explorer les menus d'un logiciel de modélisation, **il faut en général plusieurs années de pratique pour maîtriser les subtilités de cette discipline scientifique à part entière, pour concevoir et construire un modèle pertinent, ni trop simple ni trop complexe, pour procéder à son calage avec efficacité et réalisme, vérifier les résultats de simulation en les comparant à ceux d'approches analytiques simplifiées, acquérir les ordres de grandeur des paramètres hydrogéologiques, conduire des simulations prévisionnelles pertinentes, etc.**

Cet apprentissage n'est d'ailleurs jamais achevé car les logiciels évoluent en permanence, intègrent de nouveaux algorithmes plus performants qui requièrent des connaissances et une expérience spécifiques, gagnent en complexité par l'intégration de couplages performants avec des processus chimiques, thermiques, mécaniques, etc.

3.3. NOTION DE MASSE CRITIQUE POUR UNE ÉQUIPE DE MODÉLISATION

Comme de nombreuses disciplines, l'activité de modélisation hydrogéologique s'enrichit beaucoup de discussions et d'échanges entre opérateurs expérimentés, et il y a sans conteste un effet de masse critique pour une équipe de modélisation, sa compétence et son expérience croissant en général avec sa taille, la diversité des cursus de ses membres et l'étendue de leur pratique.

Ceci tient à la variété des compétences requises pour mener à bien une modélisation hydrogéologique conséquente – diversité généralement mieux couverte par une équipe étoffée que par une personne seule – ainsi qu'à l'enrichissement mutuel et au partage d'expérience de modélisateurs collaborant sur des problèmes complexes.

Autre avantage d'une équipe de modélisation étoffée : sa pérennité potentielle, approximativement corrélée à son effectif. Pour développer des modèles de gestion des grands aquifères régionaux destinés à être régulièrement actualisés et exploités, il s'agit là d'un point capital.

Si la notion d'équipe de modélisation est essentielle pour les modèles régionaux, où les compétences et expertises requises sont nombreuses, elle est beaucoup moins critique pour les modèles plus locaux destinés à étudier l'impact hydraulique d'aménagements souterrains d'extension réduite. Les modèles de ce type sont souvent réalisés par un hydrogéologue modélisateur opérant seul. Son expérience est alors cruciale, surtout si les enjeux socio-économiques de la modélisation sont importants. En tout état de cause, le rapport d'étude exposant la démarche et les résultats de modélisation gagne toujours à être validé par un autre hydrogéologue modélisateur disposant de l'expertise requise, conformément aux principes de l'Assurance Qualité.

3.4. SÉLECTION D'UN PRESTATAIRE DE MODÉLISATION

En pratique, **on ne peut qu'expressément recommander aux maîtres d'ouvrage d'attacher beaucoup d'importance à la rédaction d'un cahier des charges détaillé, réaliste et bien ciblé sur les objectifs à atteindre, puis à la sélection d'un prestataire expérimenté en modélisation hydrogéologique, tant la composition et l'expérience de l'équipe qui mènera à bien le projet sont des éléments clefs pour sa réussite.**

4. Les grandes étapes d'une modélisation hydrogéologique

Quel que soit le type de modèle retenu, une modélisation hydrogéologique comporte toujours plusieurs phases distinctes, brièvement exposées ici, puis détaillées et commentées aux chapitres 5 à 11, surtout dans la perspective de modèles hydrogéologiques maillés multicouches, axe privilégié de ce document.

4.1. DÉFINITION DU CADRE DE LA MODÉLISATION

Une première étape, souvent mal individualisée parce qu'effectuée de façon concomitante à l'élaboration du cahier des charges, consiste à définir les objectifs de la modélisation.

Ces objectifs conditionnent le type de modèle à mettre en œuvre, l'extension de la zone à modéliser, la nature des phénomènes à simuler, les pas d'espace et de temps à adopter pour les simulations, etc. Ils orientent aussi les phases initiales de collecte, d'analyse et de synthèse des données.

4.2. COLLECTE, ANALYSE ET SYNTHÈSE DES DONNÉES

Les données à acquérir et à traiter pour un modèle maillé concernent la structure géologique du/des réservoir(s) et des encaissants, les propriétés hydrogéologiques de ces formations, le contexte hydraulique, les chroniques hydroclimatiques, l'historique des prélèvements et des apports. Lorsque les écoulements souterrains interagissent avec un réseau hydrographique, il faut en outre caractériser les échanges entre nappe(s) et cours d'eau (chapitre 5).

Enfin, il n'est pas rare que des campagnes de mesure, investigations de terrain (nivellation, jaugeages, etc.), enquêtes socio-économiques, analyse de photos aériennes, imagerie satellite, recherches bibliographiques, etc. s'avèrent nécessaires pour combler des lacunes de données jugées trop pénalisantes.

4.3. CONSTRUCTION OPTIONNELLE D'UN MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D

Pour un modèle spatialisé complexe et de grande étendue, couvrant par exemple un système aquifère multicouche, il est fortement recommandé d'utiliser un modeleur géologique 3D, seul à même de valoriser l'ensemble des données structurales disponibles et de construire une représentation numérique fidèle, cohérente et actualisable de la structure géologique. Celle-ci est ensuite exportée vers le modèle d'écoulement pour en constituer l'ossature (voir explications détaillées au chapitre 6 « Modélisation géologique 3D des systèmes aquifères complexes »).

4.4. CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT

Construire un modèle, c'est organiser les données sous une forme utilisable par le logiciel de modélisation, en générant des fichiers compatibles avec ce logiciel.

La construction d'un modèle spatialisé consiste à découper l'espace selon une grille plus ou moins régulière, en 2 ou 3 dimensions, puis à renseigner chacune des mailles ainsi créées avec des données chiffrées décrivant la géométrie du système aquifère, les propriétés hydrogéologiques du milieu, les conditions aux limites et les entrées/sorties hydrauliques.

4.5. CALAGE DU MODÈLE (OU CALIBRATION)

Cette étape du travail de modélisation est déterminante car elle vise à identifier une distribution spatiale des paramètres hydrogéologiques qui permette d'atteindre une bonne adéquation entre résultats de simulation et observations de terrain, aussi bien en termes de charges hydrauliques que de débits de puits, sources et cours d'eau.

Dans la mesure du possible, la période d'observation retenue pour le calage du modèle doit comporter des épisodes hydrodynamiques proches de ceux qui seront simulés lors des scénarios prévisionnels, de façon à pouvoir apprécier la représentativité du modèle dans cette plage de fonctionnement.

Pour un modèle spatialisé, les paramètres à ajuster au cours du calage sont ceux qui définissent les propriétés hydrauliques du milieu et les recharges par les précipitations et/ou les irrigations. Ces informations ne sont en effet connues que ponctuellement et le calage est destiné à en proposer une distribution spatiale généralisée. Pour faciliter cette opération, des zones homogènes peuvent être prédéfinies sur la base d'une analyse hydrogéologique préalable, ou être constituées en cours de calage grâce à l'amélioration progressive des connaissances et à la meilleure perception du comportement dynamique du système aquifère apportées par cette phase de travail.

Des procédures de calage automatique sont souvent proposées pour accélérer la phase de calage, mais elles restent en général peu adaptées aux systèmes aquifères multicouches complexes. En pratique, l'approche traditionnelle par "essais-erreurs" reste très utilisée. Le calage du modèle s'en trouve allongé mais, en contrepartie, l'ajustement manuel des paramètres permet au modélisateur d'apprécier la réactivité du modèle, d'identifier les secteurs critiques, et de mesurer le poids relatif des différentes composantes hydrauliques dans le fonctionnement du système aquifère.

La qualité du calage et son évolution sont appréciées visuellement par superposition des chroniques de charge et de débit simulées et mesurées, et par l'intermédiaire de critères numériques permettant d'évaluer globalement les écarts entre valeurs simulées et observées.

4.6. VALIDATION DU MODÈLE

La validation sert à vérifier que le modèle est capable de reproduire le comportement du système aquifère lorsque celui-ci est soumis à un ensemble de sollicitations internes et externes. Concrètement, le modèle calé est utilisé pour simuler une/des séquence(s) de données volontairement mise(s) de côté pendant la phase de calage ; les résultats de simulation (charges, débits) sont ensuite comparés aux observations de terrain. En pratique, la principale difficulté de l'opération tient dans le choix de la période d'observation à exclure de la phase de calage.

4.7. EXPLOITATION DU MODÈLE CALÉ

Une fois calé, le modèle est utilisé pour simuler différents scénarios prévisionnels, définis en fonction des objectifs assignés au démarrage de l'étude.

4.8. CHRONOGRAMME INDICATIF D'UNE OPÉRATION DE MODÉLISATION

Sans que l'on puisse en faire une règle générale :

- Les temps requis pour mener à bien chacune des grandes étapes d'une modélisation d'écoulement souterrain, à savoir la synthèse hydrogéologique préalable, une éventuelle modélisation géologique 3D, puis le calage du modèle et la simulation de scénarios, sont souvent de même ampleur, de quelques jours à quelques mois chacune selon la complexité du système aquifère, la diversité des sollicitations auxquelles il est soumis, la quantité des observations disponibles pour le calage, et la précision requise pour les simulations prévisionnelles.
- Parce qu'elles font appel à des compétences différentes et occupent sensiblement la même durée, la synthèse hydrogéologique et l'éventuelle modélisation géologique 3D peuvent souvent être menées de front, par des équipes distinctes travaillant de façon concertée, pour s'achever de façon concomitante. Ce faisant, la modélisation géologique 3D ne retarde pas le processus global, tout en lui faisant faire un indéniable saut qualitatif et en facilitant grandement les mises à jour ultérieures lors de l'acquisition de nouvelles données géologiques.

La diversité des environnements et des problèmes à traiter par modélisation hydrogéologique ne permet pas d'indiquer des durées moyennes de construction, calage et exploitation des modèles d'écoulement, la fourchette allant de quelques jours à plusieurs mois pour chacune des phases.

Alors que quelques jours suffisent en général pour modéliser l'impact d'un petit champ captant, l'expérience montre qu'il faut tabler sur 1.5 à 3 ans pour un système aquifère multicouche d'extension régionale, cette durée globale se répartissant approximativement en 9 à 18 mois pour mener en parallèle la synthèse hydrogéologique et la modélisation géologique 3D, suivis d'un temps équivalent pour la construction, le calage et l'exploitation du modèle d'écoulement souterrain (Illustration 1).

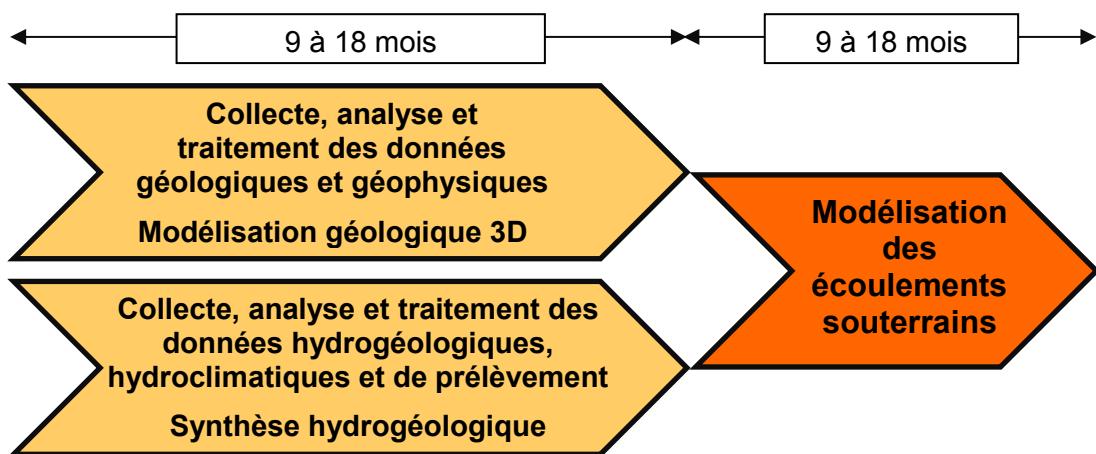


Illustration 1 – Chronogramme indicatif des grandes étapes d'une modélisation hydrogéologique régionale

5. Synthèse hydrogéologique préalable à une modélisation maillée

5.1. ÉTAPES PRÉALABLES À LA MODÉLISATION

Un travail significatif de collecte, traitement, analyse, interprétation et synthèse des données qui vont être utilisées pour le modèle est toujours nécessaire avant d'entamer la phase de modélisation elle-même. Ce travail de synthèse débouche sur un modèle conceptuel d'écoulement qui schématise le fonctionnement hydraulique du système aquifère. Lorsque le contexte géologique et structural est complexe, une modélisation géologique 3D conduite en parallèle peut apporter une plus-value indéniable, sans allonger la procédure globale parce que la structure géologique est ensuite exportée vers le modèle d'écoulement dont elle va constituer l'ossature.

En pratique, on constate que (i) l'absence ou l'insuffisance de synthèse hydrogéologique initiale, menée dans une perspective de modélisation hydrogéologique, (ii) l'impasse faite sur une modélisation géologique 3D lorsque le système aquifère est complexe, et/ou (iii) un télescopage entre ces différentes tâches, sont des causes fréquentes de déboires, notamment pour les modèles de grande ampleur.

On ne saurait donc trop recommander de bien individualiser ces différentes tâches et de les formaliser par des documents écrits, qui serviront ensuite de référence pour la modélisation hydrogéologique *stricto sensu*.

5.2. SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE

5.2.1. Données requises pour une modélisation hydrogéologique

En hydrogéologie, les modèles maillés mettent en œuvre des équations décrivant explicitement les lois de l'hydraulique souterraine, les échanges entre nappes et cours d'eau, et éventuellement les lois de comportement associées au transport hydrodispersif, chimique et thermique. Ces différentes équations font appel aux paramètres et variables énumérés aux sections 1, 2 et 3 du Tableau 1, dont les valeurs sont à donc à renseigner dès la construction du modèle. La section 4 fournit la liste des données qui serviront de référence pour le calage du modèle en hydraulique, sous forme de mesures ponctuelles, cartes ou chroniques temporelles.

Selon la façon dont les cours d'eau et éventuels drains souterrains sont représentés dans le modèle d'écoulement (cf. Ch. 7.4 « Réseau hydrographique »), d'autres jeux de données peuvent aussi s'avérer nécessaires : ils sont énumérés au Tableau 2.

N.B. :

Par convention, on appelle ici « 1^{ère} couche » d'un modèle multicouche la couche supérieure de la pile litho-stratigraphique modélisée, et « dernière couche » la couche inférieure de cette pile.

Données requises en régime hydraulique permanent et transitoire		
Nature	Données à fournir	Remarques
<u>1 - Géométrie 3D du domaine modélisé</u> <ul style="list-style-type: none"> Affectation d'une valeur à chaque maille de la grille de modélisation par interpolation des cotes d'interface entre formations relevées en forage. <p>ou</p> <ul style="list-style-type: none"> Modélisation géologique 3D, fortement recommandée pour un système aquifère multicouche. 	<ul style="list-style-type: none"> Cotes du substratum de chaque couche (m NGF). Cotes du toit de la première couche si la nappe est totalement ou partiellement captive dans cette première couche (m NGF). Surface topographique. 	Pour un modèle monocouche avec un aquifère à nappe toujours libre, la géométrie est définie uniquement par la cote du substratum de la couche. Une nappe captive et un système aquifère entièrement captif peuvent être modélisés via une distribution spatiale des transmissivités, sans notion de géométrie. La surface topographique est utilisée pour gérer les débordements de nappe et calculer les profondeurs de la nappe sous le sol.
<u>2 - Paramètres hydrogéologiques de calage (spatialisés)</u> Seules quelques valeurs ponctuelles étant connues, les grilles sont complétées sur la base d'hypothèses hydrogéologiques. Le calage du modèle permet d'ajuster la distribution spatiale de ces paramètres.	Perméabilités (m/s) ou Transmissivités (m^2/s)	
	Coefficients d'emmagasinement : <ul style="list-style-type: none"> spécifique (m^{-1}) pour les nappes captives « libre » (sans unité) pour toutes les mailles. 	Uniquement en régime transitoire
<u>3 - Données d'entrée (variables dans le temps)</u> Doivent être introduites par maille (prélèvements, injections) ou par zone (recharge par infiltration). Dans le cas d'un régime permanent, on utilise des valeurs se rapportant à la période considérée.	Recharge (mm /unité de temps)	Estimation <i>a priori</i> à l'aide d'un bilan hydroclimatique à partir de la pluie, de l'ETP et de la "Réserve Utile" des sols. La recharge ainsi calculée <i>a priori</i> peut ensuite être ajustée lors du calage. Un modèle global peut être utilisé pour l'évaluation initiale.
	Prélèvements (pompages) (m^3 / unité de temps)	- Mesures ponctuelles - Chroniques (pour transitoire)
<u>4 - Données servant de références pour le calage du modèle</u> (et éventuellement de conditions initiales pour les charges)	Charges hydrauliques (m)	- Mesures ponctuelles, cartes - Chroniques (pour transitoire)
	Débits aux exutoires (m^3/s)	Sources, cours d'eau, drains

Tableau 1 - Données de base pour une modélisation d'écoulement souterrain

Couplage avec un réseau hydrographique ou des drains souterrains		
Nature	Données à fournir	Observations
<u>Description du réseau des cours d'eau et drains.</u> Spécification de l'arborescence : Le réseau est découpé en affluents et chaque affluent en tronçons (un tronçon étant l'intersection du cours d'eau avec une maille).	Numérotation des affluents et des tronçons. Longueur et largeur de chaque tronçon (m). Cote du fond (m) de chaque tronçon.	Chaque tronçon est en relation hydraulique avec la maille traversée.
<u>Paramètres de couplage</u> À introduire dans chaque maille traversée par les cours d'eau.	1) Cours d'eau Épaisseur de la couche de liaison entre aquifère et cours d'eau (m). Perméabilité de cette couche (m/s).	= Épaisseur de "colmatage", à fournir uniquement pour les cours d'eau. = Perméabilité de "colmatage"
	2) Drains Perméabilité d'échange (m/s)	
<u>Données d'entrée (variables dans le temps)</u>	Niveaux des cours d'eau, ou débits + relation débit/niveau.	
<u>Données servant de références pour le calage</u>	Débits des cours d'eau ou drains aux stations hydrométriques.	- Mesures ponctuelles - Chroniques (pour le transitoire)

Tableau 2 - Données complémentaires pour modéliser explicitement le réseau hydrographique et/ou un réseau de drains souterrains

5.2.2. Synthèse hydrogéologique destinée à une modélisation d'écoulement souterrain

Un modèle d'écoulement souterrain intègre des données de différente nature, qu'il faut avoir analysées et interprétées au cours d'une phase de synthèse hydrogéologique préalable. Plus ou moins conséquente selon le volume de données à traiter et la complexité du système aquifère à modéliser, la synthèse hydrogéologique doit se concrétiser par (i) un support écrit qui servira ensuite de référence pour la phase de modélisation s.s., (ii) des fichiers de données qui seront utilisés pour construire et caler le modèle d'écoulement.

Cette synthèse hydrogéologique va bien au-delà d'un simple inventaire des données disponibles, d'une base de données, d'un SIGES (Système d'Information Géographique sur les Eaux Souterraines), d'une description hydrogéologique des formations constituant le système aquifère, etc. Elle est tout cela à la fois mais, étant destinée à fournir les informations et données nécessaires à une modélisation numérique, elle doit aussi proposer un modèle conceptuel d'écoulement et apporter les éléments chiffrés qui permettront ensuite de construire le modèle numérique d'écoulement (géométrie du réservoir, perméabilité et emmagasinement des formations, conditions aux limites, chroniques de pompage, chroniques hydroclimatiques, etc.), et de le caler pour restituer au mieux les observations et mesures de terrain retenues comme références (mesures ponctuelles et chroniques piézométriques, hydrométriques, hydrochimiques, thermiques, etc.).

En pratique, **la représentativité d'un modèle d'écoulement dépend étroitement de (i) la densité et la qualité des données utilisées pour construire le modèle numérique et le caler, (ii) la pertinence des hypothèses de modélisation adoptées, (iii) la qualité de restitution du comportement du système aquifère simulé par le modèle en fin de calage.**

Ceci étant, quel que soit le soin apporté aux différentes étapes de modélisation, **la représentativité et la capacité prédictive d'un modèle restent inscrites dans la plage de fonctionnement sur laquelle a porté le calage, en termes de débits, charges hydrauliques et conditions hydroclimatiques. Plus on s'éloigne de la zone de fonctionnement balayée pendant le calage, plus le risque augmente que les prévisions du modèle s'écartent des évolutions réelles du système aquifère.**

Pour élargir le champ d'exploitation futur du modèle, il faut donc veiller, dès la phase de synthèse hydrogéologique initiale, à sélectionner pour le calage les périodes qui intègrent les plus hauts/bas niveaux/débits observés.

Pour les systèmes aquifères à forte inertie, une analyse rétrospective des évolutions socio-économiques ayant marqué le domaine d'étude est souvent indispensable pour comprendre les évolutions observées sur la nappe, notamment lorsque celles-ci résultent de modifications des pressions anthropiques dont les conséquences peuvent se manifester pendant des années, voire des décennies. Il peut s'avérer nécessaire, par exemple, de reconstituer de longues chroniques de pompage et de charge hydraulique si l'historique des activités industrielles (ouverture/fermeture de sites industriels et/ou miniers, avec démarrage/arrêt des pompages associés) et agricoles (développement de l'irrigation, déploiement de réseaux de drainage), et/ou la mise en service de grandes infrastructures (canaux, retenues, ouvrages linéaires en déblais, etc.) ont durablement modifié la piézométrie et le comportement des nappes. Ceci, du moins, tant que le système aquifère n'a pas retrouvé un nouvel équilibre hydraulique du fait de sa grande inertie.

5.2.3. Sommaire-type d'un rapport de synthèse hydrogéologique destiné à une modélisation d'écoulement souterrain

À titre indicatif, un sommaire-type de rapport de synthèse hydrogéologique élaboré dans la perspective d'une modélisation d'écoulement souterrain est proposé en Annexe 1. Cette synthèse présente notamment les jeux de données qui serviront à la construction et au calage du modèle.

5.3. MODÈLE CONCEPTUEL D'ÉCOULEMENT

Le modèle conceptuel d'écoulement décrit de façon schématique le système aquifère étudié. Il en précise l'extension horizontale et verticale, détaille la succession des aquifères et aquitards, décrit la lithologie et les caractéristiques hydrogéologiques dominantes, explicite les conditions hydrauliques aux limites du système, évalue les principales composantes des débits qui y transitent - si possible avec leurs ordres de grandeur respectifs - et identifie les zones de recharge et d'exutoire.

Cette description gagne à être accompagnée d'un schéma illustrant le fonctionnement du système aquifère tel qu'il est perçu à l'issue de la synthèse hydrogéologique (Illustration 2). Le modèle d'écoulement est ensuite une transposition numérique du modèle conceptuel, sur la base des fichiers et jeux de données constitués pendant la synthèse hydrogéologique.

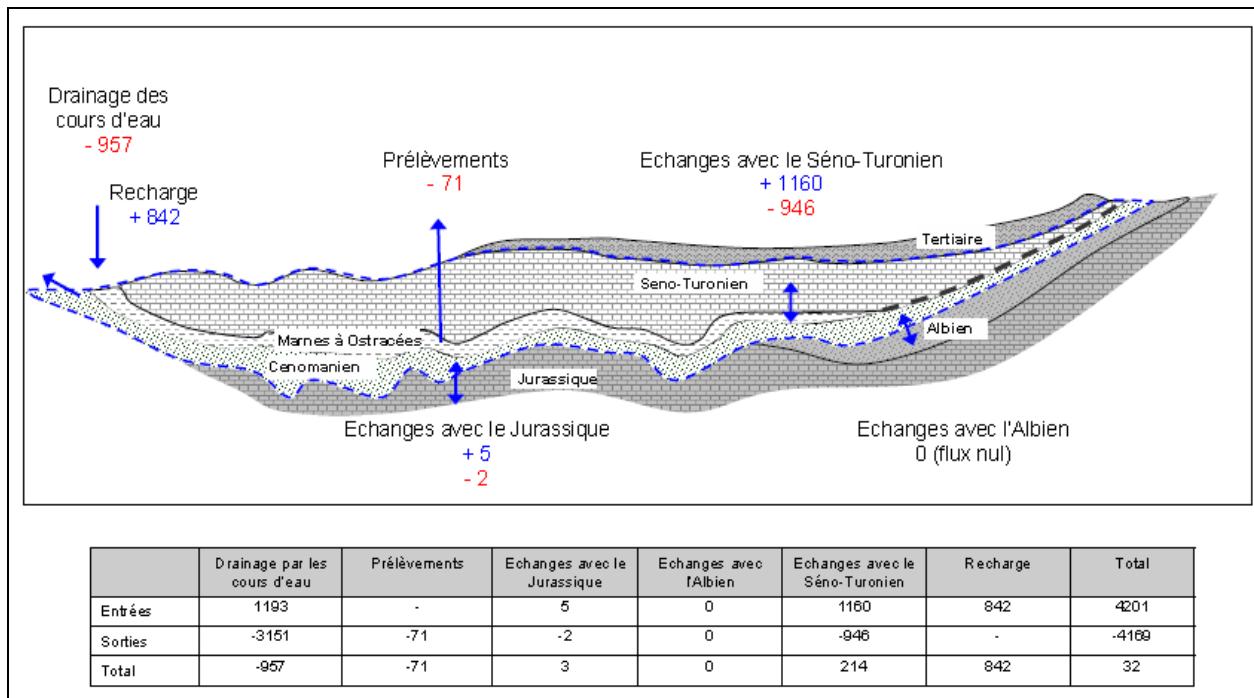


Illustration 2 – Exemple de schéma conceptuel, avec bilan hydraulique associé
(N.B. : les chiffres indiqués ont été révisés après calage du modèle - source : SOGREAH)

5.3.1. Extension « horizontale » du domaine modélisé

Dans la mesure du possible, les limites du domaine modélisé doivent coïncider avec celles du système aquifère pour ne pas biaiser les résultats de simulation par des limites artificielles trop proches ou mal calibrées. Différentes considérations peuvent cependant amener à déroger à cette règle de conduite : limites naturelles très éloignées, contexte géologique/hydrogéologique mal connu, budget/délai insuffisant, etc. D'autres considérations, plus hydrauliques, peuvent aussi conduire à réduire volontairement l'extension de la zone modélisée. Par exemple, si le problème à traiter est local et que son impact réel ou présumé est restreint, il n'est pas nécessaire de modéliser un domaine excédant de beaucoup la zone d'influence escomptée. Dans ces conditions, on peut délibérément choisir de borner la zone modélisée en adoptant des limites plus proches que les limites naturelles du système.

Lorsque des limites « artificielles » sont retenues, elles doivent toujours être choisies avec soin, en s'attachant à respecter deux critères :

- Se situer au-delà de la zone d'influence des scénarios les plus contraignants en termes d'extension spatiale des impacts simulés.**

Une estimation préalable par approche analytique³ permet en général d'évaluer le rayon d'influence d'un champ captant, d'une paroi moulée, d'un parking souterrain, etc. pour des conditions d'exploitation données. On peut alors choisir en connaissance de cause une limite au-delà de la distance ainsi évaluée.

³ Par exemple, formule de Theis ou de Jacob pour évaluer l'impact d'un pompage ou d'un champ captant, solution de l'équation de la diffusivité pour décrire la propagation d'une onde de pression dans un aquifère afin d'estimer l'impact d'un déblai entaillant la nappe, etc.

- **Assigner aux limites artificielles des conditions hydrauliques permettant de restituer au mieux l'influence de la zone non modélisée** ; cette règle est impérative pour ne pas fausser les résultats de simulation (cf. chapitre 8.2.2 « Conditions aux limites »).

Des contrôles périodiques doivent ensuite être effectués pendant les différentes étapes de calage puis d'exploitation du modèle pour s'assurer que les limites adoptées et les conditions aux limites associées restent appropriées aux différentes configurations simulées et qu'elles ne biaissent pas les résultats de calcul (cf. chapitre 8.3.1 « Définir des conditions aux limites pertinentes »).

5.3.2. Extension et discrétisation « verticale » de la série hydrogéologique

Les hydro-systèmes étant hétérogènes, la modélisation cherche à offrir une représentation simplifiée du contexte naturel sans dénaturer les phénomènes à représenter (on parle dans certains cas de représentation équivalente). D'un point de vue hydrogéologique, il s'agit de représenter le plus simplement possible la succession des formations de perméabilité contrastée qui constituent le système aquifère. En général, on fait en sorte que le modèle numérique ne contienne pas plus de dix à vingt formations distinctes, de façon à ce que le niveau de complexité du processus de modélisation et les temps de calcul associés restent maîtrisables.

En pratique, **la série litho-stratigraphique régionale est d'abord schématisée sur la base de considérations hydrogéologiques, dans le but de regrouper les formations par ensembles de propriétés similaires et de parvenir à une succession d'entités assimilables à des aquifères ou aquitards mineurs/moyens/majeurs. Si nécessaire, la série hydrogéologique ainsi constituée est ensuite condensée en fusionnant les niveaux de même nature (aquifère ou aquitard), de façon à former une alternance d'horizons, aquifères et aquitards.**

D'autres opérations peuvent aussi être envisagées, par exemple en regroupant une suite aquitard-aquifère mineur-aquitard en un aquitard global, ou une suite aquifère-aquitard mineur-aquifère en un aquifère global affecté d'une anisotropie de perméabilité pour réduire la composante verticale.

En pratique, **la façon de réaliser ces simplifications progressives dépend étroitement des objectifs assignés au modèle**, selon qu'il est destiné à représenter les écoulements et échanges hydrauliques au sein de la totalité de la série litho-stratigraphique, ou qu'il vise à restituer précisément le comportement d'un niveau aquifère particulier, voire d'une zone spécifique. Dans le second cas, on peut choisir de ne conserver le détail hydrogéologique que dans la/les zone(s) d'intérêt et de simplifier ailleurs la série litho-stratigraphique par regroupements successifs.

À titre d'exemple, l'illustration 3 montre les étapes de simplification successives pour regrouper les 20 unités litho-stratigraphiques (colonne gauche) différencier dans le système aquifère des plaines côtières de Gabès (Tunisie) en 18 entités hydrogéologiques (colonne centrale), puis pour les condenser en 11 couches de modèle alternativement aquifères et aquitards (colonne droite).

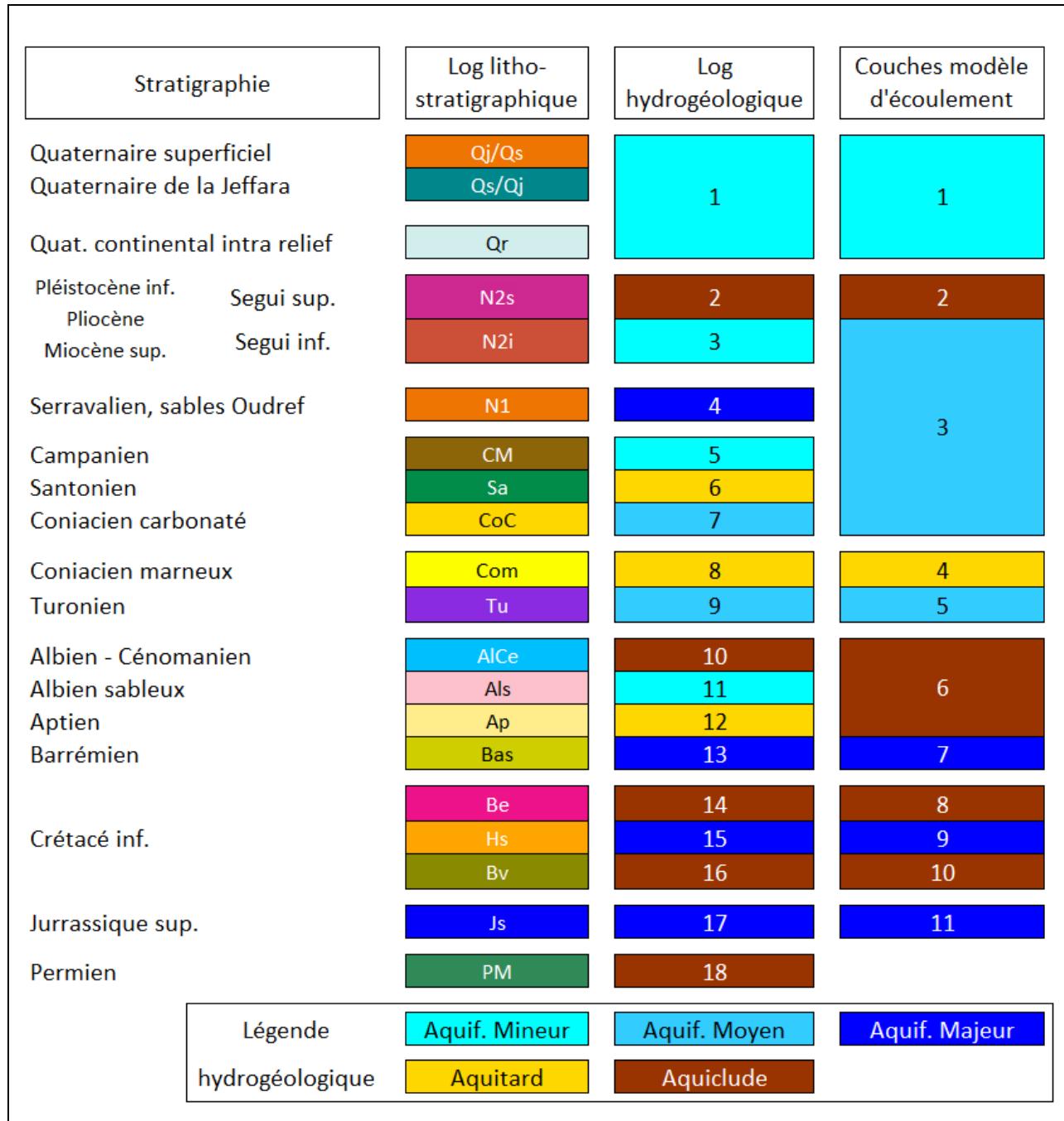


Illustration 3 – Système aquifère des plaines côtières de Gabès (Tunisie).

Simplifications successives pour condenser les 20 unités litho-stratigraphiques (colonne gauche) en 18 entités hydrogéologiques (col. centrale), puis 11 couches du modèle d'écoulement (col. droite)

5.4. DÉROULEMENT ET PHASAGE DES OPÉRATIONS

Pour éviter que les étapes de construction, voire de calage, du modèle d'écoulement, soient déjà largement entamées alors que de nouvelles données continuent à parvenir à l'équipe de modélisation, avec le risque d'obliger à des retours en arrière coûteux et retardateurs, **la phase de synthèse hydrogéologique préalable doit être aussi découplée que possible de la modélisation elle-même. Dans l'idéal, cette dernière ne devrait être engagée qu'une fois le rapport de synthèse hydrogéologique finalisé et validé par les différentes parties prenantes.**

Au-delà du phasage temporel des étapes de synthèse hydrogéologique préalable et de modélisation, quelques dispositions pratiques peuvent améliorer significativement le déroulement et l'efficacité globale des opérations :

- **La phase de synthèse hydrogéologique initiale gagne beaucoup à être ponctuée de réunions d'avancement périodiques entre modélisateurs, maître d'ouvrage, et experts régionaux**, de façon à faire régulièrement le point sur la collecte des données, leur interprétation, les incertitudes et inconnues résiduelles, etc. Ces concertations techniques en cours d'avancement sont aussi l'occasion de valider progressivement le travail réalisé, de le réorienter si nécessaire, d'analyser et de comparer différentes hypothèses, etc.
- Si d'éventuelles anomalies et/ou lacunes de données sont détectées durant la synthèse hydrogéologique préalable, deux options sont envisageables :
 - o ou bien il est possible d'y remédier, et dans ce cas le complément de collecte/traitement nécessaire est effectué dès la phase initiale de synthèse, ce qui permet ensuite de mener la modélisation hydrogéologique sans devoir l'interrompre pour revenir aux données de base ;
 - o ou bien il n'est pas possible d'acquérir les données permettant de corriger les anomalies/lacunes détectées, et dans ce cas une ou des variantes doivent être envisagées, sous forme d'hypothèses à tester et de jeux de données associés, voire en remplaçant la modélisation maillée par une approche plus rustique (évaluation analytique, modèle global, etc.).
- **Une fois rédigé, le rapport de synthèse hydrogéologique est transmis pour vérification et validation aux différentes parties prenantes, en particulier au maître d'ouvrage et aux experts qui l'assistent. Cette étape de contrôle est capitale pour s'assurer que toutes les informations et données disponibles ont été prises en considération, qu'elles ont été interprétées à bon escient, que les ordres de grandeur sont respectés et qu'aucune information ou donnée importante n'a été omise.** Le processus de validation porte aussi sur les traitements appliqués aux données, les hypothèses de différente nature adoptées, le modèle conceptuel proposé et les débits associés, etc.
- **Le rapport de synthèse hydrogéologique, qui contient une analyse actualisée des connaissances et des données nécessaires à la modélisation, sert ensuite de référence tout au long de la construction et du calage du modèle d'écoulement.**

6. Modélisation géologique 3D des systèmes aquifères complexes

6.1. GÉOMÉTRIE « SIMPLE » DES AQUIFÈRES MONOCOUCHES

Une forte proportion de modèles maillés d'écoulement souterrain se rapporte à des contextes hydrogéologiques « simples » d'aquifères monocouches, souvent constitués de dépôts alluviaux ou de réservoirs calcaires, crayeux ou gréseux. Ces modèles ont souvent pour objectif d'évaluer la productivité d'un champ captant, de prévoir l'impact hydraulique d'un aménagement souterrain en zone urbaine (parking, paroi moulée, etc.), de dimensionner un doublet géothermique de très basse énergie, de simuler la migration d'une pollution, ou de tester différents dispositifs de remédiolation, etc. **La structure du réservoir aquifère est alors définie par deux surfaces, celle du « toit » de la formation et celle du mur (souvent assimilé à un substratum « imperméable »).**

Sauf exception, la phase de construction de la structure géométrique du réservoir aquifère est ainsi réduite à sa plus simple expression, sans qu'il soit besoin de procéder à analyse géologique détaillée. Les difficultés de modélisation tiennent plutôt aux incertitudes liées à l'hétérogénéité des milieux alluviaux, à la fracturation des réservoirs calcaires et crayeux, aux échanges avec les cours d'eau proches, à l'indétermination des apports par les coteaux, etc.

6.2. STRUCTURE COMPLEXE DES SYSTÈMES AQUIFÈRES MULTICOUCHES

En revanche, les modèles destinés à simuler les écoulements souterrains dans les systèmes aquifères complexes, notamment multicouches, se heurtent en général à une première difficulté, celle de disposer d'une représentation numérique fidèle et cohérente de la structure géologique, représentative de l'empilement des formations plus ou moins perméables, d'extensions variables, qui constituent le système aquifère. Qui plus est, ces formations peuvent être recoupées par des accidents structuraux générateurs de discontinuités dans les écoulements, soit du fait de leur rejet vertical, soit par leur propre nature hydraulique (imperméable ou conductrice).

En pratique, l'interpolation des interfaces entre les formations successives d'un bassin sédimentaire est d'autant plus approximative que la couche est profonde, ceci pour au moins deux raisons : (i) l'éloignement des zones d'affleurement réduit la pertinence des extrapolations menées à partir des informations altimétriques de surface, (ii) le nombre de forages recoupant une interface décroît en général avec sa profondeur, ce qui réduit la quantité de mesures disponibles en profondeur. Il en résulte que le transfert dans un modèle 3D de surfaces de mur (base) interpolées pour des formations successives à partir de données d'affleurement et de forages, fait en général apparaître des incohérences géométriques qui se manifestent par des épaissements et amincissements de couche abusifs, voire par des intersections injustifiées. Ces erreurs géométriques s'avèrent difficiles à corriger parce que les modifications apportées à une couche ont souvent pour effet de propager les incohérences vers les couches encaissantes.

En outre, lorsque les problèmes géométriques sont détectés au moment de la construction du modèle d'écoulement souterrain, l'indispensable phase de correction tarde le déroulement du projet, parfois de façon importante, même si à ce stade les corrections apportées ne sont en général que des palliatifs, ponctuels, approximatifs, et sans réel fondement géologique.

6.3. INTÉRÊT D'UNE MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D

Pour éviter ces difficultés, la meilleure façon de procéder consiste à conduire une phase de modélisation géologique 3D bien individualisée, préalable à la modélisation hydrogéologique stricto sensu, de façon à construire la structure géométrique du futur modèle d'écoulement à l'aide d'un modeleur géologique⁴. Ce type d'outil est spécifiquement conçu pour tirer le meilleur parti de toutes les données susceptibles de nourrir une structure géologique en trois dimensions, qu'elles soient topographiques, géologiques ou géophysiques.

Les structures géologiques ainsi construites sont beaucoup plus cohérentes et conformes aux données de terrain que celles qui résultent d'interpolations indépendantes menées sur chacune des couches. Parce qu'il intègre de façon rationnelle et cohérente l'ensemble des connaissances disponibles, un modèle géologique peut en outre être actualisé assez facilement et sans perte d'informations lorsqu'arrivent de nouvelles données géologiques et/ou géophysiques.

En outre, la synergie entre la modélisation géologique et la modélisation hydrogéologique permet en général d'accélérer la seconde étape, et *in fine* le processus global de modélisation, ceci pour deux raisons :

- pendant la phase de construction, voire de calage, du modèle d'écoulement, les retours en arrière qui, en l'absence de modélisation géologique 3D s'avèrent fréquents pour corriger la structure géométrique du modèle d'écoulement, deviennent inutiles parce que le modeleur géologique garantit une excellente cohérence spatiale en 3D,
- la pertinence et la représentativité de la structure géométrique construite par modélisation géologique 3D favorisent une bonne restitution des différentes composantes d'écoulement par le modèle hydraulique, contexte favorable au calage du modèle hydrogéologique.

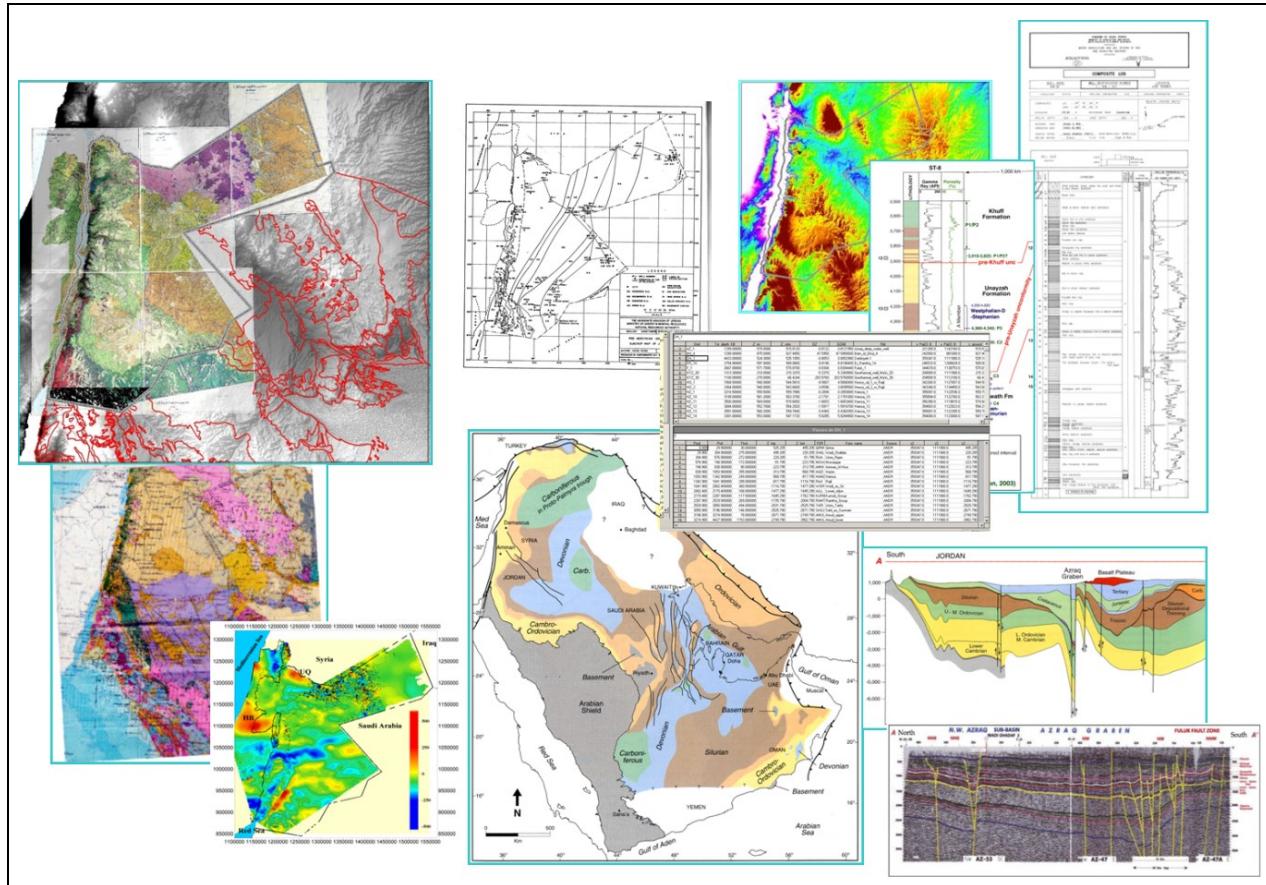
6.4. PRINCIPALES ÉTAPES D'UNE MODÉLISATION GÉOLOGIQUE 3D

Le travail de modélisation géologique comporte toujours trois étapes successives pour (i) collecter, analyser et traiter les données, (ii) les organiser dans un Système d'Information Géographique (SIG), (iii) les importer dans un modeleur géologique et construire les surfaces de contact entre les formations successives.

6.4.1. Collecte, analyse et traitement des données

Toutes les sources de données permettant d'apporter des informations quantitatives, mais aussi qualitatives, sur la géométrie des formations géologiques sont concernées : cartes géologiques à différentes échelles, Modèle Numérique de Terrain (MNT), coupes de forage, prospections géophysiques au sol (sismique, électrique) et aéroportées (gravimétrie, magnétisme, électromagnétisme, radiométrie), cartes interprétées, coupes verticales, bases de données, rapports, études, synthèses et publications (Illustration 4).

⁴ Exemples de modeleurs géologiques : EarthVision™, Eclipse™, Multilayer™, Petrel™



*Illustration 4 – Exemple de données examinées pour une modélisation géologique 3D
(source : Modélisation des principaux aquifères jordaniens, Brigm, 2010)*

6.4.2. Organisation et gestion des données dans un SIG

Cette phase de travail associe plusieurs tâches :

- Élaboration d'une échelle litho-stratigraphique uniforme et harmonisée couvrant l'ensemble de la zone modélisée, opération essentielle qui peut se révéler longue et difficile, en particulier pour les systèmes transfrontaliers.
- Numérisation des données :
 - o constitution de bases de données, notamment pour la description litho-stratigraphique des forages,
 - o digitalisation de :
 - cartes géologiques à différentes échelles,
 - cartes produites à partir d'investigations géophysiques aéroportées,
 - coupes géologiques verticales 2D,
 - cartes interprétatives tirées de rapports, synthèses et publications,
 - coupes sismiques et coupes électriques.
- Harmonisation des cartes géologiques et des coupes de forage, en adéquation avec l'échelle litho-stratigraphique adoptée.

- Choix d'un système de géo-référencement cartographique uniforme et d'une référence altimétrique commune :
 - o Conversion des coordonnées (si nécessaire : pieds => mètres, miles => kilomètres).
 - o Corrections cartographiques ponctuelles pour améliorer le raccordement des cartes.
- Exploitation des diagraphies pour recaler et corrérer les niveaux repères dans les coupes de forage.
- Extraction des données structurales contenues dans l'ensemble des informations disponibles :
 - o digitalisation des :
 - linéaments structuraux,
 - cartes isohypes et isopaques (conversion pieds => mètres),
 - cartes d'affleurement et de faciès,
 - o création de nouveaux jeux de cartes (« shape files ») et de bases de données cartographiques (geo-databases).
- Comparaison, confrontation et combinaison des connaissances et données intégrées dans le SIG.
- Contrôles de cohérence, particulièrement importants car ils permettent, le plus tôt possible, de critiquer les données, de détecter les erreurs de saisie, d'interprétation, de numérisation, etc... ceci avant que la phase de modélisation géologique ne débute. Cette étape de contrôle peut faire gagner un temps considérable en évitant des retours en arrière lors de la construction du modèle géologique.

6.4.3. Mise en œuvre d'un modeleur géologique

Un modeleur géologique est un outil spécifique conçu pour gérer des données très diverses, lesquelles vont constituer une série de contraintes géométriques que l'algorithme de modélisation géométrique s'efforcera de respecter au mieux lors de la construction des interfaces entre formations successives. En règle générale, les données fournies au modeleur couvrent le spectre suivant :

- Modèle Numérique de Terrain (MNT = surface topographique numérisée),
- contours des affleurements des différentes formations, digitalisés à partir des cartes géologiques préalablement harmonisées et géo-référencées,
- pendage des formations, aux affleurements et dans les forages carottés,
- coupes litho-stratigraphiques (préalablement harmonisées) des forages,
- coupes sismiques, coupes électriques,
- tracé et caractéristiques géométriques des linéaments structuraux (failles, flexures).

Une fois entrées dans le modeleur géologique, ces données sont comparées, confrontées, combinées et exploitées au mieux pour construire les surfaces de contact entre les différentes formations, dans le respect des contraintes géométriques connues.

En pratique, le travail commence par une nouvelle phase de contrôles de cohérence, en complément de ceux qui ont déjà été menés dans le SIG. En effet, les procédures de contrôle 3D des SIG ne peuvent pas être totalement efficaces et exhaustives pour un modèle géologique parce que les SIG ne disposent pas de fonctions de recherche d'incohérences « pilotées » par des règles géologiques (formations en présence, contacts possibles ou non entre les formations, variations admissibles des épaisseurs de formation, etc...). Les modeleurs géologiques, en revanche, ont l'avantage de permettre la définition et le réglage de contraintes géologiques, facilitant ainsi grandement la recherche et la correction des incohérences de données, en particulier dans les cas complexes ou lorsque les données sont trop nombreuses pour être appréhendées visuellement (études régionales par exemple).

Quel que soit le modeleur utilisé, une démarche commune est mise en œuvre pour (i) interpréter le rôle des failles inventoriées, (ii) sélectionner celles qui jouent un rôle majeur, (iii) les introduire et les agencer dans le modeleur de façon à constituer un réseau de discontinuités structurales, (iv) interpoler les unités géologiques de part et d'autre des failles.

Cette démarche requiert une véritable expertise en géologie sédimentaire et structurale pour mener à bien, par itérations successives, la construction des surfaces gauches qui correspondent aux murs des différents horizons géologiques, marqués par les discontinuités structurales associées aux failles. Ce travail de construction géométrique s'appuie en outre continuellement sur les implications spatiales des phases successives de dépôt, érosion, transgression/régression marine, phases tectoniques d'effondrement, surrection, basculement, chevauchement, etc.

En particulier, l'interprétation géologique du réseau de failles est une étape cruciale car elle impacte directement l'interpolation des horizons géologiques. Il est donc important que le logiciel de modélisation géologique utilisé puisse rapidement recalculer la géométrie du système lorsque l'on modifie les jeux de données et que l'on teste différentes hypothèses dans les secteurs sujets à indétermination. L'ergonomie de l'environnement de travail doit en outre permettre de guider et de contrôler interactivement la construction progressive de la structure géométrique grâce à différents outils de visualisation, en trois dimensions, en coupe et en plan (Illustration 5 à Illustration 10).

Les données « factuelles » ne suffisent pas, en général, à contraindre complètement le modèle, mais la part significative de la connaissance géologique qui n'est pas contenue dans les données disponibles peut aider à réduire les indéterminations. Des contraintes additionnelles, dites « expertes », sont alors ajoutées, fruit d'une collaboration étroite entre géologues et hydrogéologues.

D'un point de vue structural, la modélisation géométrique contribue activement à améliorer les connaissances, aussi bien géologiques qu'hydrogéologiques, en explicitant les positions relatives des formations les unes par rapport aux autres, en mettant en évidence l'existence ou l'absence de connexions - potentiellement hydrauliques - entre niveaux aquifères, etc. Le modèle géologique peut également servir à optimiser de futurs programmes de reconnaissance dans les zones où de nouvelles données permettraient de lever les inconnues qui affectent la connaissance des écoulements souterrains.

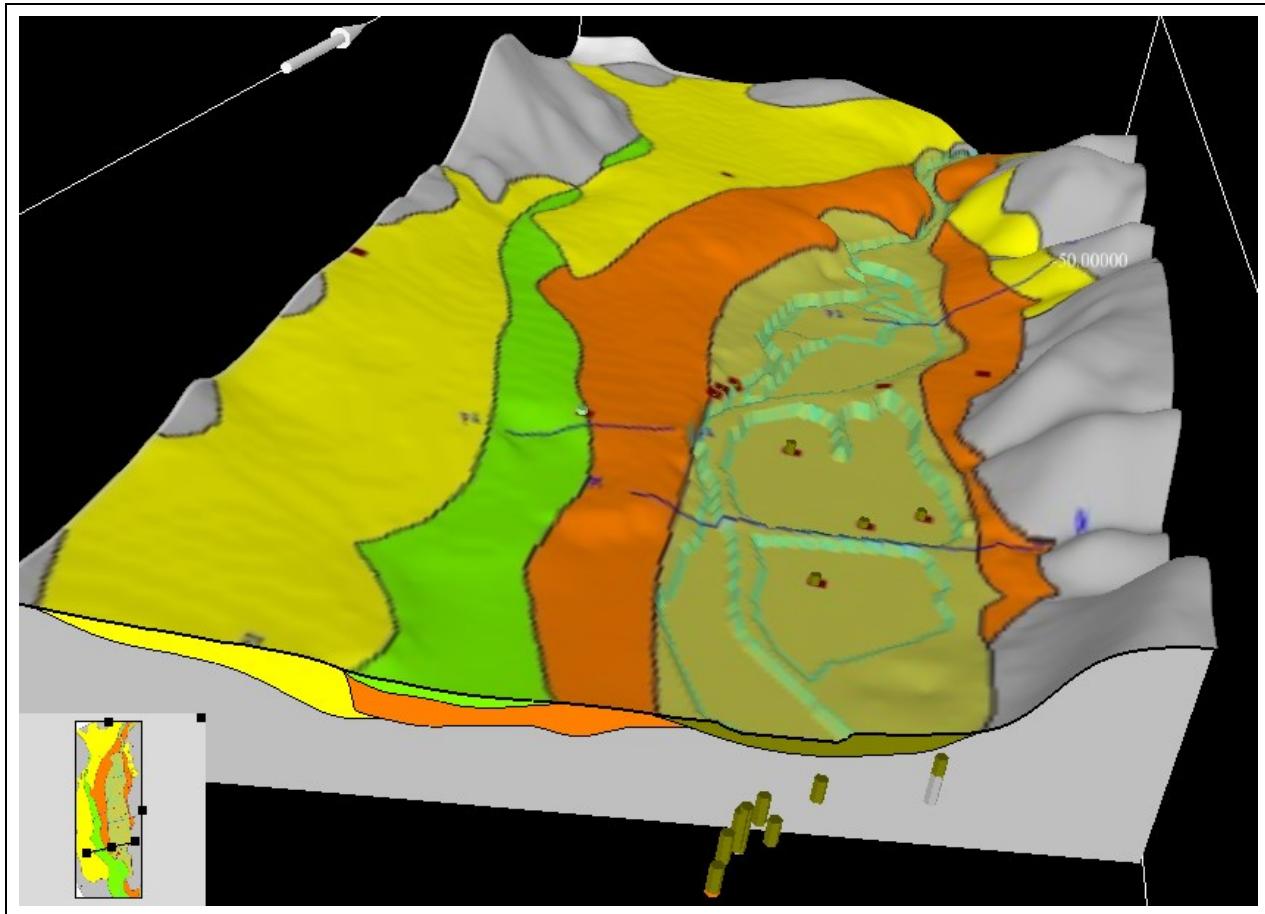


Illustration 5 – Modèle géologique de Sarrola-Carcopino, Corse (logiciel Multilayer™)
 (source : *Estimation des volumes d'eau brute mobilisables en rive gauche de la Gravone, Brgm 2011*)

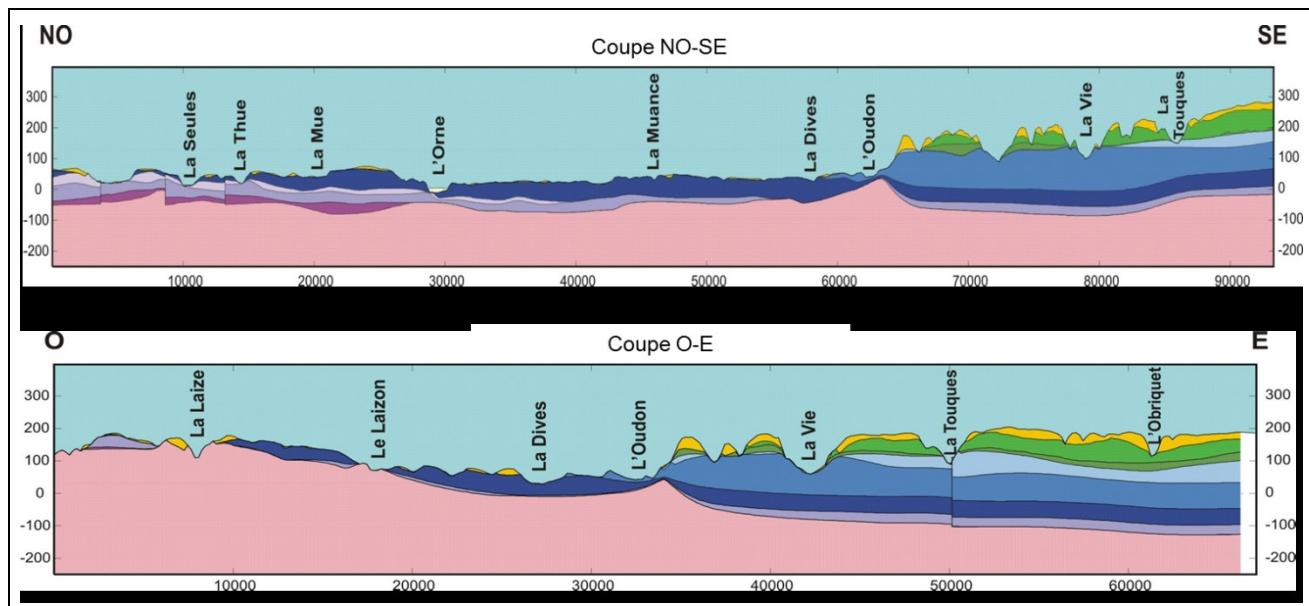
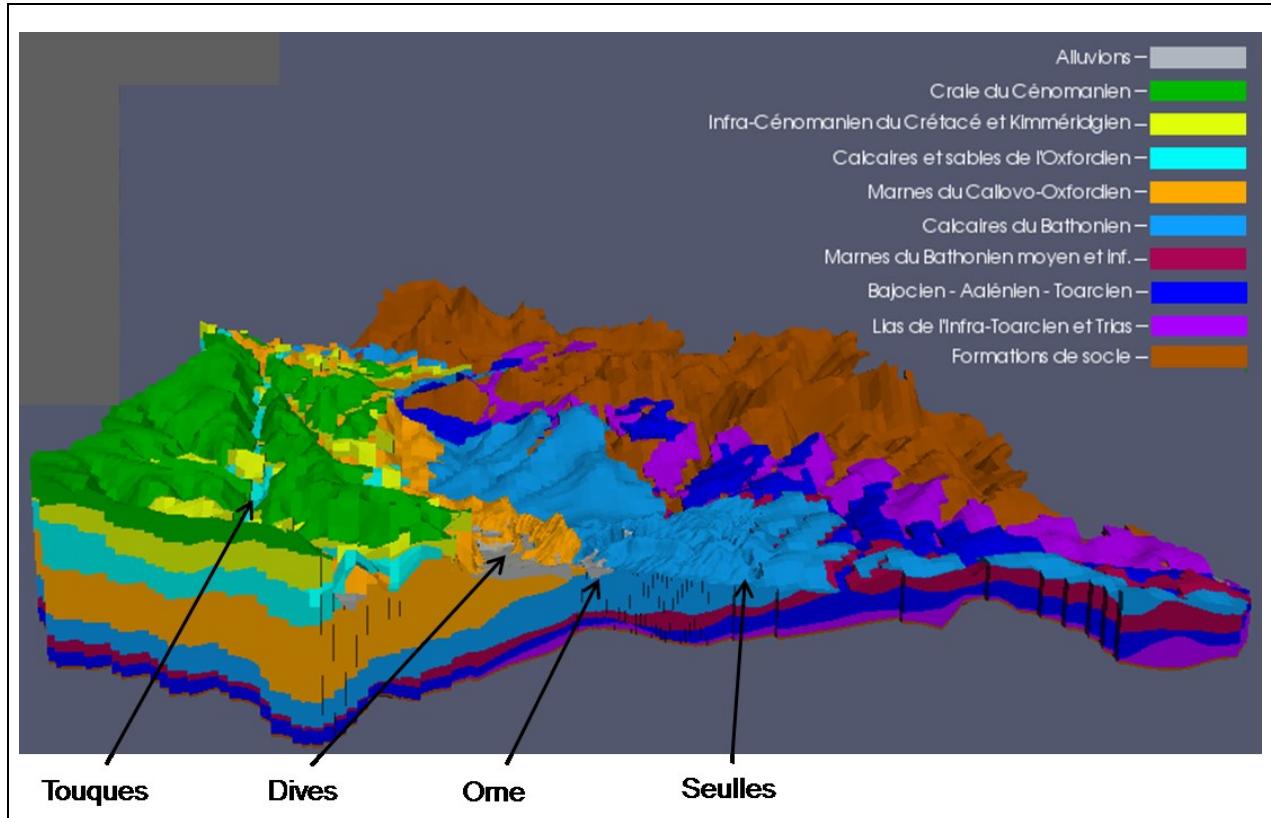
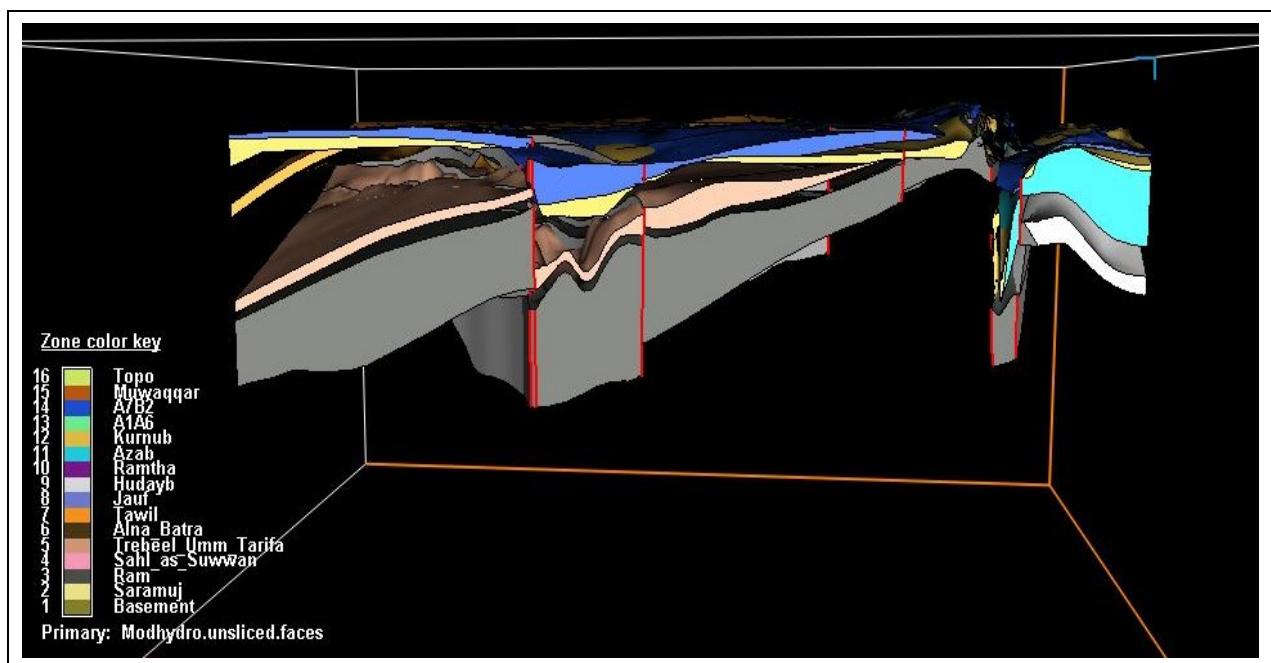


Illustration 6 – Coupes des aquifères jurassique et crétacé de Basse-Normandie (Multilayer™)
 (source : *Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives, Brgm 2013*)



*Illustration 7 – Modèle géologique des aquifères jurassique et crétacé de Basse-Normandie.
Géométrie 3D vue depuis la côte normande (logiciels MARTHE™ et Paraview™)
(source : Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives, Brgm 2013)*



*Illustration 8 – Modèle géologique de la Jordanie
Vue en coupe des seules formations aquifères (logiciel Earthvision™)
(source : Modélisation des principaux aquifères jordaniens, Brgm 2010)*

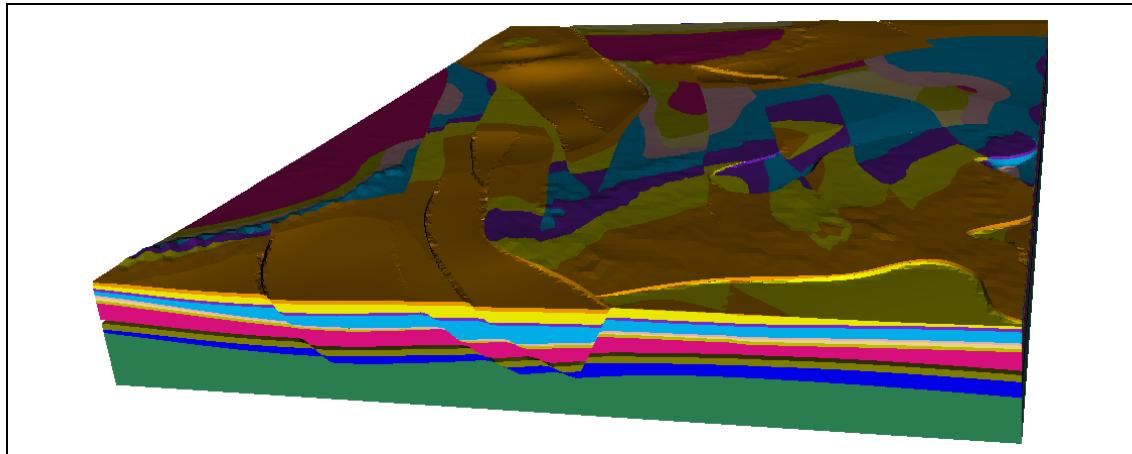


Illustration 9 – Modèle géologique des plaines côtières de Gabès (Tunisie). Logiciel Geomodeller™
(source : Modélisation géologique des aquifères du bassin de Gabès, Brgm 2013)

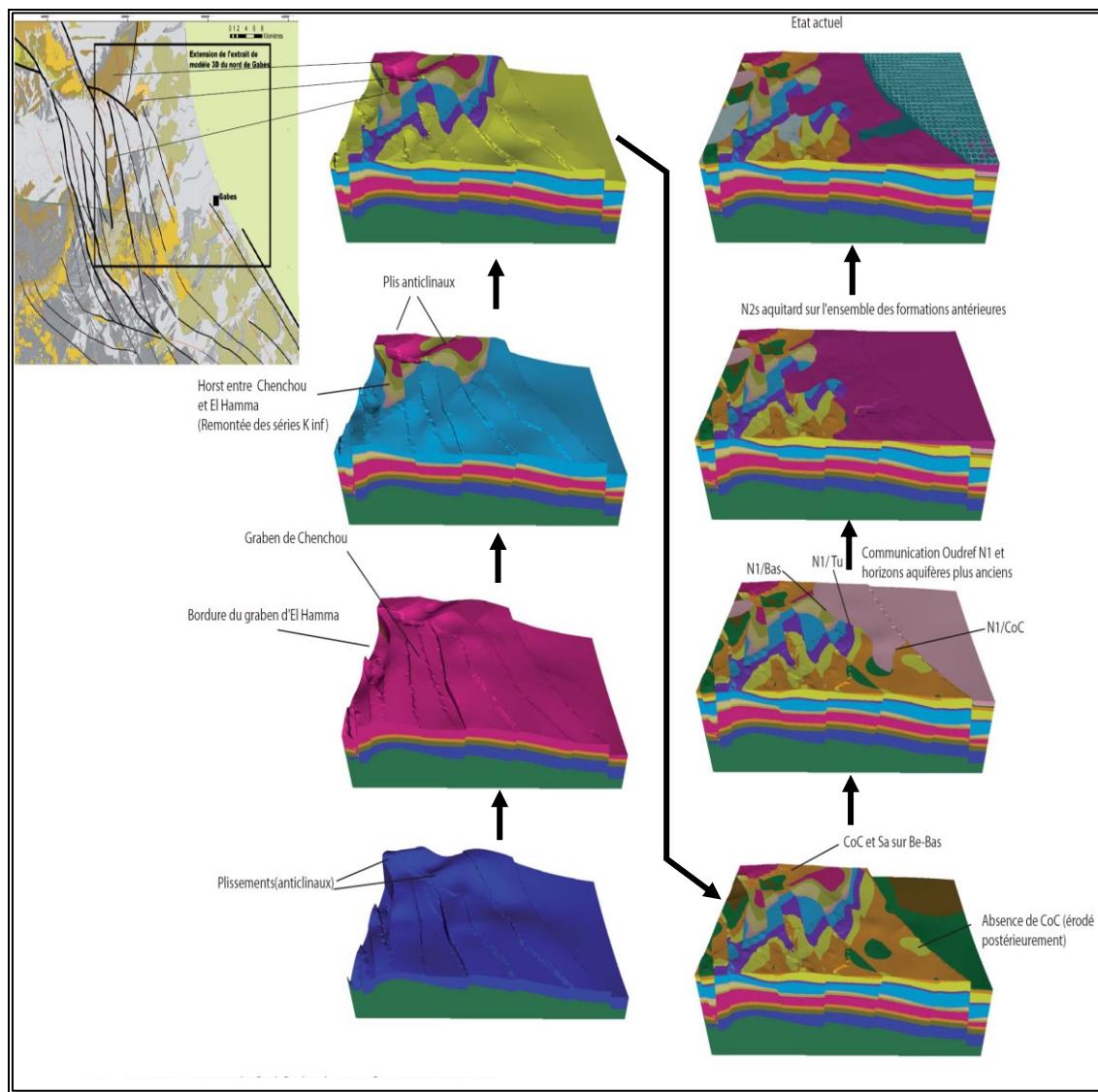


Illustration 10 – Extraits du modèle géologique 3D de la région de Gabès (Tunisie, GeoModeller™).
Chronologie des phases de dépôt et d'érosion, avec mise en contact de formations aquifères déposées à des époques très différentes. Logiciel Geomodeller™

6.5. ARTICULATION AVEC LA MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE

Pour que la structure élaborée par modélisation géologique soit en bonne adéquation avec la modélisation hydrogéologique qui va lui succéder, il est indispensable d'assurer dès le départ une concertation étroite et régulière entre les géologues et hydrogéologues intervenant sur le projet.

Cette collaboration est essentielle pour sélectionner ensemble les horizons à modéliser, parce que les approches géologique et hydrogéologique ne procèdent pas de la même logique, la première privilégiant la stratigraphie et les corrélations entre forages via des niveaux repères bien identifiables, la seconde cherchant à définir une alternance de séquences de perméabilités contrastées.

L'élaboration d'un modèle géologique 3D, dont la structure géométrique sert ensuite d'ossature au modèle d'écoulement souterrain, présente en outre l'avantage de bien séparer la phase de collecte, analyse et traitement des données géologiques structurales de la phase de modélisation hydrogéologique *stricto sensu*. Un rapport détaillé conclut cette phase de travail en exposant les différentes étapes de la modélisation géologique, en présentant et commentant les données utilisées, les hypothèses adoptées, les résultats obtenus, et en fournissant une série d'illustrations sous forme de cartes, coupes et blocs diagrammes mettant en évidence les connexions et discontinuités géométriques, notamment entre formations aquifères.

Comme le rapport de synthèse hydrogéologique préalable, ce document est ensuite soumis pour vérification et validation aux experts qui assistent le maître d'ouvrage, occasion de détecter d'éventuelles erreurs, anomalies ou lacunes, et de s'accorder sur les hypothèses retenues. Ce n'est qu'une fois cette étape franchie que la construction du modèle d'écoulement souterrain peut être véritablement lancée, sur la base de la structure résultant de la modélisation géologique 3D.

6.6. INCERTITUDES INHÉRENTES AU MODÈLE GÉOLOGIQUE

Quelles que soient la rigueur apportée à la modélisation géologique 3D et la qualité du modèle qui en résulte, la structure géologique ainsi créée est indissociable des données et des connaissances qui la sous-tendent, ainsi que des hypothèses ayant présidé à son élaboration. Autrement dit, même si la structure issue de la modélisation géologique 3D est *a priori* le meilleur compromis trouvé à la date de sa construction, d'autres variantes pourraient sans doute être proposées et transférées vers le modèle hydrogéologique. Ceci est encore plus vrai lorsque de nouvelles investigations de terrain viennent enrichir les connaissances au fil du temps.

En pratique, toutefois, il est exceptionnel de faire autant de modèles hydrogéologiques qu'il y a de variantes géologiques d'un système aquifère, car ceci conduit à reprendre le calage et à relancer les simulations prévisionnelles pour chacun de ces modèles. L'enchaînement de deux phases de modélisation, géologique puis hydrogéologique, constitue cependant une excellente approche pour valoriser les données et connaissances nouvelles qui arrivent avec le temps, sous réserve toutefois qu'une procédure efficace de calage automatique puisse être mise en œuvre pour raccourcir la phase de calage.

7. Construction d'un modèle maillé

7.1. ÉTAPES DE CONSTRUCTION

Construire un modèle maillé, c'est traduire numériquement, dans des fichiers reconnus par le logiciel de modélisation, le schéma hydraulique sous-tendant le modèle conceptuel d'écoulement élaboré à l'issue de la synthèse hydrogéologique initiale. Il s'agit donc de transposer un concept hydrogéologique en une série de fichiers constitutifs d'un modèle numérique, les données concernées ayant déjà été analysées et traitées pendant la synthèse hydrogéologique initiale et l'éventuelle modélisation géologique 3D associée.

La construction d'un modèle maillé comporte plusieurs étapes :

- définition de l'extension horizontale et verticale du domaine à modéliser (cf. ch. 5.3.1), des formations à modéliser (cf. ch 5.3.2), et choix du mode de représentation des semi-perméables ;
- choix d'un logiciel de modélisation, d'où découlent le type de maillage à mettre en œuvre et le format des fichiers de données à élaborer ;
- option retenue pour la représentation de chacun des éléments du réseau hydrographique ;
- données à fournir au modèle, en distinguant « données d'entrée », conditions initiales, paramètres de calage et références de calage ;
- construction du maillage, définition de la géométrie du système aquifère par assignation des cotes de toit et/ou mur à chaque maille du modèle ;
- affectation des propriétés hydrogéologiques à chacune des mailles.

Les autres données à fournir au logiciel de modélisation, telles que conditions aux limites, flux de recharge pluviale, débits de pompage, etc., dépendent étroitement du contexte de simulation (calage ou scénarios prévisionnels) et de la période simulée ; elles sont décrites et commentées aux chapitres 8 « Calage du modèle » et 10 « Scénarios prévisionnels ».

7.2. DISCRÉTISATION VERTICALE ET SEMI-PERMÉABLES

7.2.1. Discrétisation verticale du modèle numérique

Le processus de délimitation horizontale/verticale du modèle hydrogéologique et de sélection des formations à simuler a été commenté au chapitre 5.3 consacré au Modèle conceptuel d'écoulement. Une petite précision additionnelle est apportée ici sur le découpage vertical des formations aquifères dans le modèle numérique.

En effet, alors que la modélisation d'un système aquifère passe une simplification progressive de la série litho-stratigraphique en une alternance de groupes aquifères et aquitards, il peut aussi s'avérer nécessaire de subdiviser une unité litho-stratigraphique en plusieurs couches de modèle lorsque :

- la formation présente une hétérogénéité verticale significative (p. ex. altération de la tranche supérieure),
- la formation est épaisse et les forages n'en captent pas l'intégralité,

- la progression verticale d'un impact piézométrique/thermique ou la migration hydrodispersive verticale d'une pollution doit être simulée avec précision,
- les effets densitaires d'une pollution ou d'un biseau salé induisent de forts contrastes verticaux de concentration, qui nécessitent d'utiliser des couches de modèle d'épaisseur métrique, voire inférieure,
- etc.

7.2.2. Différents modes de représentation des formations semi-perméables

Les formations semi-perméables (éponges) intercalées entre des formations aquifères peuvent en général être simulées de deux façons différentes :

- **comme des aquifères de faible perméabilité** auxquels sont assignés des champs de perméabilité et d'emmagasinement ;
- **comme des horizons intercalaires ne servant qu'à assurer une connexion hydraulique verticale entre les couches aquifères sus- et sous-jacentes.** Seul un champ de perméabilité verticale est alors affecté à l'éponge. Cette dernière ne se voit attribuer ni perméabilité horizontale, ni coefficient d'emmagasinement, avec la conséquence qu'aucun écoulement horizontal ni stockage/déstockage n'y est simulé.

Avec ce mode de représentation, l'éponge n'est pas traitée comme une couche de mailles, ce qui permet de réduire le nombre de mailles global, la taille mémoire associée et les temps de calcul résultants. En contrepartie, cette approche ne permet pas de simuler le stockage/déstockage dans les éponges, ce qui biaise la dynamique inertielle du système.

7.3. SCHÉMAS NUMÉRIQUES ET MAILLAGES ASSOCIÉS

Extraits du rapport « Modélisation des hydrosystèmes : une aide à la gestion des ressources en eau », JJ. Seguin, D. Thiéry, BRGM, 2008.

7.3.1. Schémas numériques et types de maillage associés

Les principaux schémas numériques utilisés en hydraulique souterraine pour résoudre l'équation générale de l'écoulement mettent en œuvre des méthodes de calcul en Différences finies, Éléments finis ou Volumes finis.

- Différences finies : les dérivées de l'équation générale d'écoulement sont approchées par des développements en séries de Taylor. L'espace est découpé selon une grille régulière : carrés ou rectangles en 2D, cubes ou parallélépipèdes en 3D. L'inconnue (le niveau piézométrique ou charge hydraulique) est calculée au centre de la maille.
- Éléments finis : formulation complexe faisant intervenir des approximations d'intégrales. Le découpage de l'espace est réalisé à l'aide d'éléments de forme quelconque, souvent triangulaires ou quadrangulaires. La charge est calculée aux nœuds du maillage (points de jonction des éléments). En éléments finis mixtes hybrides, la charge et la vitesse sont calculées simultanément.
- Volumes finis : utilisation, comme en éléments finis, d'approximations d'intégrales pour résoudre l'équation générale de l'écoulement. Comme le flux entrant dans un volume donné est égal au flux sortant du volume adjacent, la méthode est conservative. Autre avantage de cette approche, elle est utilisable avec des maillages non structurés et des volumes déformables, mais ce type d'utilisation est encore peu fréquent en hydrogéologie.

Pour les problèmes classiques de gestion des ressources en eau souterraine, les schémas numériques en « différences finies » restent les plus utilisés, en particulier pour les modèles multicouches régionaux. En raison de la flexibilité de leur maillage, les modèles en « éléments finis » se montrent, en revanche, bien adaptés à la simulation des aménagements souterrains de forme complexe.

À la question de savoir quel schéma numérique utiliser pour résoudre un problème donné, il n'y a pas de réponse unanimement acceptée mais les avantages, inconvénients et enjeux des différentes approches peuvent se résumer de la façon suivante (G. de Marsily, 1994) :

1) Différences finies : *Cette méthode (...) convient très bien à la résolution de problèmes régionaux d'écoulement des nappes, en une ou deux dimensions, dans des systèmes multicouches ou en trois dimensions. Bien qu'elle soit, en principe, capable de traiter des mailles de n'importe quelle forme et taille, elle est, en pratique, limitée à des mailles simples : des carrés réguliers, des carrés gigognes, des rectangles ou des parallélépipèdes rectangulaires en trois dimensions.*

La méthode des différences finies peut très bien représenter les hétérogénéités des propriétés du milieu, pourvu que la forme de ces hétérogénéités puisse être décrite de façon adéquate par la forme des mailles ; dans la pratique, l'anisotropie doit être limitée aux directions parallèles aux côtés des mailles. La méthode convient moins bien à la résolution de l'équation de transfert, sauf dans les cas où les méthodes des caractéristiques et du calcul des trajectoires avec des particules sont utilisées, ou encore lorsqu'un algorithme spécifique est mis en œuvre pour limiter la dispersion numérique (p. ex. méthode TVD, Total Variation Diminishing, à limiteur de flux).

2) Éléments finis : *Cette méthode (...) est plus flexible que celle des différences finies parce que la forme des mailles est beaucoup moins limitée : en pratique, on prend des triangles et des quadrilatères en deux dimensions et, en trois dimensions, des tétraèdres ou des parallélépipèdes de n'importe quel angle. Ceci permet de décrire d'une manière beaucoup plus satisfaisante la forme des limites du milieu ainsi que celle des hétérogénéités ou les fonctions source, ce qui rend également la méthode des éléments finis idéale pour résoudre les problèmes à limites mobiles, par exemple, ceux ayant une surface libre et une interface abrupte entre eau douce et eau salée ou entre deux fluides immiscibles. La méthode des éléments finis est capable de traiter toutes les directions d'anisotropie, et ces directions peuvent même changer d'un élément à un autre ou avec le temps.*

En pratique, dans les problèmes d'écoulement, la méthode des éléments finis peut être employée pour des études régionales, mais elle est particulièrement efficace dans les problèmes locaux de génie civil tels que l'exhaure de l'eau d'une excavation, le drainage d'une mine et l'écoulement autour d'un barrage, où les formes des limites et des hétérogénéités doivent être représentées avec précision. Remarquez que quand il faut calculer les poussées d'écoulement en tant qu'entrée d'un modèle mécanique, il est souvent nécessaire de le faire sur le même réseau que celui utilisé pour les calculs de structure, et presque tous ceux-ci utilisent des éléments finis.

Pour résoudre l'équation de transfert, la méthode des éléments finis est bien supérieure à celle des différences finies, puisqu'elle peut traiter l'anisotropie du tenseur de dispersion, et que la taille des mailles peut être adaptée à la grandeur de la vitesse ; on peut ainsi rechercher un compromis entre la stabilité et la dispersion numérique.

Différents logiciels de modélisation permettent de simuler la zone non saturée (ZNS), mais la forte hétérogénéité de ce type de milieu - où les propriétés hydrogéologiques varient grandement en fonction de la teneur en eau - et l'insuffisance fréquente de données pour caractériser la ZNS font qu'elle est rarement simulée de façon explicite dans les modèles régionaux. Il s'avère en effet souvent préférable, lorsque le rôle hydraulique de la ZNS est avéré et important, d'opter pour une approche en deux temps :

- Modélisation 1D d'une colonne de terrain avec prise en compte des mécanismes d'écoulement dans la ZNS. L'objectif de cette modélisation 1D est de calculer le flux hydraulique parvenant à la base de la ZNS, qui correspond à la recharge de la nappe.
- Modélisation régionale tenant compte du flux de recharge issu du modèle 1D.

7.3.2. Discrétisation verticale en couches de modèle

Modèle monocouche

C'est le modèle spatialisé le plus simple, où la géométrie de l'aquifère est définie par une cote de substratum et une cote topographique (Illustration 11), ou une cote de toit si la nappe est captive. Cette schématisation est souvent utilisée pour les aquifères alluviaux et pour les aquifères bien isolés des formations sous-jacentes (pas d'échange de flux par drainance).

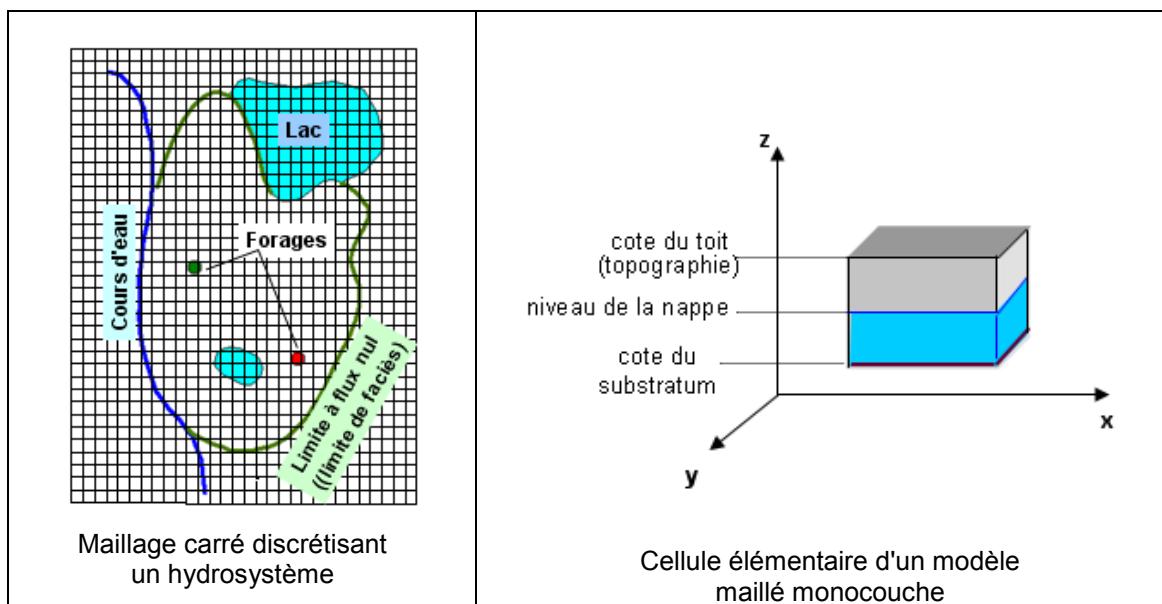


Illustration 11 - Discrétisation d'un modèle maillé monocouche

Modèle multicouche

Ce type de discrétisation verticale est en général celui qui est utilisé pour les modèles régionaux destinés à la gestion des ressources en eau souterraine dans les grands systèmes sédimentaires constitués d'un empilement de formations aquifères séparées par des formations peu perméables (dites épontes).

Chaque couche est discrétisée en mailles parallélépipédiques dont la face supérieure correspond au toit de la formation considérée et la face inférieure au mur (base) de cette formation (Illustration 12).

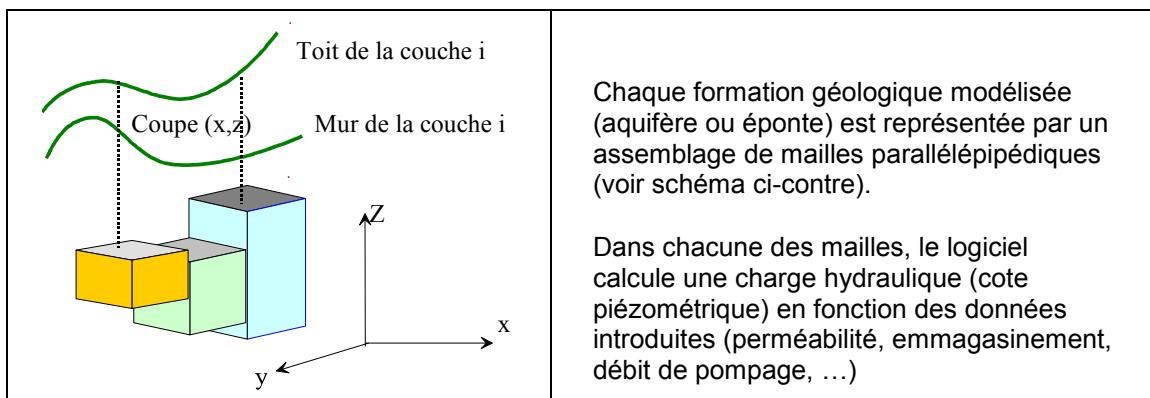


Illustration 12 - Exemple de discréétisation d'un modèle maillé multicouche

Modèle tridimensionnel (3D)

Un modèle hydrodynamique tridimensionnel se présente sous la forme de grilles maillées superposées, issues d'un découpage de l'espace suivant les 3 dimensions. De ce découpage, il résulte un assemblage de "cellules" régulièrement ordonnées et hydrauliquement connectées (Illustration 13), le "motif de base" étant constitué par une cellule en relation avec ses 6 voisines les plus proches (les cellules « nord », « sud », « est », « ouest » et les 2 cellules situées au-dessus et au-dessous).

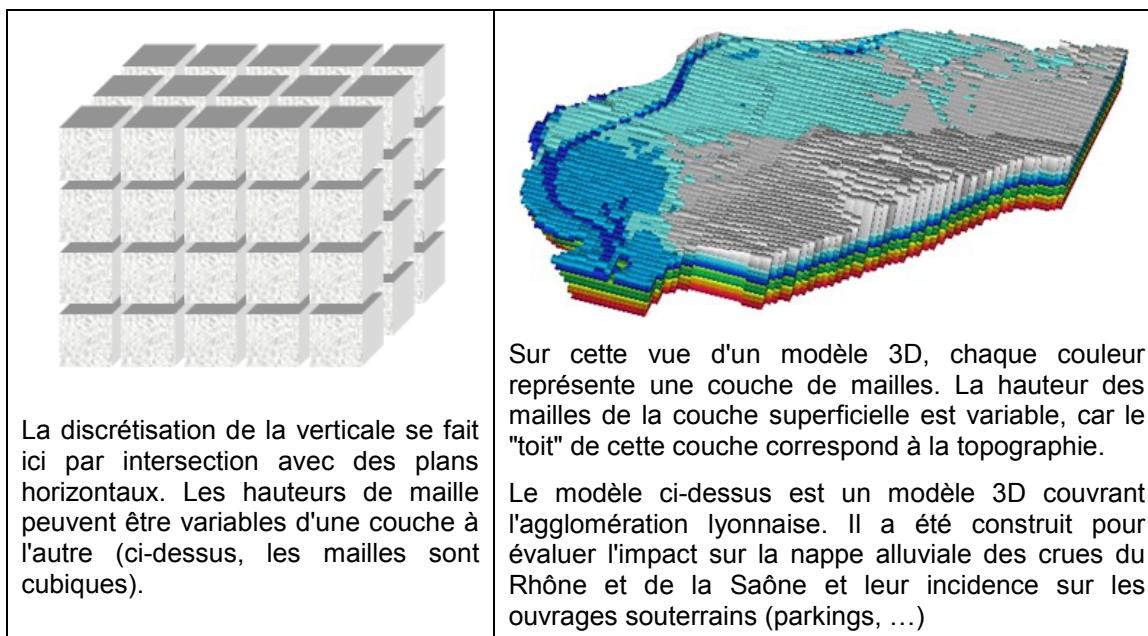


Illustration 13 - Exemple de discréétisation d'un modèle maillé tridimensionnel

7.3.3. Discrétisation horizontale en mailles

Il n'existe pas de critère reconnu pour dimensionner un maillage de façon optimale. En pratique, les dimensions affectées aux mailles sont le fruit de compromis entre :

- **pas et variabilité spatiale des données de terrain disponibles,**
- **taille et complexité géométrique et hydrogéologique des aménagements à simuler,**
- **pour le transport de masse ou de calories, respect de critères numériques assurant la représentativité des calculs (Nombre de Péclet et Nombre de Courant),**
- **précision de calcul recherchée,**
- **nombre de mailles compatible avec une durée de calcul « raisonnable ».**

À titre indicatif :

- On utilise en général des mailles de 500 à 2000 mètres de côté pour les modèles d'extension régionale, affinées à 100-250 m dans les zones d'un intérêt particulier.
- Pour simuler les interférences entre les puits d'un champ captant, les mailles doivent être significativement plus petites que la distance entre les puits, d'un facteur 5 à 10 par exemple. Il ne servirait à rien d'utiliser des mailles beaucoup plus petites (sauf pour simuler la progression d'un panache de concentration ou de température à front abrupt ; on ajusterait alors mailles et pas de temps pour limiter la dispersion numérique).
- Pour simuler des aménagements souterrains, les mailles peuvent être très petites afin de bien restituer la géométrie des installations (dimension métrique ou décimétrique).

En tout état de cause, il ne faut pas céder à la tentation de multiplier les mailles au motif que le code de calcul peut le supporter. La taille des mailles doit rester cohérente avec la densité des données disponibles, ce qui peut conduire à employer de petites mailles dans les secteurs bien renseignés et de grandes mailles dans les zones peu investiguées et/ou de moindre intérêt pour le modèle.

7.4. RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

L'illustration 14 résume les principales configurations hydrauliques de recharge, débordement et drainage pour un aquifère, avec les deux variantes possibles pour les cours d'eau, selon qu'ils sont en situation de drainage ou de recharge de nappe.

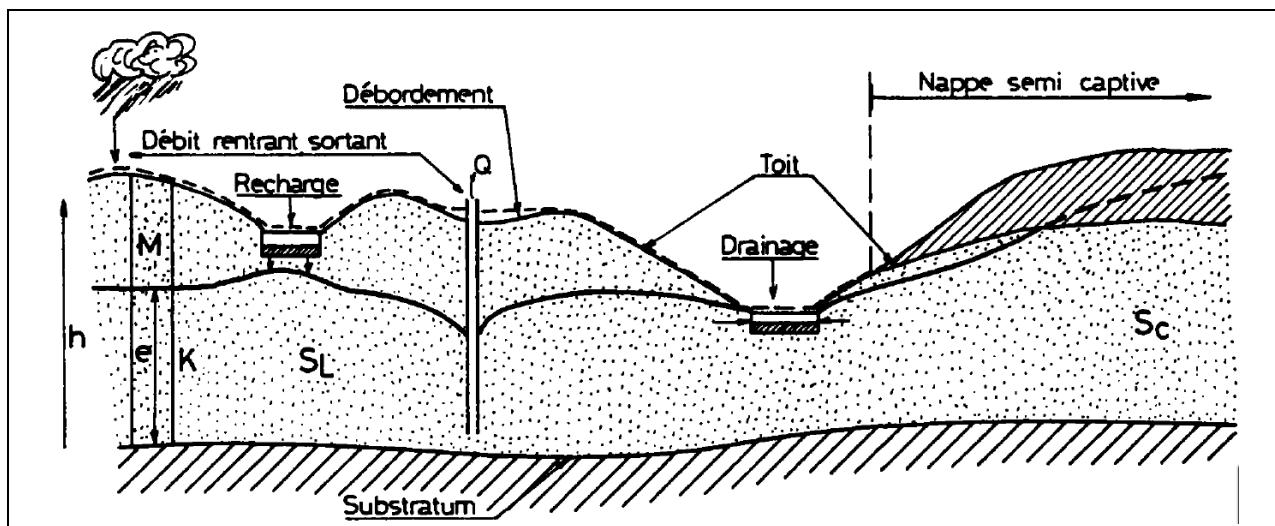


Illustration 14 – Principales configurations de recharge, débordement et drainage

7.4.1. Remarques sur les échanges nappe-rivière et leur évolution dans le temps

Milieu géologique fissuré ou karstifié

Lorsque le milieu géologique est fissuré ou karstifié, son rôle de filtre est limité et les matières en suspension circulent sans entrave dans les fissures et conduits karstiques, de la nappe vers la rivière et inversement, avec les risques induits de pollution d'un milieu hydraulique par l'autre. Il n'y a alors pas lieu d'envisager une réduction progressive de la capacité d'échange entre nappe et rivière, comme on peut en observer avec les aquifères poreux décrits ci-après.

Milieu géologique poreux

Dans les formations géologiques poreuses, la capacité d'infiltration des aménagements anthropiques (bassins d'infiltration, forages d'injection, canaux d'irrigation ou de navigation, etc.) diminue avec le temps, parfois très rapidement. C'est un réel handicap pour les bassins d'infiltration, qu'il faut curer régulièrement, et pour les forages d'injection, dont il est très difficile de pérenniser les performances. C'est, en revanche, un avantage indéniable pour les canaux d'irrigation ou de navigation, dont les pertes par infiltration décroissent jusqu'à devenir négligeables, limitant ainsi leur impact sur les nappes sous-jacentes et réduisant les débits à apporter pour maintenir la ligne d'eau à sa cote nominale.

Ce colmatage inéluctable des milieux poreux résulte de phénomènes strictement mécaniques (interception et rétention par la matrice poreuse des particules en suspension dans l'eau), associés à des réactions physico-chimiques et bio-géochimiques dans la frange colmatée.

Les mêmes mécanismes sont à l'œuvre dans les cours d'eau, avec quelques variantes :

- Transferts de la nappe vers le cours d'eau (« rivière drainante »), situation la plus fréquente en conditions naturelles : l'eau souterraine apportée par la nappe ne contenant pas de matière en suspension, elle ne risque pas de colmater le fond de la rivière ; les sédiments déposés dans le lit du cours d'eau ne constituent donc pas un réel obstacle aux apports diffus depuis la nappe.
- Transferts du cours d'eau vers la nappe (rivière « infiltrante »), situation pouvant résulter d'une baisse des niveaux piézométriques au voisinage du cours d'eau, par exemple sous l'effet de pompages importants : dans cette configuration, le filtre constitué par le fond et les berges du cours d'eau arrête les matières en suspension transportées par la rivière.

Le colmatage progressif qui en résulte dépend à la fois de la granulométrie du milieu poreux et de la charge solide transportée par la rivière. Celle-ci peut être très variable selon les saisons, la topographie, la lithologie, le couvert végétal et les pratiques agricoles : souvent forte en amont des bassins versants où la pente des terrains peut favoriser le ruissellement, faible en aval où les pentes sont modérées et le couvert végétal développé, elle peut être insignifiante à l'aval d'une retenue où les matières en suspension ont sédimenté lentement (ce qui n'exclut pas que des apports latéraux chargés et/ou une érosion fluviale significative puissent très vite grossir la charge solide de la rivière en aval de la retenue).

Lorsqu'il se produit, le colmatage du fond d'un cours d'eau réduit les infiltrations de la rivière vers la nappe, sans doute de façon irréversible sauf curage mécanique.

Par conséquent, le colmatage prévisible du lit d'une rivière « infiltrante » coulant dans un milieu poreux doit être anticipé dès le stade des simulations prévisionnelles en évaluant l'impact d'un colmatage progressif du lit des cours d'eau à proximité des champs captants. Les conséquences d'un tel colmatage sont à la fois quantitatives (réduction,

voire quasi suppression des apports locaux depuis la rivière, et accroissement induit des interférences hydrauliques entre les deux rives) et qualitatives (diminution du risque de contamination de la nappe à partir d'une pollution du cours d'eau, mais risque accru de migration des pollutions de nappe d'une rive à l'autre par transit sous le cours d'eau).

7.4.2. Représentation des cours d'eau dans un modèle d'écoulement souterrain

Selon les données disponibles et les objectifs recherchés, plusieurs méthodes sont classiquement utilisées pour simuler les relations nappe-rivière dans les modèles d'écoulement souterrain. Les mailles aquifères situées sur le tracé du réseau hydrographique peuvent en effet être traitées comme des « mailles de débordement », des « mailles à potentiel imposé » ou des « mailles de drainage ». Le réseau hydrographique peut aussi être explicitement modélisé en tant qu'entité hydraulique à part entière, interagissant avec la/les nappe(s) mais distincte de celle(s)-ci ; différentes modalités sont parfois proposées pour représenter les composantes souterraines et superficielles des écoulements.

Les principes, avantages et inconvénients de ces différentes approches sont brièvement décrits dans les paragraphes qui suivent.

7.4.3. Mailles de débordement

Cette approche, la plus simple, repose sur le principe que le réseau hydrographique constitue en général le niveau de base vers lequel convergent les écoulements souterrains. Les cours d'eau sont donc en partie alimentés par les débordements de nappe aux points topographiquement les plus bas, situés précisément sur le tracé du réseau hydrographique.

Dans l'approche avec « mailles de débordement », les cours d'eau ne sont pas simulés comme des entités hydrauliques explicites mais simplement comme une succession de mailles aquifères où des débordements de nappe sont possibles. En pratique, chaque maille aquifère située sur le tracé d'un cours d'eau se voit attribuer une cote de débordement, qui peut être la cote du fond de la rivière ou une cote de ligne d'eau. La procédure de calcul interdit ensuite au niveau piézométrique de dépasser cette cote. S'il le faut, un « débit sortant » est calculé par le logiciel pour ramener le niveau piézométrique exactement à la cote de débordement attribuée à la maille. Ce « débit sortant », ou « débit de débordement », représente le débit apporté par la nappe au cours d'eau ; c'est donc le débit drainé par le cours d'eau au droit de la maille.

La somme des débits de débordement calculés dans chacune des mailles échelonnées le long d'un cours d'eau correspond au débit global drainé par celui-ci. Si une station hydrométrique permet de suivre le débit du cours d'eau, il est ainsi possible (et nécessaire) de confronter le débit de drainage calculé par le modèle (ou mieux, sa chronique en régime transitoire) au débit réel enregistré à la station de mesure. **La prise en compte des données hydrométriques constitue un puissant levier d'amélioration de la qualité et de la représentativité d'un modèle de nappe, en termes de débit d'écoulement souterrain et de recharge de nappe.**

En particulier, il est important de s'assurer qu'en étiage, lorsqu'un cours d'eau est essentiellement alimenté par les eaux souterraines, le cumul des débits simulés par le modèle sur les mailles de débordement définies le long de son tracé est comparable au débit mesuré à l'aval du cours d'eau (sous réserve que le débit du cours d'eau ne soit pas modifié par des pompages et/ou des rejets significatifs). Hors de la période d'étiage, le débit de drainage simulé par le modèle doit logiquement être inférieur au débit mesuré car le cours d'eau reçoit alors des apports additionnels par ruissellement et écoulement hypodermique.

Les « mailles de débordement » destinées à jouer le rôle hydraulique du cours d'eau sont des mailles aquifères à part entière, dont les propriétés hydrogéologiques (perméabilité et coefficient d'emmagasinement) sont, en principe, celles de l'aquifère. Il est possible de leur affecter une perméabilité réduite pour simuler un colmatage du lit de la rivière, mais il faut avoir à l'esprit qu'une telle réduction de perméabilité affecte aussi, à tort, les échanges hydrauliques entre les deux rives du cours d'eau lorsque la nappe est « décrochée » sous la rivière, par exemple sous l'effet d'un fort pompage.

La représentation d'un cours d'eau par des « mailles de débordement » est facile à mettre en œuvre mais elle présente l'inconvénient de ne simuler les échanges nappe-rivière qu'à sens unique, de la nappe vers la rivière. Elle ne peut donc pas restituer l'alimentation de la nappe par le cours d'eau, par exemple en cas de forte baisse piézométrique, même provisoire, provoquée par de forts pompages en nappe. La schématisation d'un réseau hydrographique par des « mailles de débordement » doit donc être exclusivement réservée aux cours d'eau qui drainent la nappe pendant toute la période modélisée.

Avantages :

- Simplicité d'utilisation : il suffit d'attribuer une cote de débordement à chacune des mailles aquifères situées sur le tracé du cours d'eau.
- Calcul du débit apporté par la nappe au cours d'eau dans chacune des mailles concernées.
- Possibilité de comparer les échanges nappe-rivière simulés par le modèle au débit réel obtenu par mesure de terrain sur le cours d'eau.
- La nappe se prolongeant de part et d'autre du cours d'eau, possibilité de simuler les interférences hydrauliques entre les deux rives.

Inconvénients :

- Pas d'alimentation de la nappe par le cours d'eau en cas de baisse du niveau piézométrique induite par des pompages proches.
- Prise en compte du colmatage du cours d'eau peu satisfaisante car affectant toute l'épaisseur aquifère et réduisant à tort les échanges hydrauliques entre les deux rives du cours d'eau lorsque la nappe est « décrochée » sous la rivière.

7.4.4. Mailles à potentiel imposé

Cette deuxième approche est assez semblable à la précédente, à ceci près que les mailles aquifères situées sur le tracé du cours d'eau sont ici traitées comme des mailles à « potentiel imposé », c'est-à-dire comme des mailles dont le niveau piézométrique est invariant, fixé à une cote assignée par le modélisateur.

Par rapport au schéma avec « mailles de débordement », l'avantage est ici que les échanges entre la nappe et le cours d'eau sont simulés dans les deux sens, maille par maille, de la nappe vers la rivière (rivière drainante) et de la rivière vers la nappe (rivière « infiltrante »). Il est donc possible, ici aussi, de calculer les débits échangés entre nappe et rivière sur un tronçon entier, de les comparer aux mesures de terrain disponibles, et d'utiliser ces informations pour améliorer le calage du modèle.

Le fait que les charges des mailles à potentiel imposé soient invariantes présente cependant deux inconvénients majeurs :

- Lorsque la rivière draine la nappe et que des pompages proches du cours d'eau provoquent une baisse des niveaux piézométriques, le modèle calcule correctement la réduction induite du débit apporté par la nappe au cours d'eau. Si le débit pompé augmente, la baisse de nappe s'accentue et le niveau piézométrique peut s'abaisser au-dessous de celui qui est imposé au cours d'eau : dans ce cas, les échanges nappe-rivière s'inversent et le modèle calcule un débit d'infiltration allant de la rivière vers la nappe.

Le défaut de cette approche, c'est que plus la nappe baisse, plus l'infiltration simulée depuis la rivière augmente, sans que le logiciel de modélisation puisse contrôler la cohérence hydraulique de la situation, ni même empêcher que le débit d'infiltration simulé devienne supérieur au débit local de la rivière (parce que celui-ci n'est pas connu du code de calcul).

- Puisque les charges hydrauliques restent invariantes sur le tracé du cours d'eau, cette approche n'est pas en mesure de simuler les interférences piézométriques entre les rives du cours d'eau, ni les transferts qui pourraient y être associés.

Avantages :

- Simplicité d'utilisation : il suffit d'attribuer une cote hydraulique à chacune des mailles aquifères situées sur le tracé du cours d'eau, ce qui permet, par exemple, de simuler très facilement les lignes d'eau irrégulières, telles que les profils en marches d'escalier des rivières barrées de seuils successifs).
- Calcul du débit échangé entre le cours d'eau et la nappe, dans les deux sens et dans chacune des mailles à potentiel imposé situées sur le tracé du cours d'eau.
- Possibilité de comparer les échanges nappe-rivière simulés par le modèle au débit réel obtenu par mesures de terrain sur le cours d'eau.

Inconvénients :

- Risque que le modèle surestime l'infiltration potentielle du cours d'eau vers la nappe, sans exclure que le débit d'infiltration simulé soit supérieur au débit local du cours d'eau, ce qui est bien sûr irréaliste.
- Les charges hydrauliques restant invariantes sous le cours d'eau, impossibilité de simuler les interférences hydrauliques entre les deux rives et les transferts qui en résultent.
- Prise en compte du colmatage du cours d'eau peu satisfaisante car affectant toute l'épaisseur aquifère.

7.4.5. Mailles de drainage

Cette troisième approche est plus complexe à mettre en œuvre que les deux précédentes mais elle évite la plupart de leurs inconvénients. Elle permet notamment de simuler les échanges nappe-rivière dans les deux sens, avec ou sans colmatage de la rivière et, dans le premier cas, sans biaiser la perméabilité de l'aquifère, ce qui évite de fausser les interférences hydrauliques entre les deux rives du cours d'eau et les transferts qui peuvent y être associés.

Le mode opératoire des mailles de drainage varie d'un logiciel à l'autre mais le principe reste similaire. Il consiste à définir, pour chacune des mailles aquifères situées sur le tracé du cours d'eau, les propriétés hydrogéologiques d'une zone tampon représentant le fond de la rivière, intercalée entre le cours d'eau et l'aquifère sous-jacent. Cette zone tampon est caractérisée par quatre paramètres : largeur du lit de la rivière, épaisseur et perméabilité de la zone tampon, cote locale de la ligne d'eau de la rivière.

Ces paramètres sont nécessaires et suffisants pour que le logiciel de modélisation calcule les débits échangés entre le cours d'eau et la nappe, maille par maille et dans les deux sens. La perméabilité de la zone tampon permet de simuler un colmatage du lit du cours d'eau, sans modifier la perméabilité de l'aquifère, donc sans fausser les interférences hydrauliques entre les deux rives.

Reste tout de même le point critique mentionné avec le schéma « mailles à potentiel imposé », à savoir le risque de simuler un débit d'infiltration du cours d'eau vers la nappe qui soit supérieur au débit local de la rivière (une telle incohérence ne peut pas être détectée par le logiciel de modélisation car celui-ci ne connaît pas le débit du cours d'eau).

Avantages :

- Calcul du débit échangé entre le cours d'eau et la nappe, dans les deux sens et dans chacune des mailles de drainage situées sur le tracé du cours d'eau, ce qui permet, comme pour les mailles à potentiel imposé, de simuler très facilement les lignes d'eau irrégulières.
- Possibilité de comparer les échanges nappe-rivière simulés par le modèle au débit réel obtenu par mesures de terrain sur le cours d'eau.
- Possibilité de simuler sans biais les interférences hydrauliques entre les deux rives du cours d'eau, et les transferts qui peuvent y être associés.

Inconvénients :

- Mise en œuvre plus lourde que les approches précédentes du fait de la nécessité de définir quatre paramètres supplémentaires pour chacune des mailles de drainage situées sur le tracé du cours d'eau : largeur du lit de la rivière, épaisseur et perméabilité de la couche de fond, cote locale de la ligne d'eau de la rivière.
- Risque que le modèle surestime l'infiltration potentielle du cours d'eau vers la nappe, sans exclure que le débit d'infiltration simulé soit supérieur au débit local du cours d'eau.

7.4.6. Modélisation explicite du réseau hydrographique

Dans cette quatrième approche, encore peu répandue dans les logiciels de modélisation hydrogéologique, le réseau hydrographique est explicitement simulé en tant qu'entité hydraulique à part entière, interagissant avec la nappe mais distincte de celle-ci. La représentation du réseau hydrographique peut être plus ou moins détaillée et fidèle à la réalité de terrain ; ceci dépend des capacités du logiciel de modélisation, du degré de schématisation adopté, et de la complexité du réseau hydrographique (nombre et disposition des affluents et défluents, possibles interconnections par des canaux, etc.).

Le principe des échanges hydrauliques entre nappe et cours d'eau est celui du schéma avec « mailles de drainage » où, pour chaque maille située sur le tracé d'un cours d'eau, quatre paramètres définissent les propriétés hydrogéologiques de la zone tampon intercalée entre cours d'eau et nappe, et la cote locale de la ligne d'eau de la rivière. Selon les codes de calcul, cette cote peut être constante - fixée par l'utilisateur - ou variable dans le temps - calculée par le logiciel en fonction du débit d'écoulement, via une loi de Manning simplifiée ou complète. Le logiciel de modélisation calcule les débits des différents bras d'eau, en cumulant d'amont en aval les échanges hydrauliques entre chenaux successifs et les infiltrations/apports vers/depuis la/les nappes. Si un cours d'eau prend sa source en dehors du domaine modélisé, son débit à l'entrée du modèle est fourni au code de calcul de façon à ce que l'écoulement simulé le long du cours d'eau soit aussi réaliste que possible.

Cette prise en compte complète et détaillée du débit des cours d'eau permet au logiciel de modélisation de contrôler efficacement le débit d'infiltration vers la nappe, et de garantir qu'à tout moment et en toute maille il n'excède pas le débit local de la rivière. Cette approche permet donc de simuler les pertes partielles ou totales d'un cours d'eau, ainsi que les résurgences qui peuvent se produire tout au long de son lit.

Avantages :

- Calcul du débit échangé entre le réseau hydrographique et la nappe, dans les deux sens (drainage et infiltration) et dans chacune des mailles de drainage situées sur le tracé des cours d'eau.
- Contrôle des débits d'infiltration pour garantir qu'un cours d'eau n'alimente pas une nappe au-delà de son propre débit local.
- Possibilité de comparer les échanges nappe-rivière simulés par le modèle au débit réel obtenu par mesures de terrain sur les cours d'eau.
- Possibilité de simuler sans biais les interférences hydrauliques entre les rives des cours d'eau, et les transferts qui peuvent y être associés.

Inconvénients :

- Nécessité de fournir quatre paramètres pour chacune des mailles situées sur le tracé des cours d'eau : largeur du lit de la rivière, épaisseur et perméabilité de la couche de fond, cote de la ligne d'eau définissant la charge hydraulique locale – fixe ou variable – dans le cours d'eau. À quoi il faut ajouter la description de la structure hydraulique du réseau hydrographique (affluents et diffluents) et d'éventuels coefficients de Manning-Strickler si la ligne d'eau est calculée par le logiciel en fonction du débit local d'écoulement.
- Sous-estimation du débit des cours d'eau en dehors des périodes d'étiage car seules la composante souterraine est prise en compte (ni ruissellement, ni écoulement hypodermique - cf. paragraphe suivant).

7.4.7. Bilan hydroclimatique calculé par le logiciel de modélisation

Cette cinquième approche améliore la précédente grâce aux bilans hydroclimatiques intégrés dans le logiciel de modélisation. Ceux-ci sont effectués dans des zones supposées homogènes en termes de précipitation, d'ETP (évapotranspiration potentielle) et de quelques paramètres utilisés pour schématiser l'infiltration des précipitations jusqu'à la nappe. Des chroniques de précipitation et d'ETP sont donc requises pour chaque zone hydroclimatique sur l'ensemble de la période modélisée.

À chaque pas de temps et dans chaque zone hydroclimatique, le logiciel de modélisation fait le bilan entre les précipitations, l'ETP, et une capacité hydraulique maximale du sol (Réserve Utile Maximale des agronomes). L'excédent de précipitation est alors partitionné entre une infiltration qui alimente la nappe avec un effet retard plus ou moins accentué, et un ruissellement qui rejoint directement le réseau hydrographique (Thiéry, 2008). Une reprise à la nappe peut aussi être prise en compte quand l'ETP est supérieure aux précipitations et que la réserve utile est insuffisante.

Avantages :

- Tous les avantages de l'approche « Modélisation explicite du réseau hydrographique ».
- Le fait que les bilans hydroclimatiques soient directement calculés par le logiciel de modélisation offre trois atouts supplémentaires :
 - o possibilité d'introduire un retard d'infiltration vers la nappe pour restituer le temps de transit à travers la zone non saturée ;
 - o prise en compte de la composante « ruissellement », et transfert du débit associé vers le cours d'eau le plus proche sur la base du modèle topographique décrit par un Modèle Numérique de Terrain (MNT) ;
 - o actualisation facilitée de la période de simulation par une simple extension des chroniques de précipitations et d'ETP, sans avoir besoin de calculer au préalable la chronique de recharge associée.
- Les débits des cours d'eau simulés par le modèle cumulent à la fois les apports par ruissellement calculés par le module hydroclimatique intégré, et les apports qui transitent par le milieu souterrain. Une bonne adéquation entre chroniques de débit simulées et observées au droit des stations hydrométriques témoigne donc de la pertinence des flux hydrauliques simulés dans les bassins versants associés, aussi bien en cumul global qu'en distribution saisonnière. **La capacité du modèle à bien reproduire les chroniques de débit relevées dans les stations hydrométriques est un élément déterminant pour juger de la représentativité du modèle, en complément à la bonne restitution des chroniques de niveau dans le réseau de suivi piézométrique.**

Inconvénients :

- Nécessité de fournir quatre paramètres pour chacune des mailles situées sur le tracé du cours d'eau (largeur du lit de la rivière, épaisseur et perméabilité de la couche de fond, cote locale de la ligne d'eau de la rivière), de décrire la structure du réseau hydrographique, et de fournir des coefficients de Manning-Strickler si la ligne d'eau est calculée par le logiciel en fonction du débit local d'écoulement.
- Fourniture des données requises pour le calcul intégré des bilans hydroclimatiques par zones.

7.4.8. Choix de l'approche la mieux adaptée pour représenter les cours d'eau

En l'absence de stations hydrométriques renseignant sur les débits du réseau hydrographique, deux options peuvent être retenues :

- **Si le réseau hydrographique draine la nappe sur la totalité de son tracé, l'approche par « mailles de débordement » est suffisante**, sans colmatage sous les cours d'eau parce qu'un tel colmatage est peu probable dans cette configuration d'écoulement où la nappe alimente la rivière.
- **Si, dans quelques secteurs, le réseau hydrographique alimente la nappe par infiltration, l'utilisation de « mailles de drainage » est recommandée le long de ces tronçons, avec un colmatage plus ou moins accentué.** L'hypothèse d'un colmatage évolutif, pouvant devenir quasi total, est à envisager pour les simulations prévisionnelles de champs captants implantés à proximité du réseau hydrographique.

L'approche par « mailles à potentiel imposé » est à éviter en raison des risques d'infiltration excessive qu'elle fait courir si elle n'est pas utilisée avec précaution. Elle peut cependant s'avérer nécessaire pour les rivières équipées de seuils si le code de modélisation utilisé ne permet pas de restituer fidèlement les lignes d'eau en marches d'escalier.

La modélisation explicite du réseau hydrographique, en tant qu'entité hydraulique à part entière interagissant avec la/les nappe(s) mais distincte de celle(s)-ci, associée au calcul des pluies efficaces par le modèle, avec partition entre ruissellement et infiltration, constitue sans conteste l'approche la plus complète pour modéliser les systèmes aquifères régionaux. Elle présente en outre l'avantage de permettre un double calage hydrodynamique, sur les chroniques piézométriques et sur les débits enregistrés aux stations hydrométriques.

Cette approche ne se justifie toutefois que si une ou plusieurs stations hydrométriques représentatives est/sont implantée(s) dans le domaine modélisé. Si celui-ci ne couvre pas la partie amont du bassin hydrographique, il faut en outre que (i) les principaux débits de surface entrant dans le domaine modélisé soient connus par des stations hydrométriques proches des limites de la zone d'étude, ou puissent être évalués avec une précision raisonnable, (ii) la contribution hydraulique des apports souterrains aux écoulements de surface dans le domaine modélisé soit significative vis-à-vis des débits entrant et sortant aux limites, faute de quoi le calage du modèle sur les chroniques hydrométriques peut être fortement biaisé par les incertitudes attachées aux mesures de débit sur les cours d'eau (celles-ci impactent en effet très significativement la différence entre les débits entrant et sortant aux limites du modèle, différence présumée correspondre à peu près aux apports du milieu souterrain, minorés des consommations en eau dans le bassin).

Quel que soit le mode de représentation adopté pour simuler le réseau hydrographique, il est recommandé de procéder par étapes de difficulté croissante, en commençant par simuler les cours d'eau par des mailles de débordement, qui peuvent ensuite être converties en mailles de drainage, puis en mailles rivière à part entière. La complexité de la schématisation adoptée doit cependant rester adaptée au contexte, aux enjeux, et au degré de connaissance du milieu.

7.4.9. Définir avec soin le profil en long des cours d'eau

Il est essentiel de définir avec soin le profil de charge hydraulique des cours d'eau qui composent le réseau hydrographique, car ce profil conditionne à la fois le sens et l'intensité des échanges nappe-rivière. Trois options sont envisageables :

- Pour les schémas à « mailles de débordement », la cote topographique tient lieu de cote hydraulique. Pour qu'un cours d'eau remplisse son rôle de drain naturel, **il faut affecter à chaque maille située sur son tracé une cote topographique égale à l'altitude minimale du Modèle Numérique de Terrain (MNT) dans la maille.**
- Pour les autres schémas, une cote de ligne d'eau est à spécifier dans toutes les mailles où les échanges nappe-rivière sont à simuler. Cette composante d'écoulement est particulièrement importante lorsque l'on s'intéresse aux assèchements de rivière ou à l'effet de seuils barrant un cours d'eau. Dans ce cas, **il est recommandé de lever précisément le profil en long de la ligne d'eau via une campagne de mesure au GPS différentiel** (de préférence en période d'étiage pour les assecs). Si nécessaire, des leviers complémentaires en moyennes eaux et/ou hautes eaux éclairent sur la variabilité saisonnière du régime d'écoulement.
- Lorsque la ligne d'eau présente de grandes fluctuations saisonnières, il peut être préférable de la faire varier automatiquement en fonction du débit d'écoulement, ce que peuvent faire certains codes de modélisation via une loi de Manning. **Dans ce cas, il faut en plus disposer des profils en long et en travers du fond de la rivière**, éléments nécessaires au calcul de la section d'écoulement et de la ligne d'eau associée.

7.5. DONNÉES À FOURNIR AU MODÈLE

Les nombreuses données impliquées dans une modélisation hydrogéologique ont été énumérées dans le chapitre consacré à la synthèse hydrogéologique préalable. Elles sont synthétisées à l'illustration 15, en distinguant données d'entrée, paramètres de calage et références de calage.

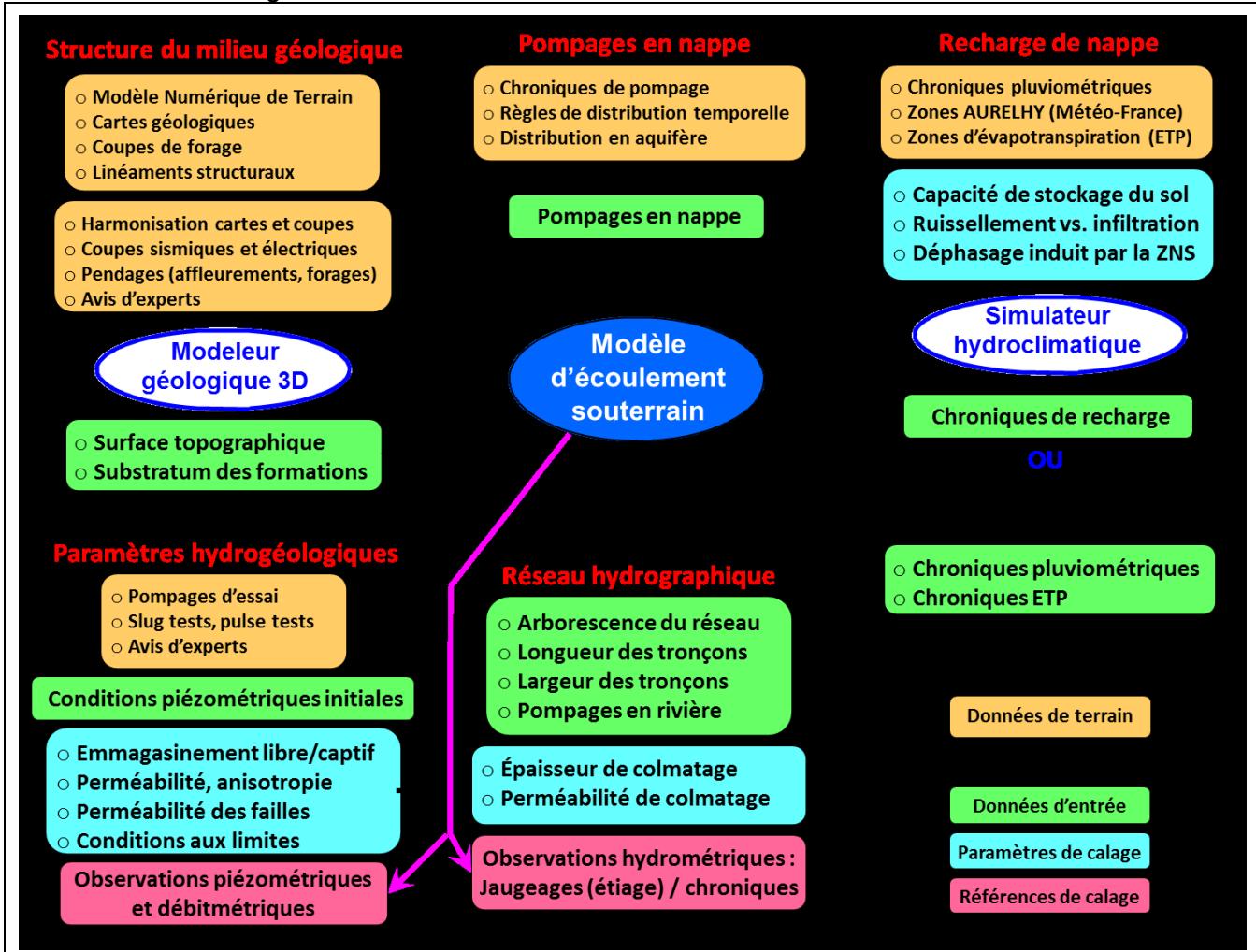


Illustration 15 – Données d'entrée et paramètres de calage d'un modèle d'écoulement souterrain

Les « données d'entrée », identifiées par une couleur verte, sont de trois types :

- celles qui sont invariantes d'une simulation à l'autre : structure du milieu géologique (surface topographique et substratum des couches du modèle), et structure du réseau hydrographique s'il est modélisé explicitement (arborescence du réseau hydrographique, longueur et largeur de ses tronçons) ;
- celles qui correspondent à des données de terrain variables au cours du temps : pompages en nappe, pompages en rivière, chroniques de pluie et d'ETP si le logiciel de modélisation possède un simulateur hydroclimatique intégré, ou chroniques de recharge si la recharge a été calculée au préalable par un simulateur hydroclimatique externe (via, si possible, calage d'un modèle pluie/débit, pluie/niveau piézométrique ou pluie/débit/niveau piézométrique) ;

- celles qui servent de conditions piézométriques initiales au démarrage des calculs (cf. chapitre 8.2.3 « Conditions initiales »).

Les données de calage, colorées en bleu sur l’Illustration 15, correspondent aux données qui, n’étant évaluées que par interprétation de mesures ponctuelles ou n’étant pas accessibles aux mesures, doivent être ajustées ou déterminées au cours des phases de calage du modèle. Ces données correspondent aux propriétés hydrogéologiques des formations (emmagasinement libre/captif, perméabilité⁵ et anisotropie associée, perméabilité des failles, conditions aux limites⁶), à celles du réseau hydrographique (épaisseur et perméabilité de colmatage de chacun des tronçons), et aux paramètres impliqués dans les calculs hydroclimatiques (capacité de stockage du sol, partition entre ruissellement et infiltration, déphasage induit par la zone non saturée).

Les références de calage, en rose sur l’Illustration 15, sont constituées des jeux de mesures piézométriques et hydrométriques que l’on s’efforce de reproduire par simulation au cours du calage du modèle : relevés piézométriques synchrones (assimilés à des « cartes piézométriques ») et chroniques piézométriques enregistrées dans un réseau de points d’observation, jaugeages ponctuels en rivières et chroniques de débit relevées dans les stations hydrométriques implantées le long du réseau hydrographique.

7.6. AFFECTATION DES PROPRIÉTÉS HYDROGÉOLOGIQUES

Pour réaliser les calculs, le logiciel de modélisation doit disposer d’une valeur de transmissivité (ou de perméabilité) et d’un coefficient d’emmagasinement dans chaque maille du domaine modélisé. Or, de telles données ne sont disponibles que très ponctuellement, sur les sites des pompages d’essai, et la question se pose souvent de savoir comment convertir la transmissivité déduite d’un pompage d’essai en une perméabilité représentative de la formation, à l’échelle verticale et horizontale d’une maille de modèle. Quant aux formations semi-perméables, très rarement investiguées, aucun paramètre hydrogéologique n’y est en général connu.

L’affectation de valeurs chiffrées à chaque maille active repose donc en grande partie sur la description plus ou moins subjective des faciès par les géologues, puis sur la traduction quantitative qu’en font les hydrogéologues. Les choix effectués à la construction du modèle pour assigner perméabilité et coefficient d’emmagasinement à chaque maille sont donc en grande partie arbitraire, sans que cela porte toutefois à conséquence car le calage du modèle a précisément pour objet d’ajuster la distribution spatiale de ces paramètres.

En général, on s’efforce de délimiter des zones « homogènes » à partir de cartes de faciès ou en se fondant sur l’évolution spatiale des faciès telle qu’elle est pressentie par les géologues sur la base d’observations de terrain et de réflexions sur les modes de dépôt/érosion des formations, les épisodes diagénétiques et les déformations tectoniques.

⁵ En pratique, c’est la transmissivité, produit de la perméabilité par l’épaisseur mouillée, qui intervient dans les échanges hydrauliques entre les mailles d’un modèle. Ceci étant, puisqu’une fois le modèle construit, sa géométrie n’est en général pas modifiée pendant les phases ultérieures de modélisation, ce sont souvent les perméabilités et non les transmissivités qui sont ajustées au cours du processus de calage.

⁶ Les conditions aux limites servent à représenter les échanges hydrauliques entre le domaine modélisé et le « monde extérieur ». Ces échanges ne sont en général pas connus et leur évaluation fait partie intégrante du processus de calage (p. ex. en ajustant la perméabilité des mailles situées sur les limites du modèle).

Chaque zone se voit ensuite affecter des paramètres hydrogéologiques qui doivent être à la fois (i) en adéquation avec les données de terrain, (ii) en phase avec les fourchettes usuellement admises pour les formations concernées, (iii) cohérentes les unes avec les autres au regard de la gamme des faciès rencontrés. En l'absence de données de terrain, une valeur uniforme est attribuée à l'ensemble d'une couche. On peut noter, par ailleurs, que la variabilité spatiale des épaisseurs de formation induit d'elle-même une modulation des propriétés hydrogéologiques du système aquifère lorsque les valeurs numériques assignées au modèle correspondent à des perméabilités et/ou à des coefficients d'emmagasinement captif spécifique.

Les valeurs standards utilisées pour les perméabilités et les porosités d'interstices de différentes formations géologiques sont présentées en Annexe 2.

En hydrogéologie, la fonction capacitive des formations est rendue par la notion de coefficient d'emmagasinement. En modélisation des écoulements souterrains, **on attribue en général deux valeurs de coefficient d'emmagasinement à chaque maille, une valeur d'emmagasinement libre et une valeur d'emmagasinement captif spécifique**, le logiciel de modélisation sélectionnant de lui-même la valeur appropriée selon que la nappe est libre ou captive dans la maille concernée au pas de temps considéré.

Coefficient d'emmagasinement libre

Pour les nappes libres, le coefficient d'emmagasinement est assimilable à la porosité « efficace » (Castany, 1961), ou « effective » (Tison, 1951), ou encore « porosité de drainage » (Vachaud, 1968), rapport entre le volume d'eau qu'un milieu poreux saturé peut libérer sous l'effet d'un drainage gravitaire complet, à son volume total : $S = V_{\text{Eau gravitaire}} / V_{\text{Milieu poreux}}$

Coefficient d'emmagasinement captif spécifique

Dans un aquifère captif, le coefficient d'emmagasinement est lié à la compressibilité et à l'expansibilité de l'eau et du milieu aquifère, ainsi qu'à l'épaisseur de la couche aquifère. Pour cette raison, **il ne faut utiliser que la notion de coefficient d'emmagasinement captif spécifique (noté S_s , dimension m^{-1})**, paramètre intrinsèque de la formation, égal au rapport entre le coefficient d'emmagasinement captif S déduit d'un pompage d'essai et l'épaisseur aquifère saturée e : $S_s = S/e$.

Les ordres de grandeur communément admis pour les coefficients d'emmagasinement libres et captifs spécifiques de différentes formations sont fournis en Annexe 2.

8. Calage du modèle

8.1. CALAGE EN RÉGIME PERMANENT ET EN RÉGIME TRANSITOIRE

Les valeurs de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement affectées au maillage pendant la construction du modèle étant majoritairement indicatives en raison du nombre limité de données de terrain disponibles, une phase d'ajustement de ces paramètres est indispensable pour que le modèle puisse reproduire de façon réaliste le comportement du système aquifère. Cette phase d'ajustement, dite de calage, consiste à simuler quelques configurations particulières, sélectionnées pendant la synthèse hydrogéologique préalable, pour lesquelles les données de terrain disponibles permettent d'avoir une connaissance raisonnablement précise des principales entrées/sorties du système aquifère et des réactions de ce dernier à ces combinaisons de contraintes externes.

Dans ce qui suit on supposera, pour illustrer la démarche sans trop la complexifier, qu'il n'y a pas de couplage avec un réseau hydrographique.

Théoriquement, deux phases de calage sont possibles :

- **Une phase de calage en « régime hydraulique permanent »,** consistant à simuler une ou des configurations particulières durant lesquelles, sous l'effet de contraintes externes stabilisées, le système aquifère atteint un régime d'équilibre que le modèle doit restituer au mieux.
- **Une phase de calage en « régime hydraulique transitoire »,** où l'on simule un ou plusieurs épisodes durant lesquels des modifications de contraintes externes provoquent des évolutions du système aquifère ; une connaissance détaillée des causes et de leurs effets est indispensable pour procéder au calage du modèle.

En pratique, le régime permanent au sens strict est rare et, lorsqu'il est fait état de « calage en permanent », il ne s'agit le plus souvent que d'une étape dans le processus de calage, celui-ci comportant surtout une phase en régime transitoire. Un modèle représentatif d'une réalité un tant soit peu complexe n'est jamais calé uniquement en régime permanent (si tel était le cas, on ne saurait lui accorder une quelconque capacité prédictive).

Le calage en régime permanent porte sur un/des état(s) hydraulique(s) stabilisé(s) n'induisant ni stockage ni déstockage d'eau dans le système aquifère, donc sans contribution de la capacité d'emmagasinement du milieu souterrain. Cette phase de calage est par conséquent circonscrite à la seule distribution spatiale des perméabilités et de la recharge (par zones), lorsque leur répartition initiale est déjugée par le processus de calage.

Le calage en régime transitoire porte sur des évolutions du système aquifère qui mettent en jeu à la fois les perméabilités et les emmagasinements. Si les perméabilités ont été ajustées au cours du calage en permanent, le calage en transitoire sert à ajuster la distribution des emmagasinements et des paramètres qui interviennent dans le calcul de la recharge à partir des données climatiques.

En réalité, il est rare que les deux phases de calage soient totalement découplées. En pratique, on procède souvent par itérations successives entre calage en régime permanent - pour dégrossir la distribution des perméabilités et reconstituer un état piézométrique stabilisé - et calage en transitoire pour ajuster les perméabilités et, secondairement, les emmagasinements afin de restituer au mieux la dynamique des écoulements et les fluctuations spatio-temporelles.

La nécessité – fréquente – de coupler les deux phases de calage tient au fait que :

- d'une part, l'état piézométrique stabilisé et bien documenté nécessaire à un véritable calage en permanent ne se rencontre pratiquement jamais (dans certains cas, on peut toutefois concevoir un régime permanent "moyen" ; par exemple avec des nappes à cycle annuel stationnaire pour lesquelles il peut être possible d'identifier une piézométrie moyenne, estimée à partir des charges piézométriques moyennes annuelles, qui peut être considérée comme un régime pseudo-stabilisé simulable en régime permanent) ;
- d'autre part, les réactions d'un aquifère à des sollicitations externes dépendent à la fois de son aptitude à conduire les écoulements souterrains et de sa capacité à stocker/déstocker l'eau (ce qui se traduit par le fait que le comportement d'un fluide en milieu poreux est décrit par l'équation de la diffusivité, rapport entre la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement du milieu).

Un exemple de l'interaction entre écoulement et stockage est illustré par le fait que le rabattement de nappe provoqué par un pompage (pour une configuration géométrique et des conditions aux limites données) dépend à la fois de la transmissivité et de l'emmagasinement du milieu, l'effet du premier paramètre l'emportant sur le second. **Le calage en régime transitoire se révèle de ce fait plus riche en informations sur la distribution spatiale des perméabilités que sur celle des emmagasinements.**

8.2. DONNÉES COMPLÉMENTAIRES REQUISES POUR LE CALAGE

Puisque les deux phases de calage consistent à simuler des épisodes particuliers - stabilisés pour le régime permanent, évolutifs pour le régime transitoire - et à ajuster les paramètres internes du modèle pour que celui-ci reproduise au mieux le comportement du système aquifère, il est nécessaire de fournir au logiciel de modélisation les jeux de données permettant de définir les entrées/sorties, les conditions aux limites et les conditions initiales. Des jeux de mesures de terrain sont en outre indispensables pour permettre de comparer les réponses simulées par le modèle au comportement réel du système aquifère. À quoi s'ajoutent enfin des paramètres spécifiques au fonctionnement du code de calcul : choix des méthodes de résolution, unités des données, pas de temps, critères de convergence, etc.

8.2.1. Entrées/sorties

En hydraulique souterraine, les contraintes sur les entrées/sorties correspondent principalement aux conditions hydroclimatiques (ou recharges pluviales si elles sont évaluées au préalable), débits de pompage/injection, retours d'irrigation, etc. En transport hydrodispersif, il faut aussi définir les sources de pollution (localisation et chroniques) et les paramètres permettant de simuler le comportement des solutés et leurs interactions avec le milieu (densité, viscosité, coefficient de distribution, facteur de retard, temps de demi-vie, etc.). En thermique, des informations spécifiques sont également à fournir : termes sources et propriétés thermiques des matériaux.

La période à sélectionner pour le calage hydrodynamique d'un modèle destiné par la suite à simuler des scénarios de transport hydrodispersif et/ou thermique doit donc si possible satisfaire l'ensemble de ces contraintes.

Pour élargir le champ d'exploitation futur du modèle (et renforcer sa capacité prédictive), il faut veiller à sélectionner pour le calage les périodes qui intègrent les plus hauts/bas niveaux/débits observés.

8.2.2. Conditions aux limites

En complément, il faut fournir au logiciel de modélisation les conditions hydrauliques aux limites du modèle, de façon à ce que celui-ci puisse correctement intégrer l'influence du « monde extérieur ». On distingue, dans le traitement des équations aux dérivées partielles, trois grands types de conditions aux limites :

- Condition de Dirichlet, portant sur la variable principale : ici, la charge imposée. En hydraulique souterraine, on impose des conditions de Dirichlet sur une limite si la charge hydraulique y est indépendante des conditions d'écoulement dans la nappe. C'est souvent le cas pour le contact d'une nappe avec un plan d'eau libre (mer, lac, rivière, ...).
- Condition de Neumann, portant sur la dérivée première de la variable principale : ici, flux hydraulique imposé, pouvant être nul ou non.
- Condition de Fourier, combinaison des deux précédentes, correspondant en hydraulique souterraine au cas d'une rivière drainant ou alimentant une nappe à travers une couche de fond peu perméable.

À quoi s'ajoutent deux autres types de conditions aux limites :

- Condition de débordement, vérifiée lorsque la surface libre de la nappe recoupe la surface du sol. Cette configuration se traduit sur le terrain par la présence d'une source, d'un plan d'eau ou d'un cours d'eau. La charge hydraulique imposée dans le modèle est alors égale à la cote topographique. Si la charge calculée dans une maille devient supérieure à la cote de débordement assignée à cette maille, il y a débordement et la charge effective est ramenée à la cote du sol, l'excès de charge étant converti en débit de débordement.
- Condition de surface libre ou de suintement, très similaire à la précédente dont elle constitue une généralisation : alors qu'un débordement ne peut survenir que dans la couche supérieure du modèle, un suintement peut se produire dans n'importe quelle couche du domaine modélisé ; par exemple, dans une galerie, un puits, une paroi, un talus. Comme le débordement, le suintement se produit lorsque la charge hydraulique atteint le toit de la maille.

Le choix de conditions aux limites appropriées au contexte hydrogéologique et au régime hydraulique de simulation est largement développé au chapitre 8.3.1 « Définir des conditions aux limites pertinentes ».

Lorsque le réseau hydrographique est explicitement modélisé et que l'amont du bassin hydrographique n'est pas couvert par le modèle, il convient aussi de fournir les chroniques de débit des cours d'eau entrant dans le domaine modélisé.

8.2.3. Conditions initiales

Les conditions initiales à fournir au modèle servent à définir l'état piézométrique en début de simulation. Elles dépendent étroitement du contexte de modélisation comme le montrent les paragraphes qui suivent.

Calage en régime permanent

Le calage en régime permanent permet de calculer l'état piézométrique stabilisé associé à un jeu de contraintes externes invariantes. Pour démarrer les calculs, le logiciel de modélisation a besoin d'une distribution initiale des charges piézométriques, même approximative. Cet état initial est en général interpolé à partir d'observations de terrain plus ou moins denses, précises et synchrones. De deux choses l'une, alors :

- ou bien la piézométrie initiale fournie au code de calcul reflète un état piézométrique stabilisé réellement observé sur le terrain, et dans ce cas elle est utilisée comme référence pour mener une véritable phase de calage en régime permanent,
- ou bien cette piézométrie est trop incertaine pour servir de référence pour le calage du modèle, et dans ce cas elle ne sert qu'à initier les calculs pour simuler une piézométrie stabilisée qui servira ensuite de condition initiale pour le calage en régime transitoire.

Calage en régime transitoire

La situation est toute différente pour les conditions initiales du calage en régime transitoire car cette opération consiste à simuler les évolutions du système aquifère sous l'effet de modifications des contraintes externes, en partant d'un état initial qui doit être précisément décrit au travers une distribution des charges dans toutes les mailles du modèle.

Ces conditions initiales ne peuvent pas être directement interpolées/extrapolées à partir des observations de terrain, par nature discrètes et entachées d'incertitudes : elles doivent impérativement résulter de simulations préalablement effectuées en régime permanent ou transitoire, de façon à être en tout point cohérentes avec les équations décrivant le comportement du fluide dans le milieu géologique.

Lorsque les conditions initiales ne peuvent être qu'approximativement reconstituées, on peut les imposer suffisamment loin dans le passé (éloignement temporel fonction de l'inertie de la nappe) de façon à estomper leur influence sur la période d'intérêt.

8.2.4. Données servant de références pour le calage

Pour s'assurer que le modèle reproduit correctement le fonctionnement du système aquifère, il faut disposer de mesures de terrain permettant de comparer les résultats de simulation aux relevés effectués dans un réseau d'observation : charges piézométriques ponctuelles associées à un état stabilisé pour le calage en régime permanent, chroniques de charge pour le calage en régime transitoire.

Pour le cas particulier des nappes à cycles annuels stationnaires, un état « piézométrique moyen »- estimé à partir des charges piézométriques moyennes annuelles - associé à une recharge moyenne, peut servir de référence pour le calage en régime permanent. Il est en revanche plus délicat de simuler les piézométries « moyennes » de « hautes eaux » ou de « basses eaux » comme des états permanents car la question se pose alors de savoir quelle recharge leur associer.

Il est plus logique de chercher à reproduire la chronique piézométrique passant par les hautes eaux et par les basses eaux au cours de la phase de calage en régime transitoire ou pendant la phase de validation ultérieure.

8.3. RÈGLES À RESPECTER POUR LA MODÉLISATION

8.3.1. Définir des conditions aux limites pertinentes

Lorsque le modèle s'étend jusqu'aux limites naturelles du système aquifère, les conditions aux limites affectées en périphérie servent à représenter les échanges hydrauliques avec le milieu environnant. **Lorsque le modèle ne couvre qu'une partie du système aquifère, les conditions aux limites servent à représenter le rôle hydraulique des zones non modélisées. Dans tous les cas, il importe de définir avec soin ces conditions aux limites pour qu'elles restituent l'influence du « monde extérieur » sans la fausser.**

En pratique, **on attribue à chaque limite un type de conditions aux limites en adéquation avec son rôle hydraulique, différent selon que la limite se situe à l'amont ou à laval hydraulique du modèle, et que la simulation est conduite en régime hydraulique permanent ou transitoire.**

Limite hydraulique amont

Lorsque le modèle s'étend jusqu'à la limite naturelle amont du système aquifère, celle-ci correspond en général à une limite d'affleurement ou à une ligne de partage des eaux. Elle est alors simulée par une limite à flux nul, aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire.

Lorsque la limite amont est « artificielle », il s'agit en principe d'une limite à débit entrant, apportant à la zone modélisée les flux générés dans la partie amont du bassin versant souterrain. Elle est alors modélisée de façon différente selon que le régime hydraulique est permanent ou transitoire :

En régime hydraulique permanent : limite à potentiel imposé

Sur la limite amont, on utilise en principe des mailles à potentiel imposé (condition de Dirichlet) pour le régime hydraulique permanent, et l'on affecte à chaque maille une charge hydraulique évaluée au mieux à partir des mesures de terrain disponibles. Si la limite amont correspond à une courbe équipotentielle, une charge hydraulique uniforme est attribuée à l'ensemble des mailles associées à la limite.

Le logiciel de modélisation calcule pour chaque maille de la limite le débit échangé avec la zone amont non modélisée. Un contrôle de cohérence est à ce stade indispensable pour s'assurer que le débit global entrant par la limite amont est compatible avec l'extension, les propriétés hydrogéologiques et la recharge potentielle sur l'amont du bassin versant souterrain.

En régime hydraulique transitoire : limite à débit imposé

Pour les simulations en régime hydraulique transitoire, on remplace les potentiels imposés par des débits imposés (condition de Neumann), en affectant à chacune des mailles de la limite amont le débit entrant calculé par le modèle à l'issue du calage en régime permanent.

Cette démarche permet de garantir que les débits entrants simulés par le logiciel de modélisation n'augmentent pas de façon irréaliste au cas où une importante baisse des charges affecterait la zone modélisée.

L'attribution d'un débit entrant imposé et invariant est pessimiste, car elle sous-entend que les débits entrant par l'amont hydraulique ne peuvent pas augmenter sous l'effet d'une baisse des charges dans la zone modélisée. Cette approche est néanmoins raisonnable car les apports provenant de l'amont du bassin versant souterrain sont fonction des conditions de recharge sur ce bassin, elles-mêmes indépendantes des conditions d'exploitation en aval.

Limites hydrauliques aval

Par construction, le débit qui traverse une limite hydraulique aval est globalement un débit qui sort de la zone modélisée.

Régime hydraulique permanent

La limite aval est couramment simulée en régime hydraulique permanent par des mailles à potentiel imposé, des mailles de débordement ou des mailles de drainage, le choix de l'un de ces modes de représentation étant surtout conditionné par les simulations ultérieures en régime hydraulique transitoire (cf. paragraphe suivant).

Dans les trois cas, on affecte à chaque maille de la limite une charge hydraulique évaluée au mieux à partir des mesures de terrain disponibles. Si la limite aval correspond à une courbe équipotentielle, une charge hydraulique uniforme est attribuée à l'ensemble des mailles associées à cette limite.

Le logiciel de modélisation calcule le débit sortant de la zone modélisée par chacune des mailles de la limite aval.

Régime hydraulique transitoire

Plusieurs options sont possibles pour simuler la limite aval en régime hydraulique transitoire :

- Mailles à potentiel imposé : comme en régime permanent, toute baisse de niveau piézométrique dans la zone modélisée induit une réduction du débit sortant, ce qui est conforme à la réalité hydraulique. Le risque avec cette approche, c'est qu'une baisse de charge importante induise une réalimentation de la nappe par la limite aval, d'autant plus importante que les niveaux piézométriques déclinent en amont. Il appartient donc au modélisateur de contrôler l'éventuel débit entrant et de veiller à ce qu'il reste cohérent avec le contexte hydrogéologique.
- Mailles à flux imposé avec, dans chaque maille, le débit sortant calculé par le modèle à l'issue du calage en régime permanent ; cette option est peu réaliste et à l'évidence pessimiste lorsque les niveaux piézométriques baissent en amont de la limite.
- Mailles de débordement avec, dans chaque maille, une cote de débordement égale au niveau piézométrique utilisé pour le calage en permanent. Comme avec les mailles à potentiel imposé, toute baisse de niveau piézométrique dans la zone modélisée réduit le débit sortant, conformément à la réalité hydraulique. *A contrario*, les mailles de débordement ne permettent pas une réalimentation de la nappe à partir de la limite si les niveaux piézométriques en amont de celle-ci deviennent inférieurs à ceux de la limite. Cette schématisation hydraulique est donc pessimiste, mais elle prémunit contre une réalimentation excessive de la nappe à partir de la zone aval non modélisée.
- Mailles de drainage, option la plus performante permettant de simuler aussi bien des débits entrant que sortant à travers la limite aval, modulables en agissant sur la perméabilité de colmatage. Le choix de la valeur à affecter au colmatage reste cependant en grande partie arbitraire.

Limites hydrauliques latérales

Les limites du modèle qui ne se trouvent ni à l'amont ni à l'aval hydraulique des écoulements souterrains sont en général désignées sous le terme générique de « limites latérales ». Elles correspondent souvent à des limites d'affleurement, des lignes de courant ou des cours d'eau.

Limite latérale associée à une limite d'affleurement

Généralement modélisée sous forme d'une limite à flux nul.

Limite latérale correspondant à une ligne de courant

Puisque, par définition, aucun flux ne traverse une ligne de courant, on modélise par des limites à flux nul les limites latérales associées à des lignes de courant. Il faut cependant veiller à ce que leur statut de ligne de courant soit approprié tout au long des scénarios modélisés. Un contrôle simple consiste à s'assurer que les charges hydrauliques simulées le long de la limite restent stables.

Limite latérale associée à un cours d'eau

Deux options sont possibles lorsque la limite latérale représente un cours d'eau :

- Si le cours d'eau draine la nappe, deux configurations doivent être distinguées :
 - o Le milieu géologique est fissuré/fracturé : dans ce cas, le cours d'eau est représenté par une limite à potentiel imposé, capable de drainer la nappe, ou de l'alimenter sous l'effet d'une baisse importante des niveaux piézométriques qui surviendrait en régime transitoire sous l'effet de forts pompages (un contrôle de cohérence est indispensable pour s'assurer que le débit d'alimentation ne dépasse pas le débit de la rivière).
 - o Le milieu géologique est poreux : il est alors préférable de modéliser le cours d'eau par des mailles de débordement (drainage de nappe uniquement) ou par des mailles de drainage (drainage ou alimentation de la nappe, ajustable via un colmatage du fond du cours d'eau).
- Si le cours d'eau alimente la nappe, deux configurations sont possibles :
 - o Le milieu géologique est fissuré/fracturé : dans ce cas, le cours d'eau est représenté par une limite à potentiel imposé (il faut cependant veiller à ce que le débit apporté à la nappe par le cours d'eau reste inférieur au débit du cours d'eau).
 - o Le milieu géologique est poreux : il est alors préférable de modéliser le cours d'eau par des mailles de drainage, dont on pourra ensuite réduire la perméabilité pour des scénarios prévisionnels anticipant un colmatage progressif du cours d'eau.

Dans tous les cas, il convient de limiter au strict nécessaire le nombre de mailles à potentiel imposé de façon à laisser au modèle la plus grande flexibilité possible pour le calcul des charges hydrauliques. Il est assez fréquent de pouvoir se passer totalement de mailles à potentiel imposé, y compris sur la limite aval, en les remplaçant par des mailles de débordement ou de drainage qui permettent de restituer de façon plus réaliste la physique des écoulements.

8.3.2. Choisir de façon adéquate la période de calage et les pas de temps

Période de calage

Pour le calage en transitoire, la durée de la période à simuler doit couvrir au moins un cycle d'évolution du système aquifère de façon à être en adéquation avec sa dynamique:

- Avec une nappe à forte inertie comme celle des Calcaires de Beauce (graphique supérieur de l'Illustration 16), ceci implique que la période de calage couvre au moins une vingtaine d'années, sous peine de ne pas restituer correctement la dynamique très inertie du système aquifère.
- En revanche, pour les aquifères à périodicité annuelle, comme celui des Sables Landéniens (graphique inférieur de l'Illustration 16), la période de calage peut se réduire à quelques cycles annuels, aussi contrastés que possible, suivis d'autres cycles pour valider le calage.

Il est cependant recommandé d'utiliser toute la série de données disponibles de façon à s'assurer que le modèle restitue convenablement un éventail aussi large que possible de scénarios hydroclimatiques. La série des données peut alors être partagée entre une part consacrée au calage du modèle – la plus longue – et une autre affectée à la validation. On pourrait par exemple opter pour une répartition ¾ calage - ¼ validation.

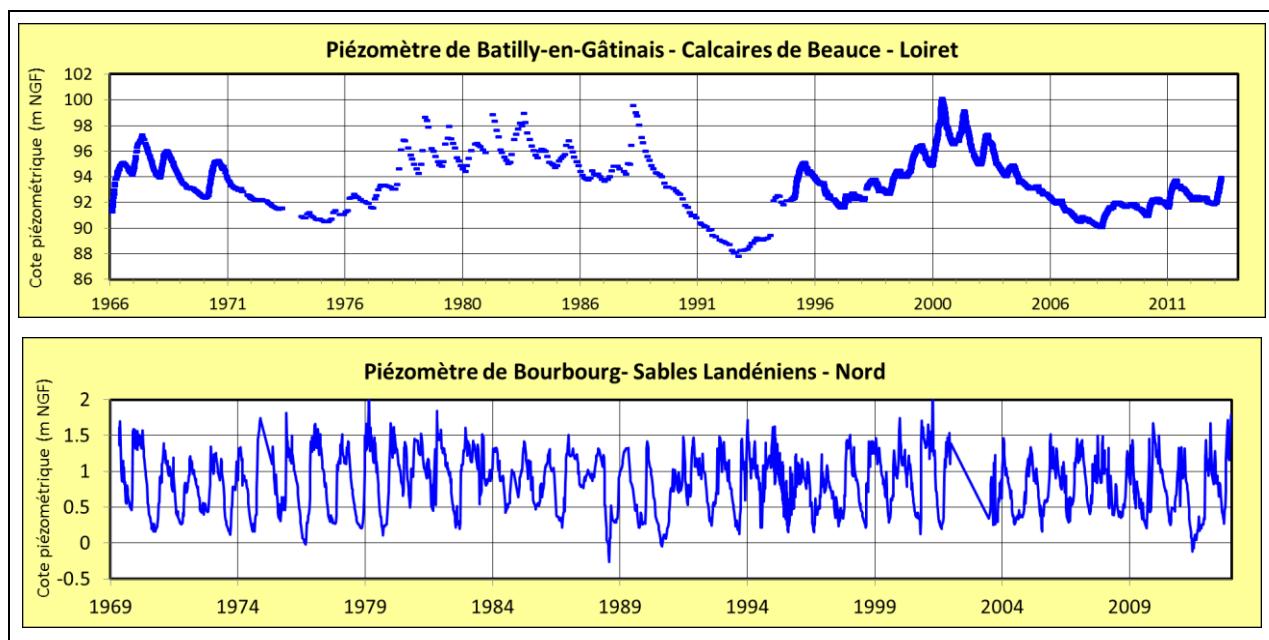


Illustration 16 – Chroniques piézométriques à inertie pluriannuelle (Beauce) et annuelle (Nord)

- Pour les nappes alluviales d'accompagnement, dont la dynamique est calquée sur celle du cours d'eau associé, quelques périodes caractéristiques bien documentées ayant distinctement influencé la nappe (passage de crue, démarrage/arrêt de pompages) peuvent suffire à contraindre le calage du modèle, même si elles sont de l'ordre de quelques semaines ou de quelques mois. On utilisera ensuite d'autres épisodes bien suivis pour valider le calage du modèle.

Pas de temps

Certains logiciels de modélisation peuvent être très contraignants en matière de pas de temps, en obligeant à utiliser des pas de durée uniforme au sein de périodes définies par l'utilisateur. La prescription des pas de temps peut s'en trouver très alourdie, et parfois conduire à des pas de temps inutiles qui allongent la durée des calculs. Une totale souplesse du logiciel de modélisation est à cet égard bienvenue ; elle permet aussi d'ajuster les pas de temps à la dynamique des phénomènes : par exemple, pour simuler le démarrage ou l'arrêt de pompages, il peut être intéressant d'utiliser des pas de temps croissant comme le logarithme du temps.

La possibilité de définir les temps par des dates-heures-minutes, plutôt que par des durées écoulées depuis une origine arbitraire, est également un avantage certain, notamment pour construire les graphiques de comparaison entre valeurs simulées et valeurs observées.

Quel que soit le pas de temps utilisé pour les simulations hydrodynamiques, il est recommandé d'effectuer les calculs hydroclimatiques permettant d'élaborer les chroniques de recharge à un pas de temps inférieur ou égal à 10 jours. Dans l'idéal, au pas journalier, surtout en climat méditerranéen où les épisodes pluvieux sont brefs et intenses, l'évapotranspiration potentielle élevée. À défaut, un pas de temps pentadaire (5 j) voire décadaire (10 j) peut convenir en climat océanique. En revanche, un pas mensuel est à proscrire car il peut conduire à sous-estimer significativement la recharge. L'analyse de la réactivité de la nappe à partir des chroniques piézométriques observées peut parfois guider le choix du pas de temps hydroclimatique le mieux adapté au contexte aquifère.

Pour satisfaire à l'exigence de pas de temps courts pour le calcul de la recharge sans multiplier inutilement le nombre de pas de temps des simulations hydrodynamiques, une solution simple consiste à utiliser deux pas de temps distincts. Par exemple, un pas journalier pour les calculs hydroclimatiques et un pas plus long pour les simulations hydrodynamiques, décadaire ou mensuel selon l'inertie du système aquifère. Dans ce cas, les recharges journalières sont cumulées sur toute la durée du pas de temps hydrodynamique, soit par le logiciel de simulation lui-même soit par un calcul externe préalable.

8.4. RECOMMANDATIONS POUR LE CALAGE DU MODÈLE

Ce chapitre émet une série de recommandations pour faciliter le déroulement des opérations de calage, souvent longues et délicates, améliorer la qualité du calage, et renforcer la représentativité du modèle.

8.4.1. Contrôler les résultats de simulation

La quantité des données de terrain et des paramètres de fonctionnement utilisés par un logiciel de modélisation est telle qu'il est inévitable que des erreurs se glissent de temps en temps dans les jeux de données. Certaines de ces erreurs, en particulier lorsqu'elles touchent à la géométrie des formations, peuvent être immédiatement détectées et signalées par les dispositifs de contrôle de cohérence dont sont munis les codes de calcul. La plupart des erreurs ne peuvent cependant pas être décelées parce qu'elles relèvent plutôt de l'erreur de saisie : par exemple, débit de pompage de 200 m³/h au lieu de 20 m³/h, perméabilité de 10⁻⁴ m/s au lieu de 10⁻³ m/s, etc.

Aucune alerte ne pouvant dans ce cas être déclenchée par le code calcul, **il appartient au modéliste de vérifier systématiquement les résultats fournis par le modèle, de façon à s'assurer qu'ils correspondent bien aux conditions de simulation escomptées et qu'il n'y a pas d'erreur dans les fichiers de données utilisés.** Dans une certaine mesure, le modèle peut aussi aider à la détection d'anomalies de saisie dans les données d'entrée. Par exemple, une erreur de saisie sur un débit de pompage ($200 \text{ m}^3/\text{h}$ au lieu de $200 \text{ m}^3/\text{h}$) peut parfois être décelée parce que le rabattement simulé par le modèle est nettement supérieur au rabattement anticipé.

En premier lieu, **il convient d'accompagner les simulations numériques de quelques évaluations de « coin de table » et/ou calculs analytiques pour s'assurer que les ordres de grandeur des différentes approches sont comparables.** Par exemple :

- à l'aide de la formule de Theis, s'assurer que le rabattement généré par un puits ou un champ captant est de même ampleur que celui qui est simulé par le modèle ;
- de simples bilans annuels permettent de vérifier que le débit moyen annuel simulé à l'exutoire d'un bassin hydrographique est cohérent avec le volume annuel de recharge sur ce bassin ;
- l'application de la Loi de Darcy permet de contrôler la vitesse de migration d'une pollution, en évaluant la vitesse réelle via une porosité cinématique estimée ;
- les rabattements générés par des paliers et arrêts de pompage successifs, ainsi que les interférences entre forages, peuvent être évalués de façon analytique en appliquant le principe de superposition ;
- les effets de limites, étanches ou à charge imposée, peuvent être approchés de la même façon, parfois en tirant parti d'une symétrie d'écoulement ;
- etc.

Pour le modèle lui-même, les éléments suivants sont toujours à analyser avec soin :

- Indicateurs de suivi de la convergence des calculs : débits résiduels d'erreur, déséquilibre du bilan hydraulique, écart de charge hydraulique entre itérations successives (pouvant révéler des oscillations numériques), etc.
- Bilan hydraulique détaillant les composantes des débits d'entrée (recharge, injection, apports aux limites, etc.) et de sortie (pompages, drainage, évaporation, etc.). Éventuellement, cartes montrant la distribution de ces débits.
- Cartes des charges hydrauliques simulées/observées, avec indication des mailles dénoyées, cartes des pourcentages de saturation (épaisseur mouillée/épaisseur de la maille), etc.
- Chroniques piézométriques simulées/observées.
- À la construction du modèle : cartes de substratum, toit, épaisseur, profondeur de couche ; coupes verticales.

À ces éléments s'ajoutent, en cours de modélisation, les comparaisons systématiques à effectuer entre les résultats des simulations successives, puissant moyen de contrôle pour s'assurer que les évolutions piézométriques/hydrométriques simulées par le modèle sont cohérentes avec les modifications apportées aux données d'entrée. En pratique, ce type de comparaison est difficile, voire impossible, si les modifications apportées entre les simulations ont porté sur plusieurs paramètres à la fois ; il est donc recommandé, au moins pendant la phase de calage du modèle, de **ne modifier qu'un seul paramètre à la fois de façon à pouvoir anticiper les conséquences des modifications effectuées, puis de s'assurer que les nouvelles distributions de charge et de débit simulées par le modèle sont conformes aux prévisions.**

8.4.2. Utiliser des indicateurs pertinents pour suivre la convergence des calculs

Les codes de calcul mis en œuvre par les logiciels de modélisation maillée proposent de nombreuses méthodes de résolution, toujours itératives, où, à partir d'une distribution initiale des charges, le logiciel calcule, itération après itération, de nouvelles distributions de charge, de plus en plus proches de la solution. Dans certaines configurations, il arrive que la convergence progressive vers la solution finisse par stagner, voire diverger sous l'effet d'oscillations numériques. Pour y remédier, il est en général possible d'affecter un coefficient de sous-relaxation à la procédure de calcul. Ce coefficient, compris entre 0 et 1, est un facteur multiplicatif qui s'applique à la variation de charge hydraulique entre deux itérations successives dans chacune des mailles du modèle.

En pratique, selon que le coefficient de sous-relaxation vaille 0.5, 0.1, 0.05 ou 0.01, l'écart de charge entre deux itérations successives est divisé par 2, 10, 20 ou 100. Les oscillations numériques s'en trouvent immédiatement amorties mais le processus de convergence en est *de facto* allongé parce que la progression des charges d'une itération à l'autre est bridée par le coefficient de sous-relaxation.

Par conséquent, **l'état de convergence d'un modèle ne doit pas être évalué par l'écart de charge hydraulique entre deux itérations successives, car ce paramètre est directement affecté par le coefficient de sous-relaxation utilisé. Il ne faut se fier qu'aux indicateurs portant sur le bilan hydraulique des différentes couches du modèle, et plus particulièrement au déséquilibre de bilan hydraulique dans chaque maille, chaque couche, et pour l'ensemble du modèle** (les écarts moyen, médian et maximal sont de bons indicateurs synthétiques).

8.4.3. Privilégier une distribution raisonnée des perméabilités et emmagasinements

Tout au long de la procédure de calage, **il est essentiel de s'assurer que les distributions de perméabilité et d'emmagasinement attribuées aux différentes couches du modèle sont à la fois homogènes, non biaisées et conformes aux données de terrain** :

- **Homogènes** : dans chaque formation, il est recommandé de délimiter des zones calquées sur des entités hydrogéologiques jugées homogènes. Dans la mesure du possible, des valeurs uniformes sont ensuite affectées aux paramètres de calage de ces zones, ce qui permet d'aboutir à un modèle relativement simple en termes de distribution spatiale des paramètres hydrogéologiques. L'expérience montre qu'une telle approche favorise la robustesse du modèle, notamment pour les simulations prévisionnelles ultérieures. Elle s'avère en général préférable à celle qui cherche à restituer précisément la complexité des observations de terrain (mesures piézométriques et/ou transmissivités déduites des pompages d'essai) par des mosaïques contrastées ne s'appuyant pas sur une argumentation hydrogéologique pertinente. En d'autres termes, la sur-paramétrisation nuit à la capacité prédictive d'un modèle (Illustration 17).

En modélisation des écoulements souterrains comme en bien des domaines, « *Il semble que la perfection soit atteinte non quand il n'y a plus rien à ajouter, mais quand il n'y a plus rien à retrancher* » (Saint-Exupéry, Terre des Hommes).

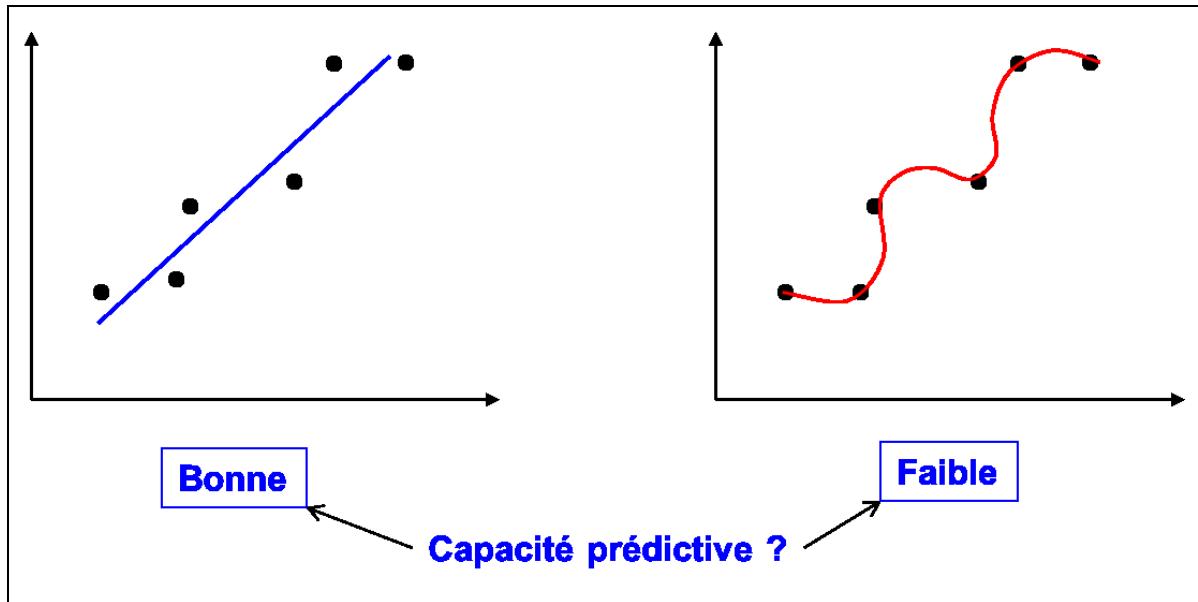


Illustration 17 – La sur-paramétrisation nuit à la capacité prédictive d'un modèle

– **Non biaisées** par les données de terrain prises en compte pour le calage du modèle.

Les fortes disparités de nature et de densité des données de terrain utilisées pour caler un modèle induisent une importante variabilité spatio-temporelle des contraintes de calage. Il en résulte que les paramètres hydrogéologiques obtenus à l'issue du calage sont affectés d'incertitudes très variables selon les secteurs et les périodes considérées.

À titre d'exemple, l'existence d'une dépression piézométrique marquée à l'aplomb d'un champ captant constraint fortement le calage des perméabilités et des emmagasinements dans la zone exploitée. *A contrario*, les secteurs peu investigués ou peu sollicités ne sont guère contraignants pour le calage ; ils laissent donc de grandes marges de manœuvre pour distribuer les paramètres hydrogéologiques. Ces cas de figure contrastés doivent être convenablement pris en compte sous peine de conduire à des résultats erronés, voire incohérents.

Les deux cartes présentées en Illustration 18 et Illustration 19 témoignent de cette analyse. Elles montrent les distributions de perméabilité et d'emmagasinement spécifique obtenues à l'issue d'une première phase de calage d'un modèle couvrant un vaste aquifère régional, au centre duquel est implanté un important champ captant destiné à l'alimentation en eau d'une grande métropole.

Un examen attentif de ces cartes conduit à douter de leur vraisemblance car elles indiquent que le champ captant, d'importance régionale, serait implanté dans une zone particulièrement défavorable, alliant les plus faibles coefficients d'emmagasinement de la région à des perméabilités sensiblement inférieures à celles qui sont rencontrées alentour. Cette conjonction singulièrement fâcheuse ressemble fort à un biais de calage.

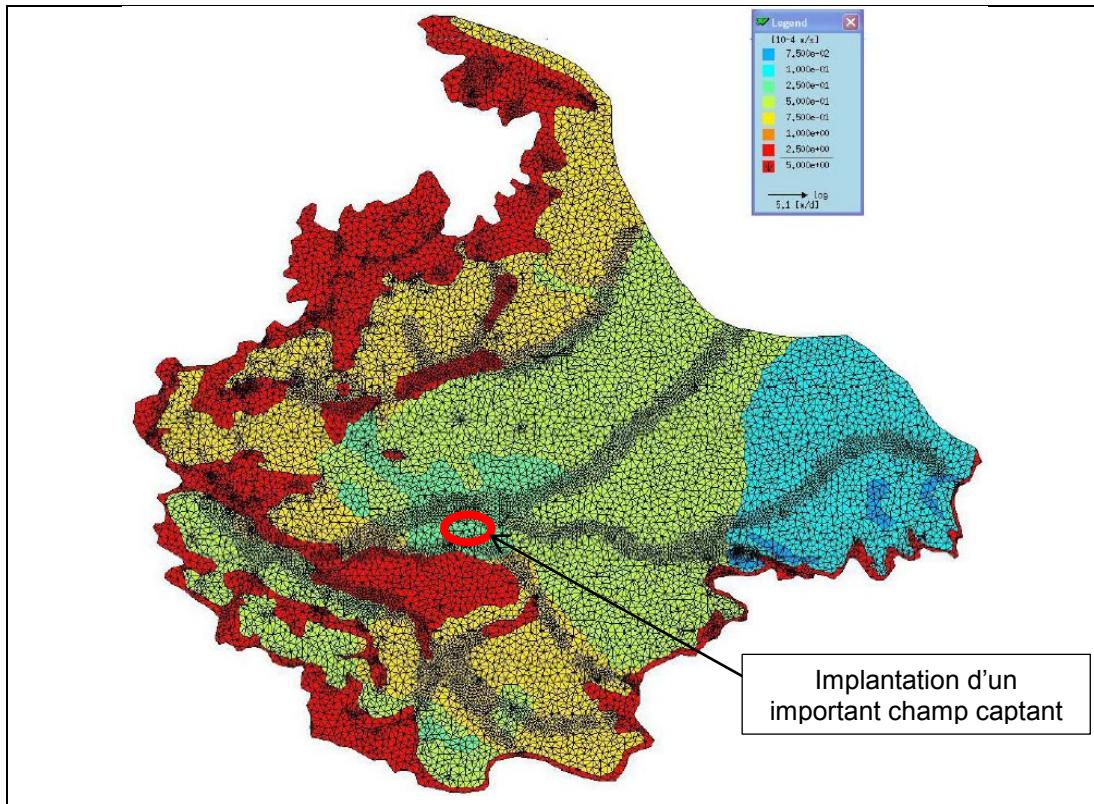


Illustration 18 – Distribution des perméabilités à l'issue d'une 1^{ère} phase de calage (logiciel FEFLOW©)

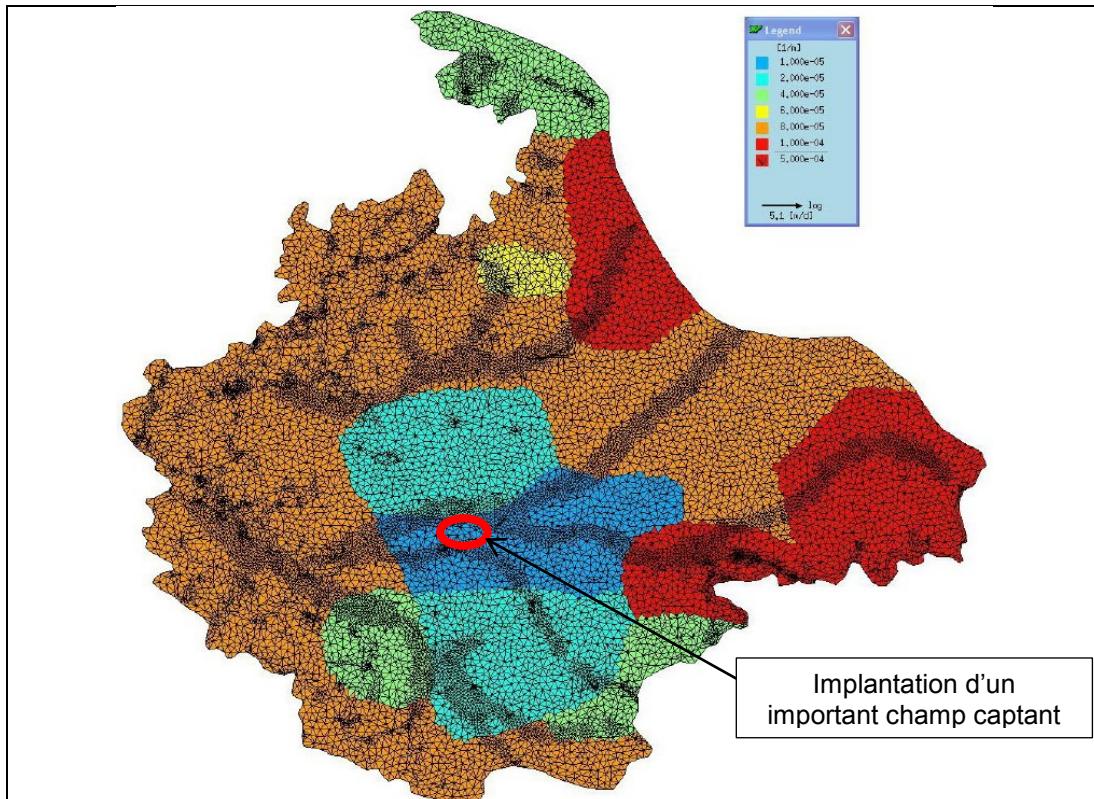


Illustration 19 – Distribution des emmagasinements spécifiques à l'issue d'une 1^{ère} phase de calage

En pratique, si les perméabilités et emmagasinements assignés dans le modèle sont probablement bien calés au droit du champ captant, où la dépression piézométrique induite par les pompages constraint fortement le calage du modèle, le fait que ce secteur apparaisse anormalement peu aquifère par rapport à son environnement conduit à penser que, dans le modèle, les caractéristiques hydrogéologiques sont probablement surévaluées en dehors du champ captant, faute de mesures de terrain suffisamment contraignantes pour bien caler le modèle.

- **Conformes aux mesures de terrain** et aux gammes de valeurs communément admises pour les faciès lithologique concernés (cf. Annexe 2).

8.4.4. Fournir des éléments permettant d’apprécier la qualité du calage et du modèle

En cours et en fin de calage, les éléments de contrôle les plus courants pour apprécier la façon dont le modèle restitue le comportement du système aquifère prennent la forme de diagrammes de dispersion, cartes piézométriques, chroniques de charge, débits sortant aux exutoires, bilans hydrauliques, etc.

Diagrammes de dispersion

Dans la mesure où l’on ne dispose au mieux que d’observations de terrain ponctuelles, relevées dans un réseau de mesure plus ou moins dense, la comparaison la plus objective entre un état simulé et un « état observé » consiste à établir un « diagramme de dispersion », où les valeurs simulées sont reportées en fonction des valeurs observées (Illustration 20).

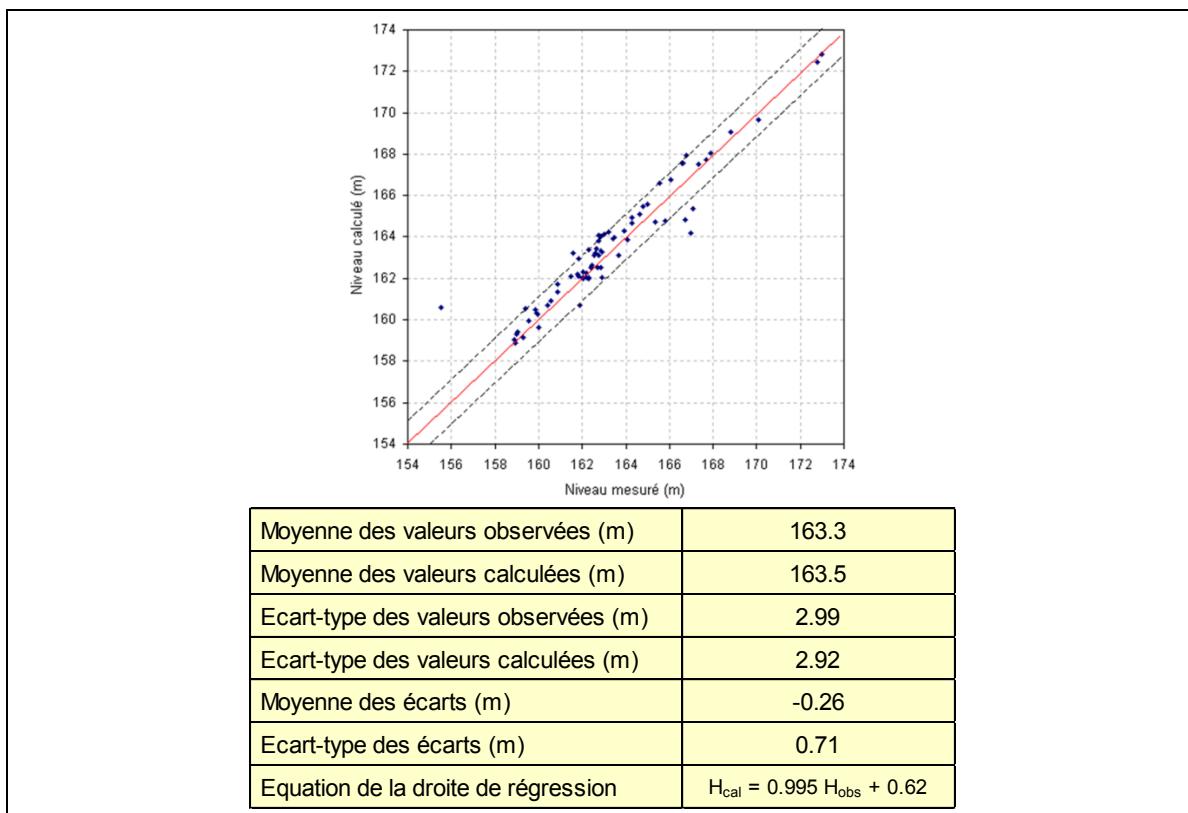


Illustration 20 – Diagramme de dispersion entre charges hydrauliques simulées et mesurées

Un tel diagramme permet de suivre la progression du calage, simulation après simulation, et de repérer très rapidement les biais (sous-estimation ou surestimation systématique, singularités, etc.).

Cartes

Il est courant de citer comme critère de calage d'un modèle d'écoulement souterrain la comparaison des cartes observées sur le terrain et simulées par le modèle pour quelques états de référence, en régime permanent et en régime transitoire.

L'expression « carte observée » est toutefois un abus de langage car la carte n'a nullement été observée ; elle a été tracée par un hydrogéologue sur la base de son expérience et de sa connaissance de la zone d'étude ; il ne s'agit donc que d'une interprétation parmi d'autres, forcément approximative dans les zones peu renseignées par le réseau de mesure.

Ceci étant, même s'il n'existe pas de référence cartographique avérée, il n'en demeure pas moins très instructif de comparer les cartes « simulées » et « observées ». Les informations qui en découlent complètent en effet très utilement les diagrammes de dispersion car, situant géographiquement les points de mesure et les écarts associés, elles peuvent faire apparaître des singularités spatiales, suggérer des causes aux écarts constatés, et aider à l'identification de moyens pour y remédier.

Chroniques

Tous les points de mesure qui sont suivis périodiquement et sont jugés représentatifs du fonctionnement du système aquifère doivent faire l'objet de graphiques permettant de comparer les chroniques simulées aux « chroniques observées » (Illustration 21).

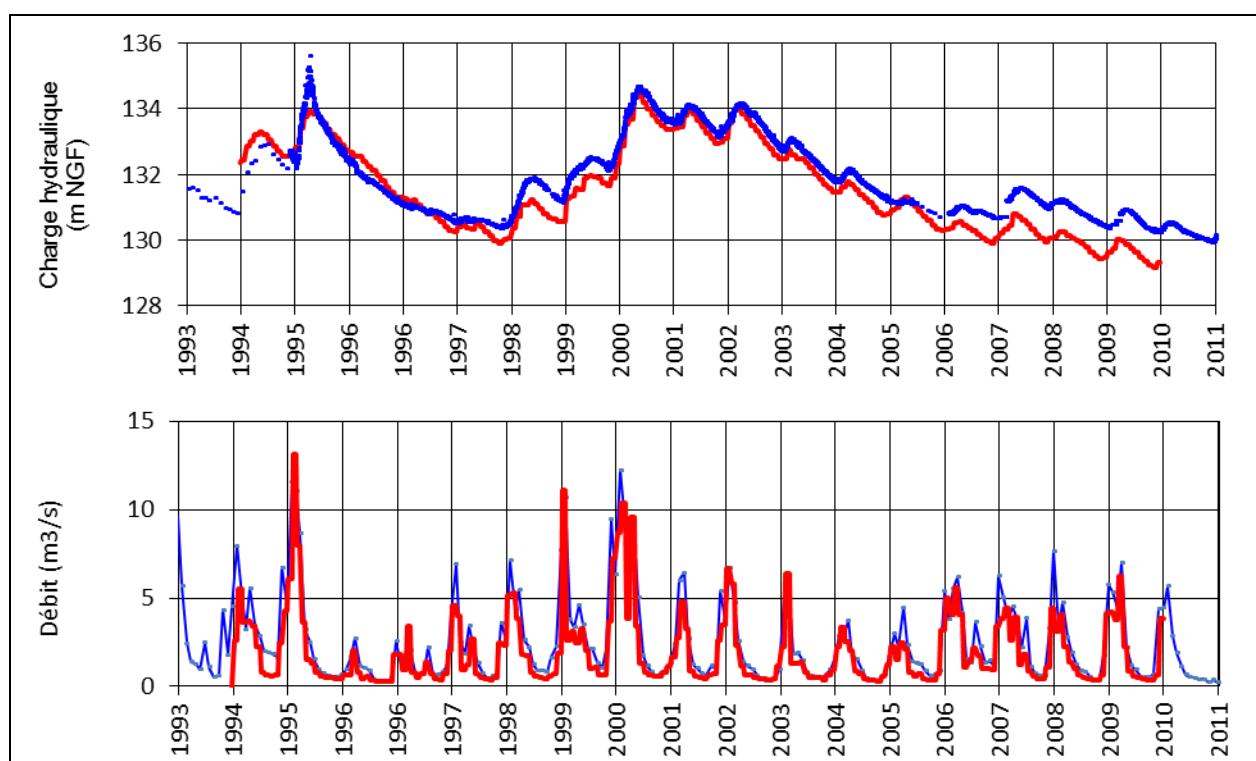


Illustration 21 – Chroniques piézométriques et hydrométriques simulées (rouges) et observées (bleues)

Quelques remarques à ce sujet :

- Lorsque les « chroniques observées » ne reflètent qu'une partie des évolutions du système aquifère parce que la fréquence de mesure n'est pas appropriée à sa dynamique, il peut être préférable de représenter les mesures par des points isolés plutôt que par des points reliés par une ligne brisée, ceci pour ne pas fausser les comparaisons.
- Il est recommandé, autant que possible, d'**utiliser des échelles identiques pour tous les graphiques, aussi bien pour l'axe des temps que pour celui des paramètres analysés, dans le double but de faciliter les comparaisons entre ouvrages et de souligner les différences de comportement d'un ouvrage à l'autre**. Des regroupements par secteurs géographiques et/ou aquifères permettent souvent d'enrichir les analyses individuelles.
- Le calage en régime transitoire vise à reproduire aussi bien les valeurs des variables de calage (niveau piézométrique et/ou débit) que l'amplitude et la dynamique de leurs fluctuations. **Le calage doit donc s'efforcer de restituer les caractéristiques comportementales essentielles que sont la réactivité et l'inertie de la nappe**, fût-ce au prix d'écart piézométriques raisonnables.

Pour mettre en évidence une éventuelle dérive globale des chroniques simulées en fonction du temps, les graphiques de comparaison décrits ci-dessus peuvent être enrichis de quelques traitements complémentaires sur les écarts entre valeurs simulées Hsim et valeurs observées Hobs, via les trois étapes suivantes :

- calcul des écarts individuels Hsim – Hobs, pas de temps par pas de temps et piézomètre par piézomètre ;
- calcul, pas de temps par pas de temps, de la moyenne des écarts individuels sur l'ensemble des points d'observation retenus (= écart moyen), ainsi que de l'écart-type associé ;
- report graphique et analyse de régression pour ces deux séries de valeurs (Illustration 22).

Bilans hydrauliques

Pour quelques états piézométriques de référence, et en particulier pour celui qui correspond au calage en régime permanent, un schéma présentant les différents termes du bilan hydraulique s'avère un élément essentiel pour juger de la crédibilité du modèle.

L'Illustration 23 présente un extrait de bilan hydraulique détaillé pour un modèle multicouche de 8 aquifères (rectangles bleus) et 5 niveaux semi-perméables (rectangles ocre). Les débits correspondant aux différentes composantes du bilan hydraulique sont indiqués pour chaque couche du modèle : recharge, entrées/sorties par les limites latérales, pompage global, stockage/déstockage (en régime transitoire), échanges avec les formations sus- et sous-jacentes.

Un schéma de ce type présente l'intérêt d'offrir une vue synthétique des différentes composantes hydrauliques au sein de chaque formation, des débits échangés entre les formations, des apports par recharge et des sorties par pompage. Il est ainsi possible d'évaluer le poids de chaque composante, d'en apprécier la vraisemblance et de détecter d'éventuelles anomalies.

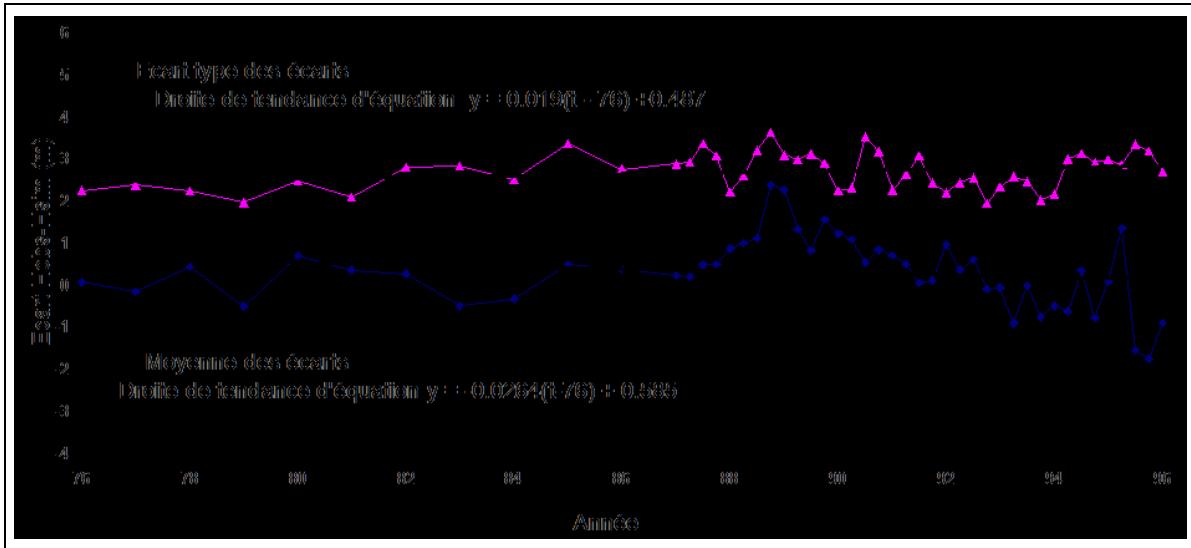


Illustration 22 – Moyenne et écart-type des écarts entre chroniques simulées et observées

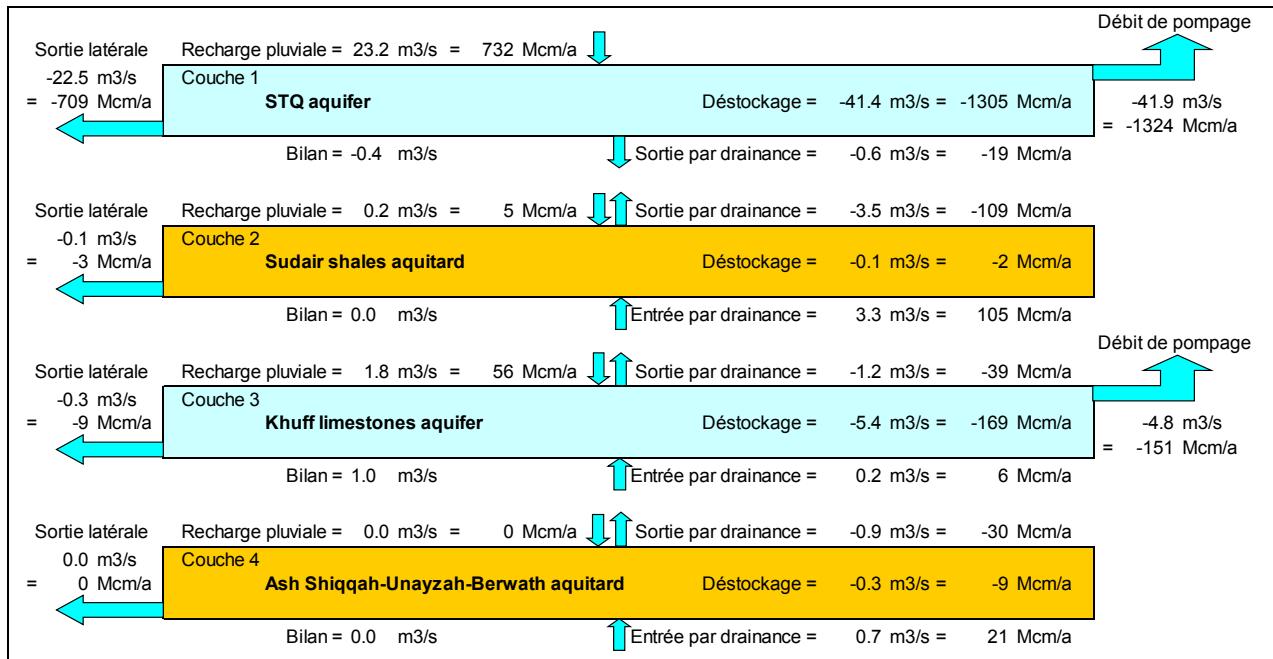


Illustration 23 – Principales composantes du bilan hydraulique d'un modèle multicouche (extrait)

8.4.5. Ajuster les pluies efficaces à la lame d'eau éculée à l'exutoire du bassin hydrographique

On appelle « pluie efficace » la « fraction des précipitations génératrice d'écoulement, immédiat ou différé, superficiel ou souterrain. Comme les précipitations totales, elle s'exprime en hauteur (mm) rapportée à une unité de temps » (définition du CNFSH, Comité National Français des Sciences Hydrologiques). La pluie efficace se décompose schématiquement en ruissellement (ce qui s'écoule à la surface du sol ou en sub-surface) et en infiltration (ce qui percolé vers la nappe).

Il n'existe pas de mesure directe de la pluie efficace ni de formulation analytique permettant de la déterminer de façon rigoureuse, mais cette variable peut être approchée empiriquement par différents algorithmes combinant les chroniques de pluie et d'évapotranspiration à d'autres paramètres comme la capacité de stockage en eau gravitaire du sol.

Si l'on peut considérer (i) qu'il y a une bonne cohérence entre les bassins versants topographique et souterrain, (ii) que le débit souterrain sortant est négligeable par rapport au débit sortant par le réseau hydrographique (hypothèse réaliste pour un aquifère non karstifié), (iii) que sur une longue période les volumes souterrains stockés et déstockés se compensent, alors **la lame d'eau moyenne à l'exutoire du réseau hydrographique constitue un bon indicateur de la pluie efficace moyenne sur l'ensemble du bassin hydrographique, aux consommations (prélevements – restitutions dans le bassin) en eau souterraine près.**

À titre d'exemple, l'Illustration 24 présente les lames d'eau moyennes interannuelles écoulées dans une vingtaine de stations hydrométriques de Basse-Normandie (source : Banque HYDRO). Les valeurs obtenues s'échelonnent entre 112 et 641 mm/an, attestant d'une forte variabilité de la pluie efficace dans cette région. **L'écart constaté sur les pluies efficaces moyennes interannuelles (facteur 5 entre les extrêmes) est beaucoup plus élevé que celui qui affecte les pluies brutes (facteur 2), constat classique soulignant l'erreur commise lorsque la recharge est supposée proportionnelle à la pluie brute.**

À titre indicatif, les prélevements importants effectués dans le bassin hydrographique de la Mue (Illustration 24) ne sont sans doute pas étrangers à la faible lame d'eau écoulée en sortie de ce bassin (la plus faible du groupe). À l'inverse, les lames d'eau très élevées calculées pour les bassins de La Vire et de La Virène conduisent à penser que les bassins souterrains des stations hydrométriques concernées sont plus étendus que les bassins hydrographiques superficiels.

Id_station	Station	Hauteurs	Débits	BV (km ²)	Lame eau (mm)
I4053010	La Mue à Reviers	1970 - 2012	1970 - 2012	96	112
I2021010	La Dives à Beaumais	1969 - 2012	1969 - 2012	282	173
I2051040	La Dives au Mesnil-Mauger	1972 - 1993 - 2012	1972 - 1993 - 2012	638	173
I3612062	La Laize à Fresney-le-Puceux	non disponible	1973 - 2002		135
I2213610	L'Ancre à Cricqueville-en-Auge	1969 - 2012	1969 - 2012		249
I5321510	L'Aure à Maisons [Pont-Fatu]	1981 - 2012	1981 - 2012		249
I1111010	La Touques à Lisieux	non disponible	1982 - 2012		632
I1103010	L'Orbiquet à Beuvillers	1982 - 2012	1982 - 2012		268
I5401510	L'Aure à Maisons [Fosses du Soucy]	non disponible	1981 - 2012		389
I1031010	La Touques à Saint-Martin-de-la-Lieue	1980 - 2012	1980 - 2012		278
I1213110	L'Yvie à Saint-Hymer	1973 - 1977	1970 - 2011		41
I3621010	L'Orne à May-sur-Orne	1983 - 2012	1983 - 2012		2506
I4032010	La Seulles à Tierceville	1971 - 2012	1971 - 2012		308
I5352010	La Drôme à Sully	1981 - 2012	1981 - 2012		245
I1203010	La Calonne aux Autheux-sur-Calonne	1973 - 2012	1970 - 2012		311
I3521020	L'Orne à Thury-Harcourt	1985 - 2012	1985 - 2012		311
I4022010	La Seulles à Juvigny-sur-Seulles	1981 - 2012	1981 - 2012		353
I3712010	L'Odon à Épinay-sur-Odon	1991 - 2012	1991 - 2012		76
I3442310	La Druance à Périgny	1996 - 2012	1968 - 2012		428
I5053010	La Souleuvre à Carville	1969 - 2012	1969 - 2012		115
I5101010	La Vire à Malloué	1991 - 2012	1991 - 2012		469
I5013610	La Virène à Saint-Germain-de-Tallevende-la-Lande-Vaumont	1970 - 2012	1970 - 2012		641

Illustration 24 - Lame d'eau moyenne interannuelle écoulée pour des stations hydrométriques de Basse-Normandie (source : banque HYDRO)

8.4.6. Améliorer le calage du modèle à l'aide de chroniques hydrométriques

Si la lame d'eau moyenne interannuelle s'écoulant à l'exutoire d'un bassin hydrographique fournit un indicateur objectif de la pluie efficace moyenne sur ce bassin (aux prélèvements souterrains près), les chroniques de débit enregistrées aux stations hydrométriques échelonnées le long du réseau hydrographique constituent des références de calage beaucoup plus riches encore, car elles traduisent les variations saisonnières de l'effet cumulé des recharges pluviales et des pompages en nappe, tamponné par l'inertie du système aquifère.

La simulation explicite du réseau hydrographique, telle qu'exposée au chapitre 7.4 « Réseau hydrographique », **apporte en effet des éléments de calage très complémentaires aux chroniques piézométriques classiquement utilisées pour le calage des modèles d'écoulement**. Alors que ces dernières reflètent les fluctuations locales de la charge hydraulique, possiblement biaisées par des singularités hydrogéologiques ponctuelles, les chroniques hydrométriques agrègent, avec un important effet intégrateur et régulateur, les débits d'écoulement apportés par de vastes secteurs géographiques.

Une restitution satisfaisante des chroniques piézométriques et hydrométriques constitue de ce fait un bon indicateur de la représentativité du modèle, au moins dans la plage de fonctionnement balayée pendant la phase de calage en transitoire, sous réserve de vérifier que la répartition entre ruissellement et écoulement souterrain est conforme à l'hydrologie du système (composante souterraine généralement dominante en étiage).

Cette réserve est justifiée par l'exemple présenté en Illustration 25, où sont comparées la chronique de débit mesuré (courbe bleue) et les composantes d'écoulement simulées par un modèle d'écoulement souterrain disposant d'une fonctionnalité de calcul du ruissellement vers la rivière : la courbe magenta correspond au débit de la rivière calculé par le modèle, et la courbe rouge représente la composante souterraine apportée par la nappe à la rivière. La différence entre les courbes magenta et rouge traduit donc la composante « ruissellement + écoulement hypodermique ».

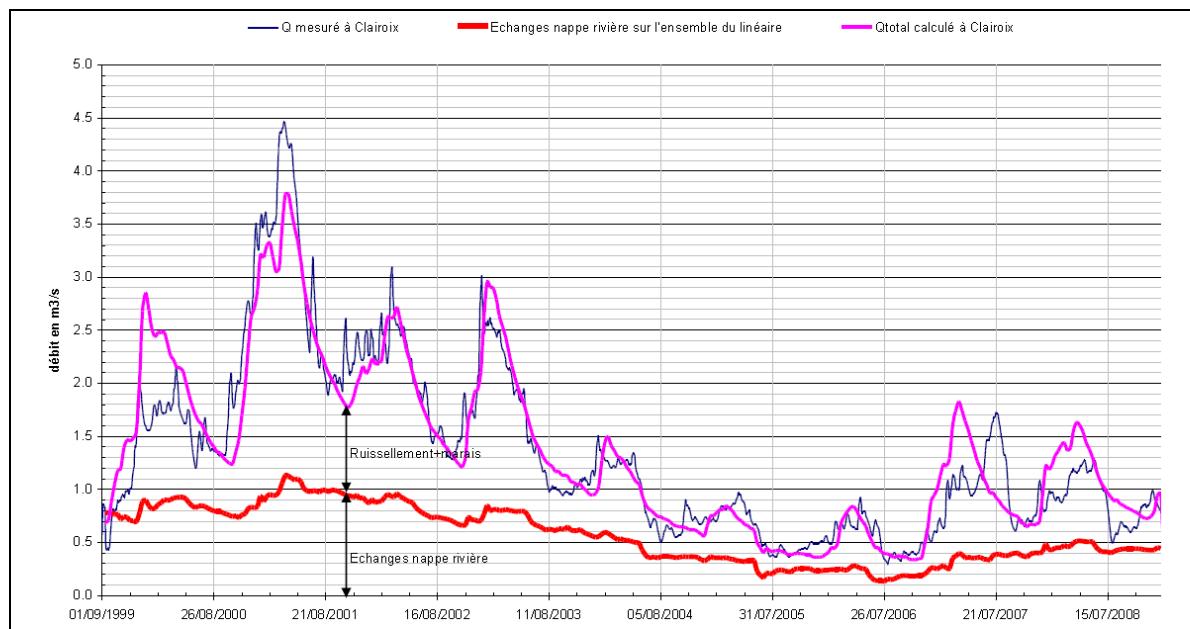


Illustration 25 – Chroniques hydrométriques de la rivière Aronde à la station de Clairoix.
Bonne adéquation entre débits simulés (courbe magenta) et débits mesurés (courbe bleue),
mais déficit d'apport souterrain (courbe rouge) en étiage.

On constate que le débit global de la rivière est globalement assez bien restitué par le modèle (similitude des courbes bleue et magenta), mais on note qu'en période d'étiage la composante « nappe » (courbe rouge) est trop faible, de même ordre que la composante « ruissellement », ce qui n'est pas cohérent avec le fonctionnement hydraulique de ce bassin hydrographique. Le modèle sous-estime donc sensiblement les transferts souterrains au profit de la part ruisselée.

Bien qu'elle ne soit pas précisément définie, la notion de « Volume Prélevable » - fréquemment utilisée pour élaborer des règles de gestion des aquifères conformes aux normes environnementales - mentionne en général l'obligation de respecter un Débit Objectif d'Étiage (DOE) dans quelques tronçons critiques des cours d'eau, avec ou sans référence à une fréquence de retour (4 années sur 5, par exemple). La prise en compte explicite du réseau hydrographique par le logiciel de modélisation constitue dans cette optique un avantage indéniable parce qu'elle donne accès aux débits des cours d'eau simulés par le modèle tout le long du réseau hydrographique, ce qui facilite les comparaisons avec les DOE.

8.4.7. Appliquer une correction piézométrique aux puits de pompage/injection

Les modèles numériques maillés à différences finies permettent de calculer la charge hydraulique moyenne dans chacune des mailles de calcul, c'est-à-dire dans des éléments carrés ou rectangulaires d'une certaine dimension. Dans une zone régulière sans singularité (ni puits de pompage, ni limite à potentiel imposé), la charge simulée diffère peu de la charge en un point situé au centre de la maille.

Lorsqu'une maille représente une portion d'aquifère dans laquelle sont implantés un ou plusieurs puits de pompage, on affecte globalement à la maille du modèle la somme algébrique de tous les débits pompés ou injectés dans ces puits. Dans une telle maille, la charge moyenne simulée peut être très différente de la charge dans le puits pompé (ou l'un des puits pompés). Cette schématisation ne produit en revanche qu'une très faible erreur dans les mailles voisines.

Or, il est très important de bien apprécier la charge hydraulique en un puits pour évaluer correctement le risque de dénoyage des crépines (Illustration 26). On montre que **l'écart entre la charge moyenne simulée dans la maille et la charge dans un puits de pompage est d'autant plus grand que le rapport entre le côté de la maille et le rayon du puits est grand**.

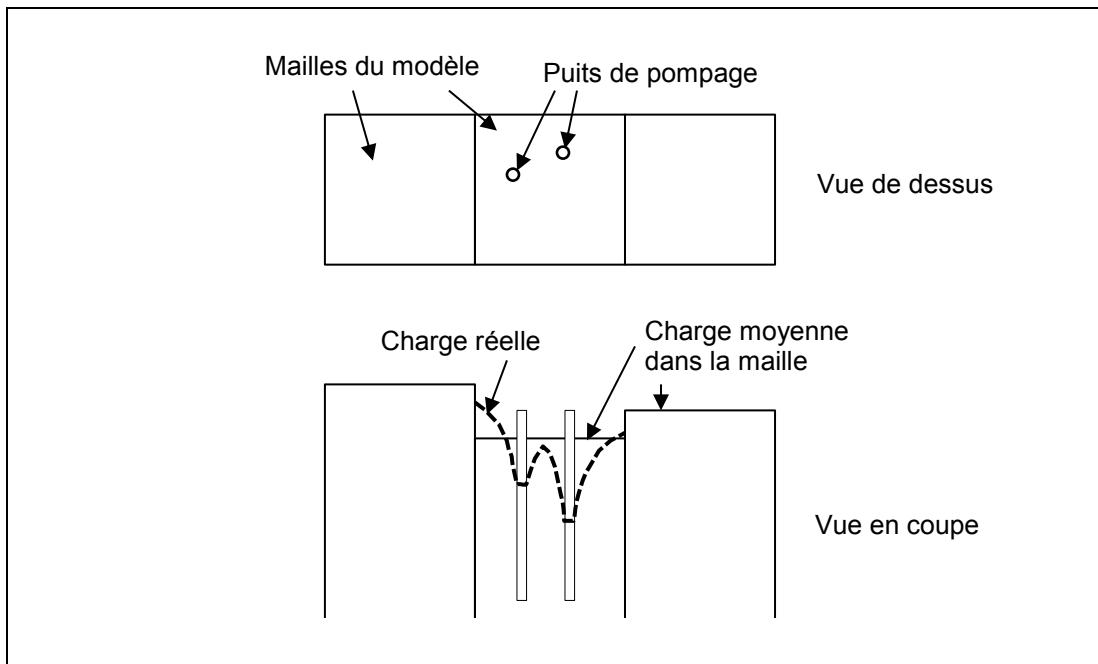


Illustration 26 - Charges hydrauliques simulées et réelles avec des puits de pompage

S'il n'existe qu'un seul puits au centre d'une maille carrée, on montre (Sauty, 1973) qu'il faut soustraire à la charge moyenne de la maille un rabattement additionnel tenant compte du rapport entre le rayon du puits et le côté de la maille du modèle, selon l'expression :

$$COR = \frac{Q}{2\pi T} \left[\ln\left(\frac{a}{r_p}\right) - \left(\frac{\pi}{2}\right) \right]$$

où :

- COR rabattement additionnel (m)
- Q débit pompé (m^3/s)
- r_p rayon du puits (m)
- a côté de la maille (m)
- T transmissivité de la maille (m^2/s)
- Ln logarithme népérien
- $\pi = 3.14159$

À cette première correction, il convient d'en ajouter une seconde correspondant aux pertes de charge singulières associées à l'équipement du puits.

8.4.8. Simuler un « état naturel » sans pompage

Pour la majorité des systèmes aquifères, on ne dispose guère d'observations représentatives d'un état originel « naturel » du système. En effet, ce sont en général des baisses significatives du débit des sources et/ou des niveaux piézométriques, induites par l'accroissement des pompages en nappe, qui font apparaître le besoin de mettre en place un réseau de suivi.

Il n'est donc pas rare que, faute d'avoir observé l'état naturel initial, on utilise comme état de référence pour le calage du modèle en régime permanent un état piézométrique réputé « stabilisé », associé à une distribution spatiale des pompages plus ou moins approximative, supposée elle aussi stabilisée. Le calage du modèle en régime permanent cherche alors à reproduire au mieux la dépression piézométrique induite par les pompages et les champs captants inventoriés. L'état piézométrique ainsi simulé est ensuite utilisé comme point de départ pour le calage en régime transitoire.

Compte tenu des incertitudes attachées aux débits d'exploitation de cet état de référence virtuel, **il est indispensable de simuler un état « naturel » permanent, sans aucun pompage, de façon à s'assurer que le modèle calcule un état piézométrique réaliste où les sources coulent à des débits plausibles et où la nappe ne déborde pas dans des secteurs où aucune source ou zone humide n'était connue auparavant.**

L'état « naturel initial » simulé par le modèle ne peut pas être directement comparé à un état de référence observé – faute d'observations anciennes permettant d'appréhender un tel état – mais il permet souvent d'améliorer la représentativité du modèle. Il peut, par exemple, montrer que le modèle ne restitue pas correctement certaines zones où un artésianisme révolu, ou bien des sources aujourd'hui asséchées, sont mentionnés dans la littérature (p. ex. dans la notice de la carte géologique).

Ce contrôle très simple doit être systématique car il peut facilement révéler une défaillance masquée du modèle. Y remédier permet à la fois de mieux restituer le comportement hydraulique du système aquifère et de démarrer le calage en transitoire sur des bases plus saines.

8.4.9. Utiliser une anisotropie de perméabilité pour les formations en sandwich

Un aquifère présentant une succession de niveaux perméables et semi-perméables peut être schématisé par une couche aquifère associée à un coefficient d'anisotropie entre perméabilité horizontale (K_h) et perméabilité verticale (K_v).

C'est typiquement le cas des aquifères calcaires en bancs, où alternent des niveaux durs, fracturés et perméables, et des horizons marneux ou argileux peu perméables. Dans les formations de ce type, les écoulements se développent parallèlement aux bancs calcaires alors qu'ils sont quasi inexistant dans la direction orthogonale, en raison des obstacles à l'écoulement que constituent les horizons peu perméables successifs. La formation est donc aquifère dans le « plan » des bancs calcaires, et très peu perméable dans la direction orthogonale. Si les bancs calcaires sont subhorizontaux à l'échelle d'une maille de modèle - cas général pour les grands bassins sédimentaires - le fort contraste entre la perméabilité horizontale K_h et la perméabilité verticale K_v peut être simulé via un coefficient d'anisotropie K_v/K_h .

Un comportement hydraulique similaire peut s'observer dans des formations détritiques où alternent dépôts grossiers perméables et dépôts fins très peu perméables (p. ex. limons lacustres varvés). La mise en œuvre d'un coefficient d'anisotropie K_v/K_h permet de traduire le contraste hydraulique entre les couches « horizontales » perméables et la direction « verticale » peu perméable.

8.4.10. Ajuster le coefficient d'anisotropie et la perméabilité des couches semi-perméables à l'aide de profils verticaux de charge

En l'absence quasi systématique de mesures de perméabilité dans les formations non aquifères, l'appréciation des coefficients d'anisotropie Kv/Kh et des perméabilités à affecter aux mailles représentant les aquitards et les aquiclades repose entièrement sur la procédure de calage du modèle, guidée par les comparaisons entre niveaux piézométriques et débits observés et simulés.

Dans les systèmes aquifères multicouches, les échanges verticaux au travers des formations semi-perméables peuvent influencer significativement le comportement hydrodynamique global et la piézométrie des différentes formations. La distribution des perméabilités verticales au sein des formations non aquifères constitue donc un élément de calage important, sans que l'on puisse cependant se référer à des mesures de terrain ; il en résulte une bonne part d'arbitraire et de nombreux tâtonnements avant de parvenir à une solution acceptable.

Pour accélérer le processus de calage et ajuster les perméabilités des milieux non aquifères sur des bases rationnelles, une approche efficace consiste, pour chaque piézomètre du réseau de suivi, à **reporter sur un même graphique la chronique de charge mesurée dans le piézomètre d'observation, la chronique simulée dans la couche représentative de la formation suivie, et les chroniques simulées dans les couches sus- et sous-jacentes**, lorsqu'elles existent.

L'analyse comparative des différentes chroniques peut apporter des indications fort utiles pour ajuster la perméabilité verticale d'une éponte intermédiaire ou le coefficient d'anisotropie Kv/Kh d'une des couches aquifères.

À titre d'exemple, l'Illustration 27 présente trois chroniques piézométriques : la courbe bleue correspond aux mesures effectuées dans un niveau de conglomérats, sables et sables argileux du Miocène recouvrant un aquifère calcaire fissuré du Crétacé. La courbe verte représente les charges hydrauliques simulées dans la formation miocène, et la courbe rouge correspond aux charges simulées dans les calcaires crétacés.

Le graphique présenté à gauche montre les charges simulées avec un coefficient d'anisotropie Kv/Kh égal à 10^{-1} dans les sables argileux miocènes. On constate que les niveaux simulés dans la formation miocène (courbe verte) sont très inférieurs aux niveaux observés (courbe bleue), et qu'ils sont probablement soumis à une influence excessive des niveaux simulés dans les calcaires crétacés (courbe rouge).

Une diminution du coefficient d'anisotropie Kv/Kh assigné aux sables argileux miocènes permet de réduire l'influence du Crétacé sur le Miocène. Une bonne adéquation entre niveaux simulés et observés dans le Miocène est obtenue avec un coefficient d'anisotropie Kv/Kh de 10^{-3} (graphique en partie droite de l'Illustration 27).

Dans cet exemple, l'analyse du profil de charge observé/simulé à l'aplomb d'un piézomètre d'observation permet d'améliorer rapidement le calage local du modèle en intervenant sur la perméabilité verticale, paramètre toujours difficile à cerner.

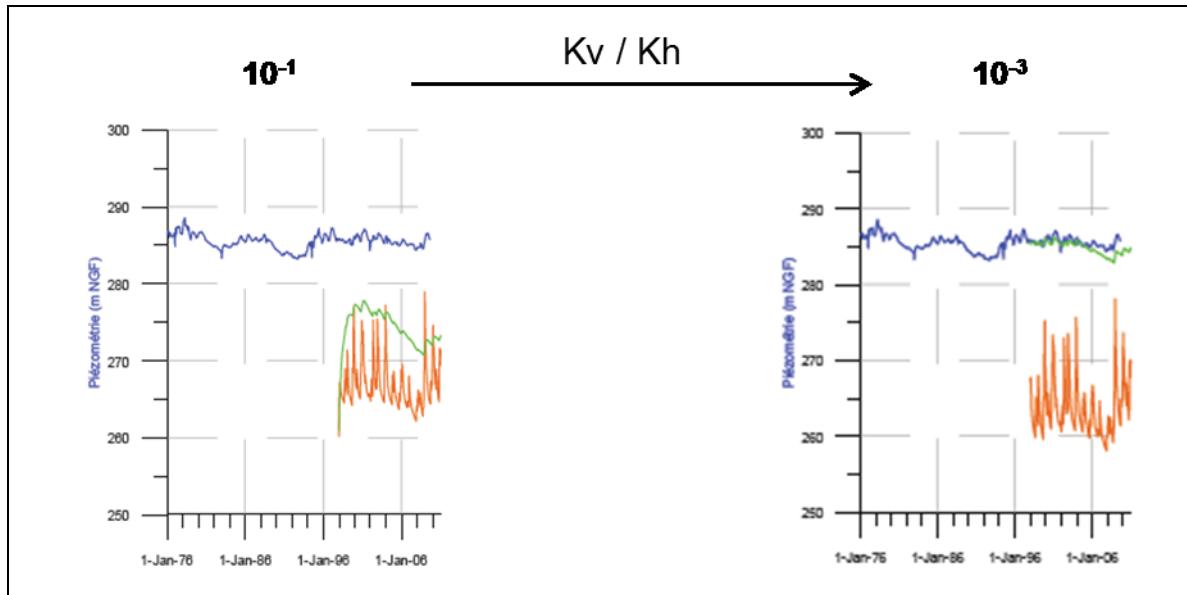


Illustration 27 – Ajustement du coefficient d'anisotropie K_h/K_v guidé par un profil vertical de charge (courbes bleue/verte : niveaux piézométriques mesurés/simulés dans les sables miocènes ; courbe rouge-orangé : charges simulées dans les calcaires crétacés)

8.4.11. S'aider de la grille AURELHY (Météo-France) pour ajuster la distribution spatiale des précipitations, ou mieux, utiliser les données SAFRAN pour calculer la pluie efficace

La méthode d'interpolation AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie) a été développée par Météo-France dans les années 1980 pour construire une carte des précipitations moyennes sur la France métropolitaine à partir des précipitations relevées sur le réseau national des stations pluviométriques. La particularité de la méthode est de contraindre le processus d'interpolation en intégrant l'information « relief » provenant d'un modèle numérique de terrain (M.N.T.) fourni par l'I.G.N. (Institut Géographique National).

L'interpolation se fait en trois étapes :

- Reconnaissance automatique de la liaison statistique existant entre les précipitations et le relief environnant.
- Utilisation optimale de cette liaison statistique aux points où l'on ne dispose pas de valeur mesurée pour la pluviométrie.
- Génération d'une carte nationale des précipitations, intégrant au mieux les effets du relief.

La grille AURELHY, disponible auprès de Météo-France, fournit la pluviométrie moyenne annuelle de la période 1971-2000 (30 ans) au pas de 1 km^2 sur le territoire métropolitain. L'illustration 28 en montre un extrait pour la Basse-Normandie, en superposition avec le réseau hydrographique régional et avec les stations pluviométriques existantes.

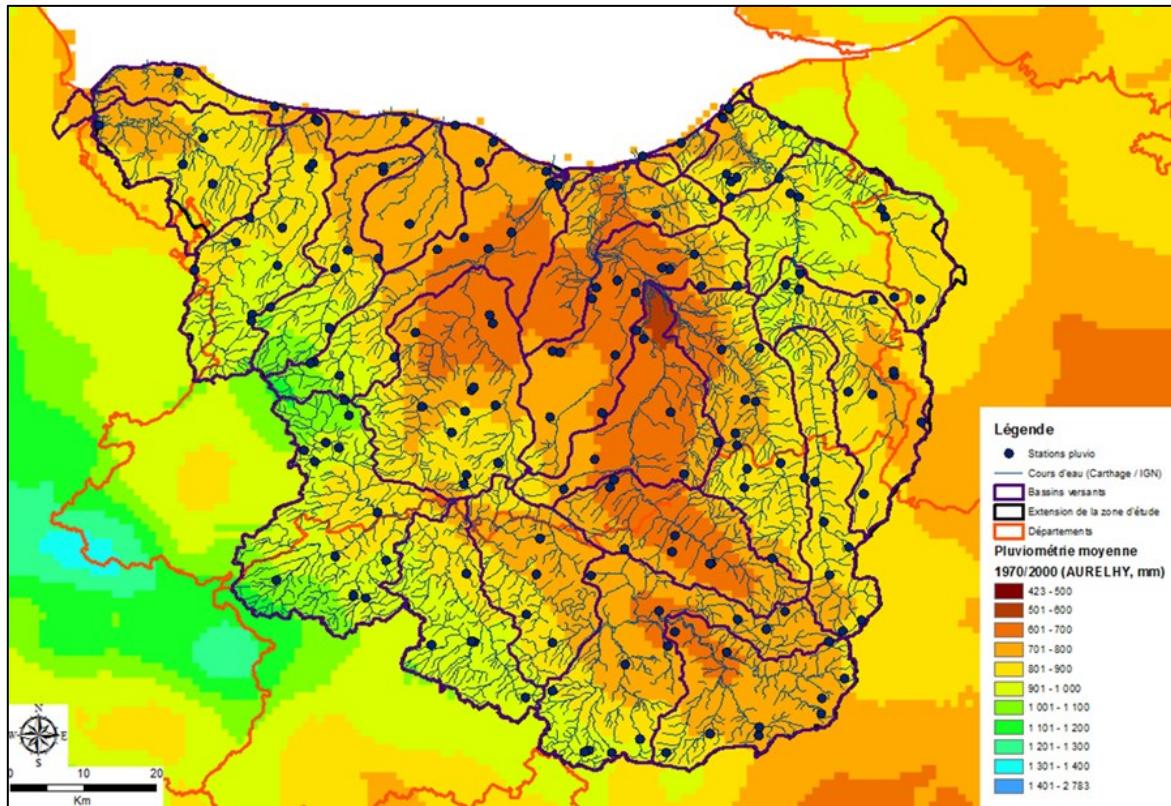


Illustration 28 - Pluviométrie moyenne annuelle selon la grille AURELHY (Météo-France) au pas de 1 km, établie à partir des stations pluviométriques existantes (extrait pour la Basse-Normandie)

L'intérêt de la grille AURELHY est de fournir un découpage spatial en zones de précipitations homogènes, qui peut aider à améliorer la délimitation strictement géométrique des polygones de Thiessen⁷, souvent utilisée pour délimiter les zones de pluie efficace.

La mosaïque SAFRAN, développée par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), fournit une série de paramètres météorologiques - dont les températures et les précipitations solides et liquides - sur une grille de calcul régulière (8 km x 8 km) et à un pas de temps horaire sur le territoire français. Les chroniques d'ETP sont dérivées de ces différents paramètres.

⁷ Méthode des polygones de Thiessen :

Après avoir reporté sur une carte géographique les positions des stations pluviométriques, on trace les segments de droite reliant les stations adjacentes, puis les médiatrices de ces segments. Les intersections de ces médiatrices déterminent des polygones, auxquels on affecte la pluviométrie relevée à la station située à l'intérieur du polygone.

8.4.12. Utiliser les évapotranspirations Penman-Monteith

Les chroniques d'évapotranspiration potentielle (ETP) nécessaires aux calculs de pluie efficace, puis de ruissellement et d'infiltration, sont disponibles auprès de Météo-France ; elles peuvent aussi être calculées, selon différents algorithmes, à partir des chroniques hydroclimatiques. **En règle générale, c'est l'ETP Penman-Monteith qui est utilisée pour le calcul des pluies efficaces.** Les stations météorologiques fournissant cette donnée sont moins nombreuses que les stations pluviométriques comme le montre, pour la Basse-Normandie, l'Illustration 29 en comparaison à l'Illustration 28. La moindre variabilité spatiale de l'ETP justifie sa plus faible densité d'acquisition. Les analyses par double cumul montrent, en général, de bonnes corrélations entre les séries temporelles associées à différentes stations.



Illustration 29 - Stations Météo-France disposant de chroniques d'ETP Penman (Basse-Normandie)

8.4.13. Respecter les spécificités des différents coefficients d'emmagasinement

Comme déjà indiqué, en modélisation des écoulements souterrains on attribue en général deux valeurs de coefficient d'emmagasinement à chaque maille, le logiciel de modélisation sélectionnant automatiquement la valeur appropriée :

- un coefficient d'emmagasinement de nappe libre, utilisé lorsque la maille n'est pas entièrement saturée, et ce quelle que soit la couche du modèle où elle se trouve ;
- un coefficient d'emmagasinement captif spécifique, utilisé lorsque la maille est totalement saturée (charge hydraulique > toit de la maille).

En aquifère captif, il faut impérativement proscrire l'utilisation du coefficient d'emmagasinement captif S ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{m}^{-1}$) et **n'utiliser que le coefficient d'emmagasinement captif spécifique S_s (m^{-1})**, qui seul correspond à la fonction capacitive intrinsèque de l'aquifère (S_s est égal au rapport entre le coefficient d'emmagasinement captif déterminé à partir d'un pompage d'essai et la hauteur saturée de l'aquifère. Autrement dit, le coefficient d'emmagasinement captif spécifique S_s est égal au coefficient d'emmagasinement captif d'une colonne saturée de 1 m^2 de section et 1 m de hauteur).

Pour une formation géologique homogène, l'utilisation du coefficient d'emmagasinement captif spécifique S_s permet d'affecter une valeur uniforme à toute la formation captive. A contrario, si l'on utilise le coefficient d'emmagasinement captif S , il faut moduler sa valeur en fonction de l'épaisseur de la formation considérée.

Lorsqu'une nappe libre est modélisée par le biais de plusieurs couches de mailles, chaque couche doit se voir assigner un coefficient d'emmagasinement libre et un coefficient d'emmagasinement captif spécifique. Le logiciel de modélisation utilise automatiquement le coefficient d'emmagasinement libre pour la couche dans laquelle se situe le niveau piézométrique, et le coefficient d'emmagasinement captif spécifique pour toutes les couches sous-jacentes (ces couches sont totalement saturées puisque le niveau piézométrique se trouve au-dessus de leur toit ; elles sont donc traitées, à juste titre, comme des couches captives).

Concrètement, la nappe n'est libre que dans la couche où se situe la surface libre : dans cette couche, les fluctuations de niveau piézométrique stockent/déstockent un volume d'eau proportionnel au coefficient d'emmagasinement libre, lui-même proche de la porosité du milieu. Les couches sous-jacentes sont captives puisqu'elles sont totalement saturées d'eau : les fluctuations de niveau piézométrique n'y stockent/déstockent qu'un volume d'eau beaucoup plus faible, fonction de la compressibilité de l'eau et de celle de la matrice rocheuse (notion de coefficient d'emmagasinement captif). Il serait erroné de modifier la valeur de l'emmagasinement captif spécifique dans ces couches pour lui attribuer une valeur d'emmagasinement libre (comme on le voit parfois au motif que la nappe est libre) car les volumes stockés/déstockés dans ces couches captives seraient alors très surévalués.

8.4.14. Contrôler les oscillations numériques induites par le dénoyage de mailles

En modélisation des écoulements souterrains, la résolution du système d'équations associé au maillage s'opère en général selon un algorithme itératif, convergeant progressivement vers la solution. Il n'est pas rare, cependant, que le processus rencontre des difficultés de convergence et se mette à osciller, ralentissant voire stoppant l'évolution vers la solution. Ces incidents sont essentiellement le fait de discontinuités numériques, souvent induites par des effets de seuil : dénoyage de mailles, nappe libre devenant captive et inversement, arrêt d'un pompage lorsque le niveau piézométrique descend sous la base de la crête de la pompe, etc.

Dans les paragraphes qui suivent, on traite spécifiquement des dénoyages de mailles, source d'instabilité la plus fréquente (ayant en outre tendance à se propager aux mailles voisines).

Le dénoyage d'une maille peut avoir plusieurs causes : (i) pompage dépassant la productivité hydraulique de la maille, (ii) vidange vers la maille sous-jacente, (iii) drainage excessif vers la/les maille(s) aval, (iv) apport insuffisant par la/les maille(s) amont, (v) dénoyage de la(des) maille(s) amont annulant les apports associés, (vi) recharge pluviale insuffisante, etc.

En pratique, pour lutter efficacement contre les oscillations du processus de convergence, il convient d'abord de localiser les difficultés (quelles mailles sont affectées ?), puis d'en identifier les causes, les remèdes à apporter différant selon la nature du problème.

Les logiciels de modélisation proposent en général divers moyens pour remédier aux phénomènes oscillatoires. On peut les classer en moyens globaux (coefficients de sous-relaxation et algorithmes matriciels divers) et moyens spécifiques adaptés à une configuration particulière : paramétrage des seuils de dénoyage/ennoyage, possibilité de simuler des charges hydrauliques inférieures à la base de la maille, réduction progressive du débit de pompage lorsque l'épaisseur mouillée décroît en-deçà d'un certain seuil, etc. Chacun de ces moyens requiert un apprentissage propre pour obtenir l'effet amortisseur escompté, faute de quoi les oscillations peuvent se trouver amplifiées ou l'évolution des calculs exagérément ralenti.

Si les moyens proposés par le logiciel de modélisation ne viennent pas à bout des difficultés rencontrées, il faut agir directement sur les paramètres hydrogéologiques assignés aux mailles récalcitrantes et/ou aux mailles voisines, après analyse détaillée du contexte hydraulique local.

Par exemple, un cas classique de dénoyage intempestif affecte souvent les mailles situées en limite d'affleurement d'une formation, configuration où plusieurs facteurs défavorables peuvent se conjuguer : faible épaisseur de la nappe, importante pente du substratum, surface d'impluvium réduite limitant les apports hydrauliques par l'amont. Une solution efficace pour supprimer le dénoyage de telles mailles consiste à y réduire significativement les perméabilités horizontale et verticale de façon à limiter le drainage par l'aval et la percolation vers les formations sous-jacentes.

Outre qu'elle est simple à mettre en œuvre, cette solution numérique est cohérente avec la réalité hydrogéologique car la faible épaisseur saturée locale, possiblement discontinue, s'accompagne vraisemblablement d'une épaisseur non saturée significative, beaucoup moins perméable, ce qui réduit les échanges avec les mailles voisines.

8.4.15. Simuler un pseudo-transitoire pour faciliter la convergence en régime permanent

Lorsqu'une simulation hydraulique en régime permanent se heurte à des difficultés de convergence, il peut être intéressant de simuler un régime transitoire de quelques pas de temps en affectant aux différentes formations de très faibles coefficients d'emmagasinement.

Que le régime hydraulique soit permanent ou transitoire, le système d'équations à résoudre est identique, mais en permanent il n'y a ni stockage ni déstockage, ce qui revient à considérer que les coefficients d'emmagasinement sont nuls. La solution hydraulique du régime permanent correspond donc à un exact équilibre entre débits entrants et débits sortants sur l'ensemble du domaine modélisé, équilibre qui peut être très difficile à atteindre en cas d'oscillations numériques. Une solution alternative consiste à augmenter l'inertie hydraulique du système en introduisant un peu de stockage/déstockage via de faibles coefficients d'emmagasinement. On peut ensuite réduire progressivement les coefficients d'emmagasinement pour se rapprocher au plus près de la solution exacte du régime permanent

Le calcul est ainsi plus progressif, et l'évolution vers une solution d'équilibre peut être contrôlée en traçant quelques chroniques piézométriques simulées dans les secteurs critiques. Cette approche graduelle permet parfois de détecter des anomalies/incohérences dans les données, à la source des difficultés rencontrées pour atteindre la solution du régime permanent.

8.4.16. Raisonner en termes de gradients piézométriques pour restituer les charges hydrauliques

Lorsque la densité des observations piézométriques le permet, il est plus efficace d'axer le calage sur la restitution des gradients piézométriques entre points d'observation successifs à l'intérieur d'un tube de courant, que de chercher à rapprocher directement les charges simulées des charges observées aux points de suivi. Un avantage majeur de l'approche par gradients tient en sa stabilité, un différentiel de charge bien restitué entre deux piézomètres voisins n'étant pas significativement remis en question par des modifications ultérieures apportées aux perméabilités alentour.

En procédant ainsi de proche en proche, une bonne adéquation entre charges simulées et charges observées est à peu près garantie lorsque les gradients piézométriques sont bien calés entre les points d'observation successifs d'un même tube de courant.

Pour accélérer le processus de calage, il est recommandé d'appliquer cette démarche en partant des zones où les charges hydrauliques sont quasi fixées par les contraintes assignées au modèle (potentiels imposés, cotes de débordement, drainage par le réseau hydrographique). Le calage des gradients piézométriques se traduit alors très vite par une bonne restitution des charges hydrauliques.

8.4.17. Effectuer des analyses de sensibilité pour améliorer la connaissance du système aquifère

Le calage du modèle est en soi une analyse de sensibilité multiforme au cours de laquelle on s'efforce de trouver de bons compromis pour rapprocher le comportement et la dynamique du modèle des réactions du système aquifère observées sur le terrain.

Ceci étant, en cours ou en fin de calage, une série d'analyses de sensibilité peut se révéler fort utile pour apprécier la réactivité du modèle aux principaux paramètres de calage : perméabilité, emmagasinement, recharge, pompages, etc. Ces analyses de sensibilité peuvent être globales (p. ex., que se passe-t-il si on multiplie ou divise globalement l'un des paramètres par 2 ?) ou sectorielles (impact d'un accroissement du colmatage d'un cours d'eau sur la productivité d'un champ captant proche).

L'analyse des résultats permet de hiérarchiser le rôle des différents paramètres dans le comportement et la dynamique du système aquifère, de faire la part des choses entre facteurs dominants et facteurs secondaires, de cerner leur degré d'autonomie ou de couplage, etc. Cette étape d'analyse peut contribuer significativement à améliorer la connaissance du système aquifère, à cerner les sources d'incertitude dominantes, et à orienter de nouvelles investigations de terrain pour préciser le comportement du système aquifère et améliorer la représentativité du modèle.

9. Validation du modèle

La phase de validation sert à vérifier que le modèle est capable de reproduire le comportement du système aquifère lorsque celui-ci est soumis à un ensemble de sollicitations internes et externes. Concrètement, le modèle calé est utilisé pour simuler une/des séquence(s) de données volontairement mise(s) de côté pendant la phase de calage ; les résultats obtenus (charges, débits) sont ensuite comparés aux observations de terrain.

En pratique, **la principale difficulté de l'opération réside dans le choix de la période d'observation à exclure de la phase de calage**, et ce pour plusieurs raisons :

- Sauf pour les nappes à fluctuations annuelles, la principale contrainte découle de l'inertie du système aquifère. Celle-ci oblige en effet à simuler plusieurs cycles hydrologiques consécutifs – disons n_1 années – pour restituer correctement la dynamique de la nappe. Pour valider le modèle sur une fenêtre de N années, il faut donc non seulement simuler ces N années, mais aussi les n_1 années précédentes pour que leur influence soit bien prise en compte, voire encore n_0 années antérieures pour initialiser le modèle si son état piézométrique initial diffère nettement de celui du système aquifère à la date considérée.
À l'inverse, si l'on exclut du calage un épisode particulier de N années pour l'utiliser à titre de validation, on prive alors la période de calage non seulement de ces N années mais aussi des $n_0 + n_1$ années suivantes (n_0 pour réinitialiser le modèle, n_1 pour restituer l'inertie de la nappe). On peut cependant limiter à N la perte d'années de calage en conservant dans les chroniques d'entrée du modèle les N années mises de côté pour la validation. Ceci revient à utiliser pour le calage l'intégralité des données d'entrée tout en s'abstenant de comparer les résultats de simulation aux observations de terrain pendant les N années de la période de validation.
- Pour limiter l'amputation de la période de calage à la stricte durée nécessaire à l'étape de validation, on place en général celle-ci au début ou à la fin de la période de calage. Aucune de ces deux options n'est toutefois vraiment pertinente car :
 - o **Les périodes les plus anciennes sont souvent trop peu documentées ou insuffisamment contraignantes pour permettre une réelle validation du modèle.** Elles peuvent néanmoins être utilisées pour vérifier que le modèle fournit des résultats en phase avec les connaissances disponibles. Par exemple, lorsque le réseau hydrographique est explicitement modélisé, la simulation d'un long intervalle de temps avant la période de calage permet de s'assurer de la bonne adéquation entre lame d'eau écoulée à l'aval du bassin hydrographique et pluie efficace cumulée sur le bassin (pondérée au *prorata* des aires représentatives des chroniques météorologiques utilisées). Un tel contrôle peut parfois couvrir des configurations hydroclimatiques complémentaires de celles de la période de calage, élargissant ainsi le domaine de mise à l'épreuve du modèle.

- **Les périodes les plus récentes contiennent souvent des informations déterminantes pour le calage du modèle, soit pour le consolider avec des observations inédites, soit pour le confronter à de nouvelles configurations d'écoulement :**
 - La décision d'élaborer un modèle de nappe n'intervient en général que lorsque des difficultés de différentes natures (baisse de nappe, tarissement de puits, assèchement de cours d'eau, épuisement de sources ou, à l'inverse, inondation de sous-sols, débordement de nappe, etc.) perturbent de façon significative l'approvisionnement en eau, les activités économiques, l'environnement, voire la sécurité. Dans de tels contextes, on inclut logiquement la période la plus récente à la fenêtre de calage de façon à pouvoir ensuite tester, comparer et dimensionner quelques dispositifs destinés à remédier aux désordres constatés.
 - De façon similaire, lorsque l'on actualise un modèle d'écoulement existant, c'est en général parce qu'une situation inédite a été récemment observée, ou parce que l'on souhaite prévoir l'impact d'un nouvel aménagement. Dans le premier cas, l'occurrence d'une conjoncture auparavant inconnue conduit à penser que les conditions d'exploitation et/ou de recharge de la nappe ont été inhabituelles au cours de la période concernée ; d'où son intégration à la fenêtre de calage parce qu'elle est présumée porteuse d'informations nouvelles qui élargiront la gamme des configurations couvertes par le calage. Dans le second cas – sauf pour les nappes à fluctuations annuelles – l'inertie du système aquifère oblige à simuler l'état piézométrique courant en exploitant les données les plus récentes.
 - Les réseaux d'observation piézométrique, hydrométrique, météorologique, etc. et la fréquence des mesures qui y sont effectuées ont tendance à s'étoffer au fil du temps, les périodes les plus récentes étant souvent les mieux documentées. De la même façon, les prélèvements agricoles, souvent mal recensés et quantifiés, sont de mieux en mieux inventoriés et suivis. Les années les plus récentes sont donc en principe les mieux documentées et les plus riches en informations et données de terrain contraignantes pour le calage du modèle.

Ces différentes considérations amènent souvent à étendre au maximum la période de calage, au détriment de la période de validation du modèle, afin d'exploiter au mieux les données disponibles et de contraindre le calage du modèle par un éventail aussi large que possible de situations hydrogéologiques contrastées. Les phases de construction et de calage se trouvent de ce fait rarement suivies d'une phase de validation.

Lorsque, malgré les difficultés évoquées, la validation du modèle est clairement individualisée en une étape à part entière du processus de modélisation, les écarts fréquemment constatés entre résultats de simulation et observations de terrain couvrant la période de validation conduisent en général à améliorer aussitôt le calage du modèle dans les secteurs les plus critiques, ce qui revient *de facto* à réintégrer la phase de validation dans la phase de calage.

Bien que non idéale, cette pratique est recevable dans une perspective de recherche du meilleur calage possible avant simulation de scénarios prévisionnels. Ceci étant, pour éviter que les enseignements apportés par une telle phase de validation ne se dissolvent dans la procédure de calage, il est recommandé de les documenter explicitement en exposant et en commentant les résultats obtenus, avant puis après recalage.

Concrètement, les meilleures séquences de validation sont celles qui peuvent être faites lors des actualisations périodiques du modèle commandées par le maître d'ouvrage car elles permettent de comparer les résultats de simulation aux observations de terrain tout au long de la période d'actualisation. Ces mises à jour successives conduisent en général à procéder à quelques retouches sur le modèle et son calage, ce qui contribue à renforcer progressivement la représentativité et la robustesse.

Les mêmes indicateurs que pour le calage sont utilisés pour juger de la qualité du modèle à l'issue de la phase de validation : diagrammes de dispersion, cartes piézométriques, chroniques de charge/débit, bilans hydrauliques, etc. (cf. Ch. 8.4.2).

10. Scénarios prévisionnels

En hydraulique souterraine, les scénarios prévisionnels⁸ prennent en général la forme de simulations transitoires destinées à anticiper le comportement du système aquifère sous l'effet d'une exploitation prolongée des aménagements existants, d'un changement de régime d'une installation particulière, de l'impact d'un nouvel aménagement, de l'évolution des pratiques agricoles et des pompages associés, de séquences hydroclimatiques singulières, etc.

La principale différence entre simulations prévisionnelles et calage transitoire tient au fait qu'avant de simuler les scénarios prévisionnels il faut commencer par élaborer des chroniques hydroclimatiques réalistes, sur la base d'une analyse statistique des observations existantes et d'hypothèses probabilistes en adéquation avec les scénarios à traiter.

Il s'ensuit que les résultats des simulations prévisionnelles doivent être interprétés et utilisés avec discernement, sans perdre de vue l'incertitude fondamentale attachée à la recharge future des nappes. Les précautions d'utilisation doivent être encore accrues lorsque les pompages en nappe sont corrélés au contexte hydroclimatique, cas fréquent pour les pompages agricoles où les années sèches s'accompagnent de prélèvements accentués, aggravant l'effet de recharges déficitaires et amplifiant l'impact des aléas climatiques.

Différentes approches peuvent être utilisées pour constituer une ou plusieurs chroniques hydroclimatiques destinées aux scénarios prévisionnels. Par exemple :

- réutilisation d'une série déjà observée sur la zone d'étude, parfois en inversant sa chronologie ;
- analyse statistique d'une longue série d'observations, sélection d'années moyennes, sèches ou humides de fréquence de retour donnée, puis assemblage d'une chronique d'années moyennes ou de séquences d'années sèches/humides d'occurrence biennale, quinquennale, décennale, etc.
- génération de chroniques de pluie brute et d'évapotranspiration potentielle respectant les propriétés statistiques des chroniques observées sur la zone d'étude.

Pour réduire le poids de l'incertitude hydroclimatique sur les résultats des simulations prévisionnelles, on peut :

- multiplier les simulations en diversifiant les scénarios climatiques, puis analyser statistiquement les résultats obtenus ;
- doubler les simulations, une fois avec l'aménagement étudié, une fois sans, pour un, quelques ou de nombreux scénarios climatiques, puis calculer par différence l'impact de l'aménagement pour chacun des scénarios climatiques, et faire une analyse statistique de ces impacts.

⁸ En matière d'environnement, les simulations prévisionnelles visent, par exemple, à évaluer l'impact d'une pollution accidentelle (extension du panache, distribution des concentrations, délai d'arrivée, temps de séjour), à dimensionner un dispositif d'interception ou de confinement, à évaluer les effets d'apports diffus, etc. En thermique, il peut s'agir de dimensionner un doublet de pompage, à la fois en hydraulique et en thermique, d'optimiser son implantation pour éviter un recyclage thermique entre puits, de prévenir les interférences avec les captages environnants, etc.

La règle intangible de vérification des résultats de simulation doit bien entendu s'appliquer aux simulations prévisionnelles, aussi bien pour s'assurer que les conditions aux limites adoptées pour le calage du modèle restent valides pour chacun des scénarios modélisés que pour détecter d'éventuels dénoyages ou débordements de nappe qui nécessiteraient des mesures correctives.

Idéalement, les scénarios prévisionnels constituent une phase de modélisation autonome, menée avec un modèle dûment calé et validé, sur lequel il n'y a pas lieu de revenir. En pratique, cependant, il n'est pas rare cependant de devoir reprendre le calage à la marge pour améliorer les conditions aux limites, affiner le calage sur quelques secteurs clefs, remédier à une dérive piézométrique qui n'avait pas été perçue sur une période de calage plus courte, etc. Lors de la programmation des travaux de modélisation, il est donc prudent de prévoir quelques jours de recalage du modèle pendant les scénarios prévisionnels.

11. Rapport de modélisation hydrogéologique

Le rapport d'étude qui clôture la modélisation hydrogéologique décrit les différentes étapes du travail effectué, de l'analyse des données d'entrée aux résultats des scénarios prévisionnels, en passant par les étapes de calage, les hypothèses adoptées, les résultats obtenus, les bilans hydrauliques et les connaissances acquises sur le fonctionnement du système aquifère.

À titre indicatif, un sommaire-type de rapport descriptif d'une modélisation hydrogéologique maillée est proposé à l'Annexe 3.

12. Archivage du modèle

L'étude de faisabilité d'un Pôle national de modélisation en hydrogéologie menée entre 2009 et 2011 a clairement montré que l'archivage des modèles de nappe était une préoccupation majeure, tous les interlocuteurs rencontrés soulignant que l'absence actuelle de règles et de procédures conduit à un véritable gaspillage de moyens, freine la capitalisation des connaissances et empêche trop souvent la réutilisation ultérieure des modèles.

Le rapport de faisabilité du Pôle de modélisation concluait :

L'archivage des modèles est jugé comme l'une des tâches prioritaires auxquelles le Pôle de modélisation doit s'atteler dès sa mise en place. Le Pôle doit cependant limiter son action à la définition des règles d'archivage : liste des données/fichiers à archiver, formats, supports, procédures d'archivage, de consultation, de mise à jour, de restauration, etc. Pour que l'archivage des nouveaux modèles devienne effectif, il faut rendre obligatoire, dans les cahiers des charges des appels d'offres publics de modélisation, une clause d'archivage selon les règles et spécifications définies par le Pôle de modélisation.

La conception, l'élaboration et la gestion du dispositif informatique de « bancarisation » des modèles (via SIG et bases de données) devront être assurées par l'un des gestionnaires des bases de données nationales dans le cadre du SIE⁹ (Système d'Information sur l'Eau), sous supervision du Pôle de modélisation.

La pérennité des logiciels de modélisation n'étant pas du tout assurée, il est indispensable que les jeux de données soient stockés dans des formats clairs, accessibles à tous, de préférence en « format texte » pour qu'ils puissent être relus par tous les « éditeurs de texte » (WordPad©, Notepad©, TextPad©, etc.).

Des recommandations sur l'archivage des modèles de nappe, maillés et globaux, sont fournies dans un rapport spécifique du Pôle de Modélisation : « Archivage durable des modèles hydrogéologiques. Principes et recommandations ». Rapport final – Version 1, BRGM/RP-65852-FR, Barthélémy et Wuilleumier, 2016.

⁹ La gouvernance du SIE est organisée au niveau national sous l'autorité de la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Environnement. Elle s'appuie sur l'ONEMA qui en assure la coordination technique nationale, et sur la Délégation de Bassin et l'Agence ou l'Office de l'Eau qui la pilotent dans leur bassin.

13. Bibliographie

- Anderson M.P., Woessner W.W., 1992
Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport.
Academic Press Inc.
- Barthélemy Y. et Seguin J.J., 2011
Pôle national de modélisation en hydrogéologie. Étude de faisabilité.
Rapport BRGM/RP-58605-FR. Avril 2011.
- Barthélemy Y., Buscarlet E., Gomez E., Janjou D., Klinka T., Lasseur E., Le Nindre YM., Wuilleumier A., 2010
Jordan Deep Aquifers Modelling Project. Final report. MWI-BRGM Cooperation.
Rapport BRGM/RC-59281-FR. December 2010.
- Barthélemy Y., Wuilleumier A., 2016
Archivage durable des modèles hydrogéologiques. Principes et recommandations.
BRGM/RP-65852-FR. Mars 2016
- Bear J., Verruijt A., 1987
Modeling Groundwater Flow and Pollution and Advective Transport.
Theory and applications of transport in porous media.
D. Reidel Publishing Company.
- Castany G., Margat J., 1977
Dictionnaire français d'hydrogéologie. BRGM.
- Collin J.J., Rieux J.F., 2004
Les eaux souterraines. Connaissance et Gestion. Éditions Hermann.
- Comon D., Roux J.C., 1978
Atlas hydrogéologique de la Somme. BRGM. Service géologique régional Picardie.
- Comon D., Caous J-Y, 1987
Atlas hydrogéologique de l'Oise. BRGM. Service géologique régional Picardie.
- De Marsily Gh., 1994
Comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants.
École des Mines de Paris. Direction des Études. 1994.
- De Marsily Gh., 2004
Cours d'Hydrogéologie. Université Paris VI. Septembre 2004.
- Dieulin A., 1980
Propagation de pollution dans un aquifère alluvial : l'effet de parcours.
Thèse de Docteur Ingénieur, Université Paris VI et École des Mines de Paris, 1980.
- Domenico P.A., Mifflin M.D., 1965
Water from low-permeability sediments and land subsidence (pp. 563-576)
Water Resources Research. January 1965.

Freeze R.A., Cherry J.A., 1979
Groundwater Hydrology.

Klinka T., Frissant N., Bauer H., Blondel A., Courtois N., Barthélemy Y., Bourgine B., Bodéré G., Seguin JJ, 2011
Estimation des volumes d'eau brute mobilisables dans les gravières de Sarrola-Carcopino en rive gauche de la Gravone, Corse du sud.
Rapport BRGM/RP-59950-FR. Juin 2011.

Lasseur E., Sedan Miegemolle O., 2013
Modélisation géologique des aquifères du bassin de Gabès (Tunisie)
Rapport BRGM/RC-XXXX-FR. Avril 2013.

Ledoux E.
Modélisation du transport des polluants par les eaux souterraines.
Séminaire de programmation. École des Mines de Paris, Centre d'Informatique Géologique.

Sauty J.P., 1973
Calcul du rabattement additionnel dans un puits de pompage.
Note Technique BRGM/EAU n°28.

Schulze-Makuch D., 2005
Longitudinal Dispersivity Data and Implications for Scaling Behavior.
Ground Water, Vol. 43, No. 3, May-June 2005, pp 443-456.

Seguin J.J., 2001
Principes de résolution et solutions analytiques de quelques problèmes simples d'écoulement et de transport de masse en milieux poreux saturés et non saturés.
Note Technique BRGM/AQI 01 AQI 21. Juin 2001.

Seguin J.J., Thiéry D., 2008
Modélisation des hydrosystèmes : une aide à la gestion des ressources en eau.
Rapport BRGM/RP-56974-FR. Décembre 2008.

Seguin J.J., 2013
Présentation de six modèles hydrogéologiques spatialisés dédiés à la gestion de la ressource en eau souterraine, à l'évaluation de risques, à la quantification d'impacts climatiques. Rapport BRGM/RP-62559-FR.

Thiéry D., 2008
Code MARTHE 7.0. Couplage nappe-rivières et nappe-drains. Bilans hydroclimatiques.
Rapport BRGM NT EAU 2004/19.

Vachaud G., 1968
Étude du régime transitoire de l'écoulement de l'eau pendant le drainage des nappes à surface libre.
La Houille Blanche n°5, 1968.

Wuilleumier A., Allanic C., Boudet M., Bourgine B., Croiset N., Machard de Gramont H., Pannet P., Tourlière B., 2013

Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives.

Phase 1 : Collecte des données, synthèse hydrogéologique et construction du modèle géologique.

Rapport BRGM/RP-62002-FR. Mars 2013.

Zheng C., Bennet G.D., 2002

Applied contaminant transport modeling.

2nd Edition - Wiley Interscience

Annexe 1

Sommaire-type d'un rapport de synthèse hydrogéologique préalable à une modélisation maillée d'écoulement souterrain

N.B. 1 :

Le rapport de synthèse hydrogéologique est associé aux fichiers de données destinés à la construction et au calage du modèle numérique.

N.B. 2 :

Les illustrations de cette annexe proviennent de la synthèse hydrogéologique effectuée en préalable à la Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives (rapport BRGM/RP-62002-FR, mars 2013).

1. Cadre et objectifs de la modélisation hydrogéologique

Objectifs possibles : (i) restituer le comportement hydrodynamique du système aquifère, (ii) estimer la part renouvelable des ressources en eau souterraine, (iii) optimiser la gestion des ressources en eau, (iv) évaluer les volumes prélevables, (v) prévoir l'impact hydraulique de nouveaux aménagements, (vi) simuler la migration hydrodispersive d'une pollution, (vii) dimensionner un dispositif de dépollution ou de confinement, (viii) optimiser l'implantation et les caractéristiques d'un doublet géothermique, etc.

2. Contexte géographique

Topographie (Modèle Numérique de Terrain), pentes, bassins versants, réseau hydrographique, IDPR¹⁰ (Illustration 30), etc.

3. Contexte géologique

Los litho-stratigraphique de référence, formations géologiques considérées, extension latérale/verticale, épisodes de sédimentation/érosion/transport induisant des variations de faciès, discontinuités structurales, appréciation qualitative des propriétés aquifères des formations et des accidents structuraux (contexte extensif/compressif), etc.

4. Contexte hydrogéologique

Regroupement des formations géologiques en ensembles aquifères, aquitards¹¹, aquicludes¹², extension latérale/verticale de ces groupements, distribution et débit des sources (Illustration 31), lithologie, propriétés hydrogéologiques (transmissivité T, perméabilité K, emmagasinement S) obtenues par pompages d'essai (Illustration 32 et Illustration 33), zones d'infiltration, zones d'évaporation, rôle hydraulique potentiel des failles (alignement des sources), etc.

5. Contexte hydrologique

Stations hydrométriques (Illustration 34), jaugeages, chroniques de débit (Illustration 35), zones humides, pompages en eau de surface (Illustration 36 à Illustration 37), etc.

¹⁰ La variabilité spatiale de la recharge peut être approchée par la méthode IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux), développée au Brgm et usuellement utilisée pour des contextes géomorphologiques et climatiques très variés.

L'IDPR vise à qualifier le caractère plus ou moins infiltrant des formations géologiques affleurantes. Il repose sur la comparaison d'un réseau hydrographique théorique, constitué à partir de la topographie des terrains, et du réseau hydrographique réel. Un réseau réel moins dense que le réseau théorique dans un secteur donné est en général révélateur d'une forte infiltration et d'un ruissellement réduit dans ce secteur. L'inverse traduit un fort ruissellement et une infiltration réduite.

L'idée qui sous-tend l'IDPR découle du postulat suivant : l'organisation du réseau hydrographique est dépendante de la topographie, des structures géologiques et de la composition lithologique du sous-sol. En milieu homogène, la pente et la morphologie des reliefs guideraient la mise en place des cours d'eau. En milieu naturel, rarement homogène, les variations de la nature du sous-sol ont aussi une influence significative sur l'existence du réseau hydrographique.

¹¹ Aquitard : formation de perméabilité plus faible que celle d'un aquifère, où l'eau ne peut être économiquement produite par forage, mais où l'écoulement est assez significatif pour alimenter les aquifères voisins (Marsily, 1981).

¹² Aquiclude : formation à très faible perméabilité, où prévaut un phénomène d'hydratation plutôt que d'écoulement.

6. Contexte hydroclimatique

Carte de situation des stations de suivi météorologique, tableau des paramètres hydroclimatiques à ces stations (pluies brutes, ETP, pluies efficaces, température, ...), périodes de suivi, comparaisons entre les stations (double cumul), sélection des stations les plus représentatives, carte interpolée des pluies brutes (interpolation par la méthode des polygones de Thiessen ou sur la base de la méthode AURELHY¹³), etc.

7. Contexte hydrochimique (optionnel)

Données ponctuelles disponibles, réseau de suivi de la qualité des eaux, chroniques d'indicateurs qualitatifs, invasion marine, zones salées, zones polluées, sources de pollution, etc.

8. Contexte hydrothermique (optionnel)

Données ponctuelles disponibles, suivi thermique, chroniques de température.

9. Entrées et sorties hydrauliques

- Entrées hydrauliques (hors précipitations) : retours d'irrigation, bassins d'infiltration, échanges nappe-rivière, etc.
- Sorties :
 - Sources, échanges nappe-rivière, zones d'évaporation (salar, chott, sebkhra en contexte aride), etc.
 - Pompages en nappe : usage (AEP, irrigation, industrie), cartes de situation, chroniques de débit, aquifères captés, etc. (Illustration 38 à Illustration 45).

10. Données piézométriques

- Tableau des caractéristiques techniques des piézomètres : profondeur, position crête, formation captée.
- Plan de situation différenciant les nappes suivies (Illustration 46).
- Type de suivi : manuel, capteur/enregistreur, fréquences d'acquisition, période de mesure (+ carte).
- Chroniques piézométriques commentées (Illustration 47, graphiques à joindre en annexe) : familles de comportement, fluctuations annuelles/saisonnières, amplitudes, tendances, impacts perceptibles des pluies/pompages/réseau hydrographique, etc.
- Cartes piézométriques commentées (à joindre en annexe) : directions d'écoulement, gradients, zones d'alimentation, exutoires, relations nappe-rivière, comparaison entre cartes, etc.
- Commentaires sur le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère.

11. Modèle conceptuel d'écoulement

Limites du système aquifère, moteurs du comportement hydrodynamique (zones d'entrées/sorties, connaissances, incertitudes, hypothèses, etc.), évaluation des débits d'entrée/sortie, schéma avec ordre de grandeur des différents flux hydrauliques.

¹³ La méthode d'interpolation AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie) a été développée par Météo-France dans les années 1980 pour construire sur la France une carte des précipitations moyennes au pas de 1 km à partir des données fournies par le réseau des stations pluviométriques.

12. Lignes directrices préconisées pour la modélisation des écoulements souterrains

Période sélectionnée pour les simulations, cartes de référence pour le calage, chroniques des entrées/sorties associées, éléments à restituer, etc.

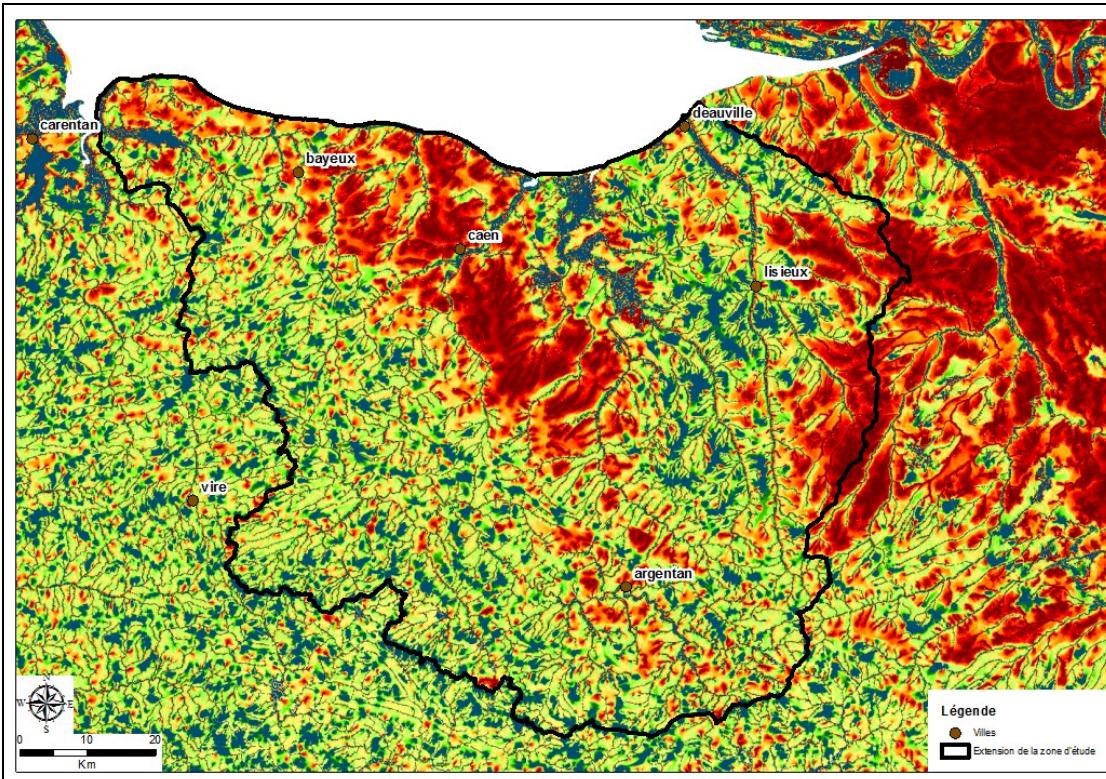


Illustration 30 – Indice de Développement et de Persistence des Réseaux sur la zone d'étude.
L'IDPR est un indice développé par le Brgm pour qualifier le caractère plus ou moins infiltrant des formations géologiques affleurantes. Une valeur faible (rouge sombre) indique une prédominance de l'infiltration, tandis qu'une valeur forte (vert foncé) signe un ruissellement prépondérant.

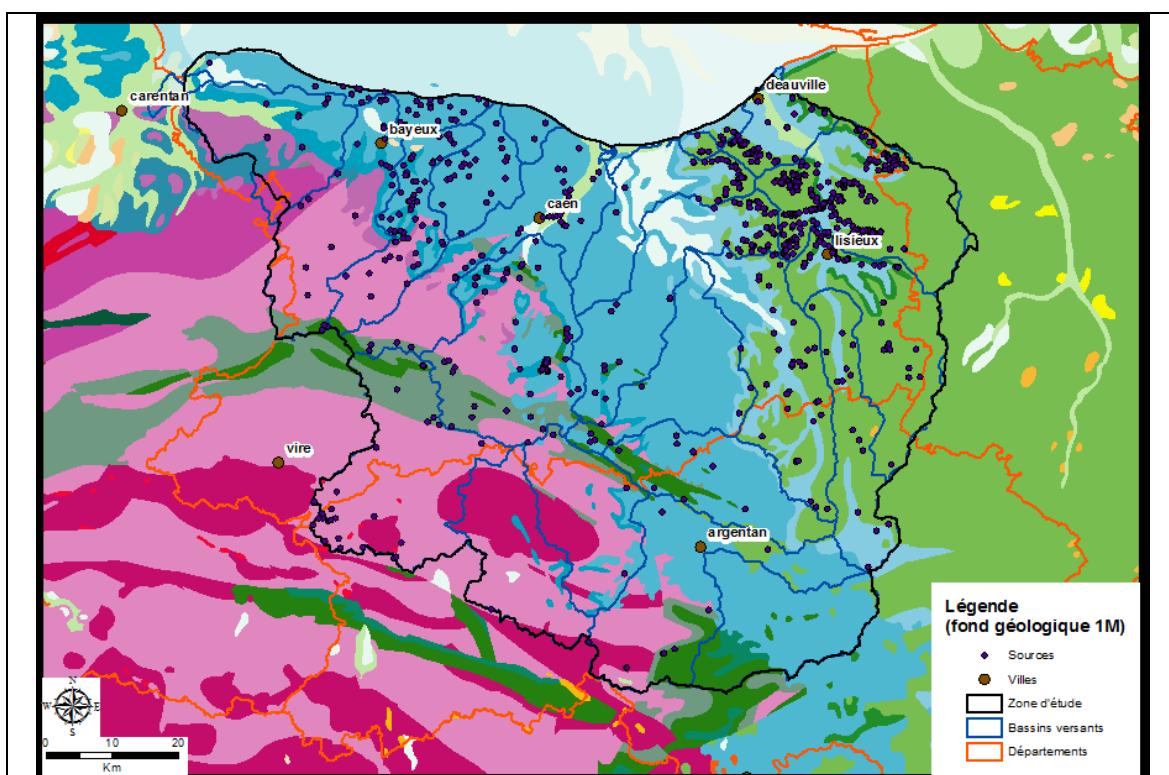


Illustration 31 – Distribution spatiale des sources sur fond géologique

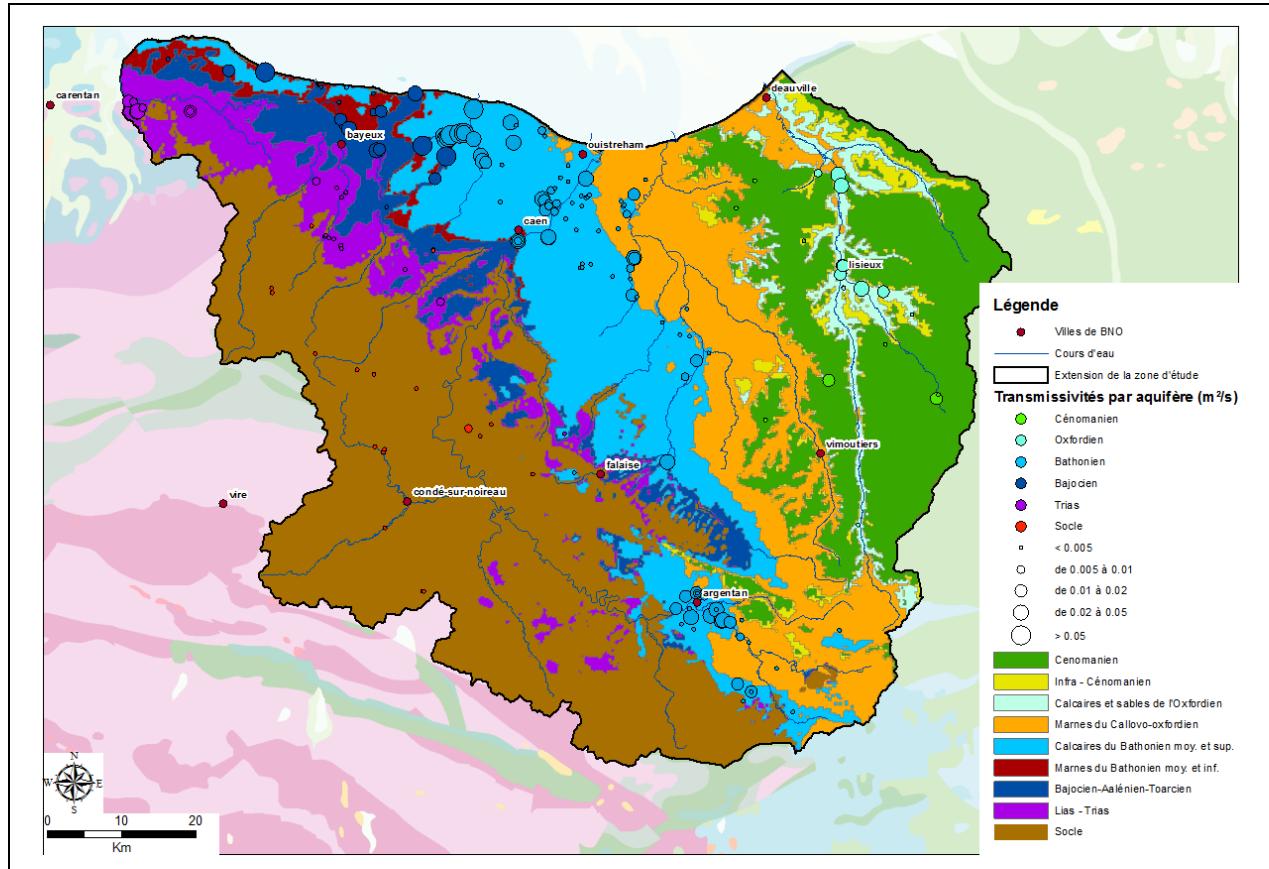


Illustration 32 – Distribution spatiale des valeurs de transmissivité obtenues par pompage d'essai

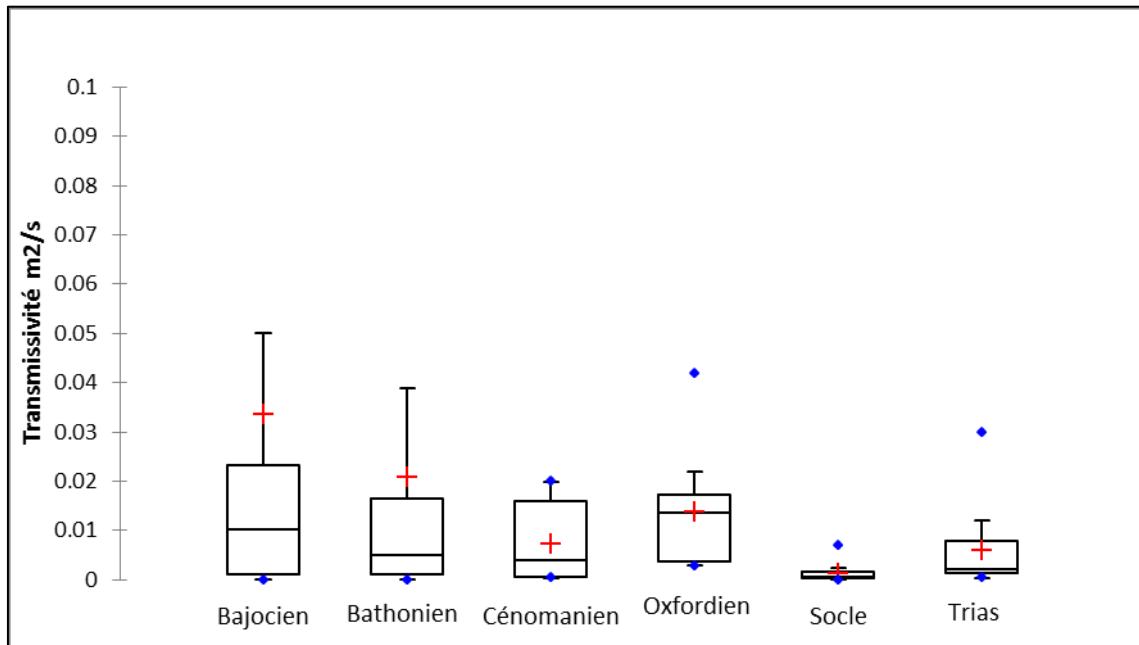


Illustration 33 - Représentation en boîtes à moustaches des transmissivités connues dans les aquifères : la moyenne figure en rouge, la valeur médiane correspond à la barre au milieu de la boîte

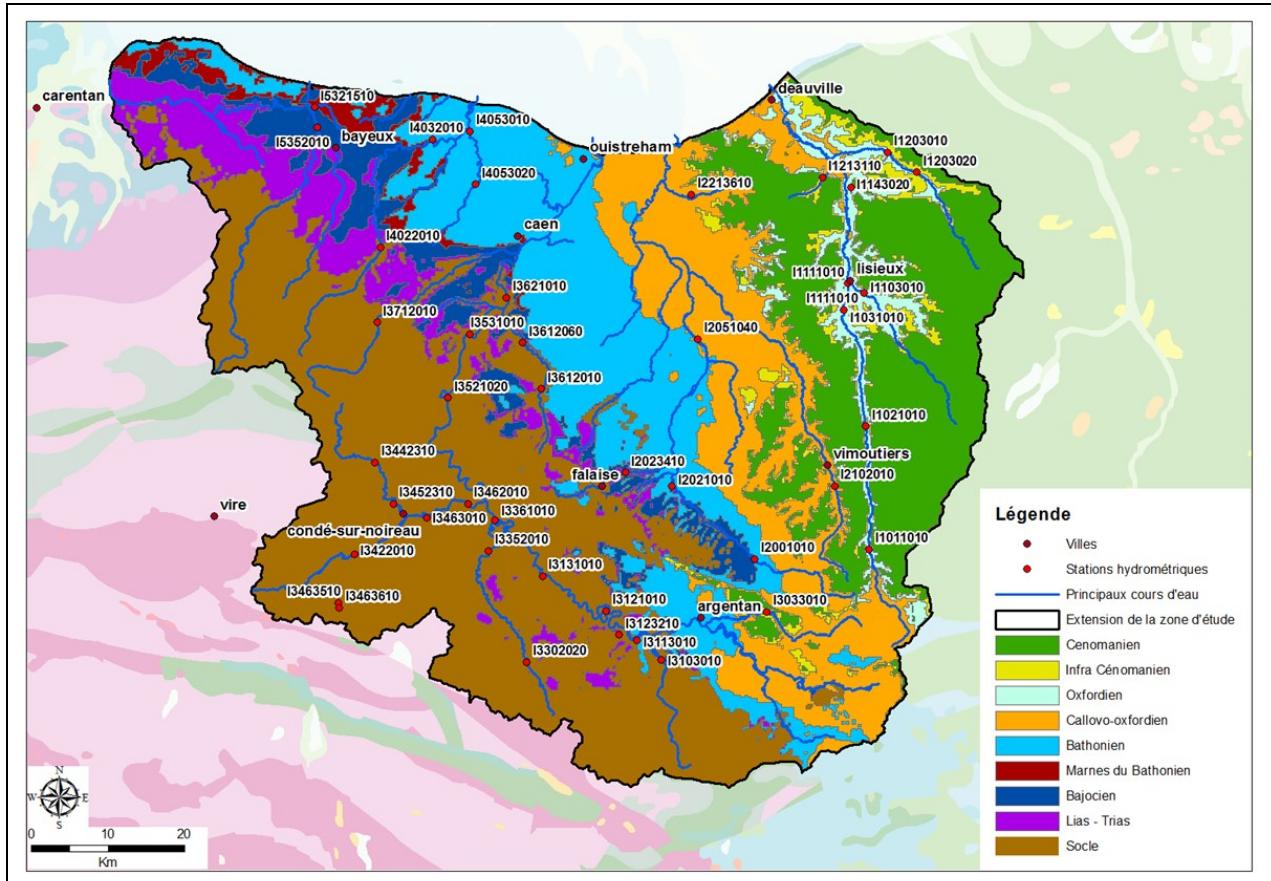


Illustration 34 – Localisation des stations de mesure hydrométrique et fond géologique

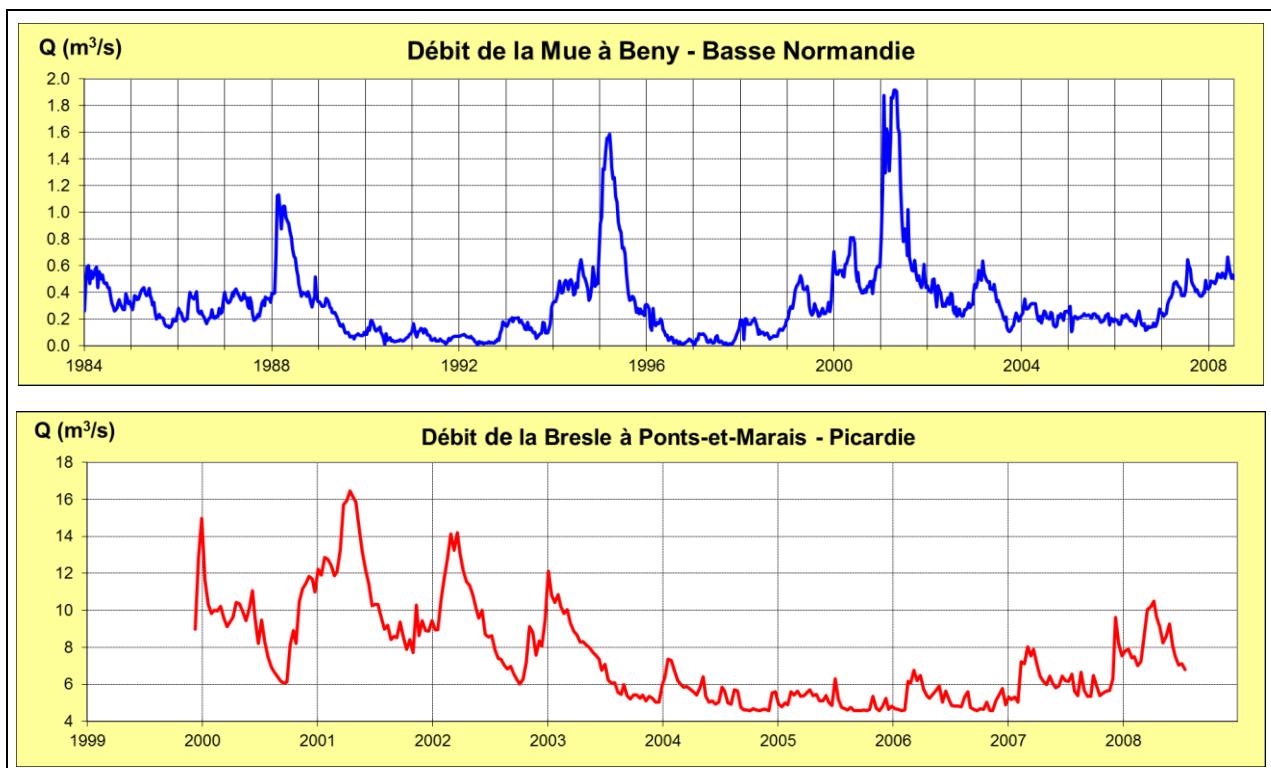


Illustration 35 – Chroniques de débit de cours d'eau

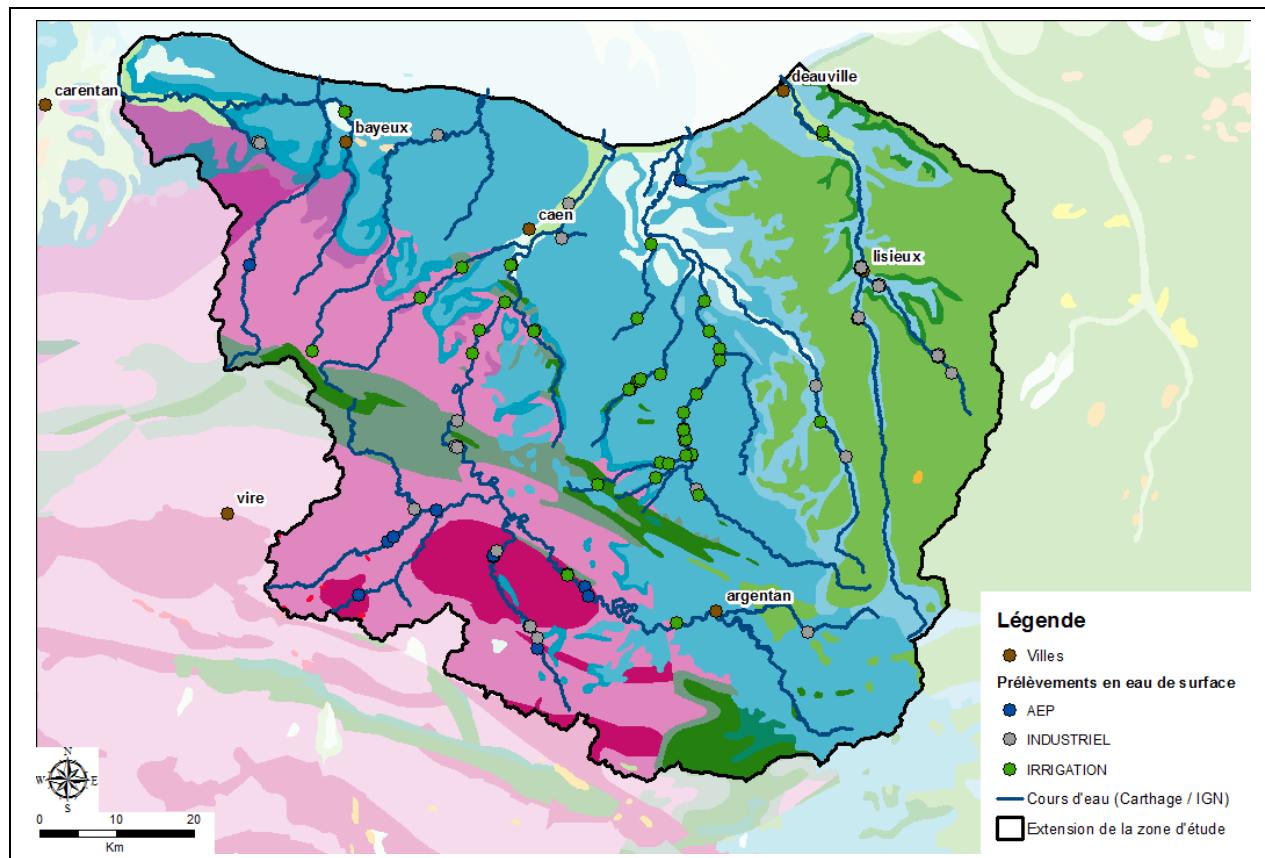


Illustration 36 – Localisation des pompages en eau de surface

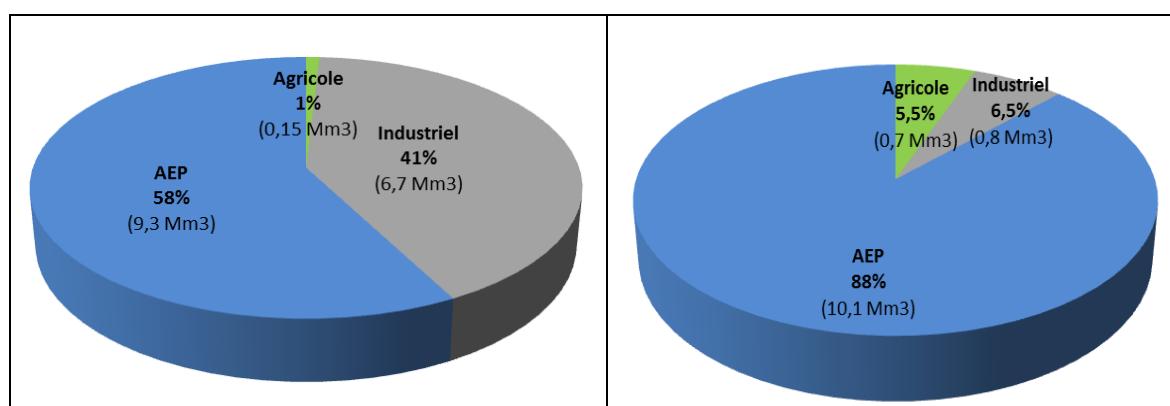


Illustration 37 – Ventilation des volumes pompés dans les eaux de surface,
en 1994 (à gauche) et en 2010 (à droite)

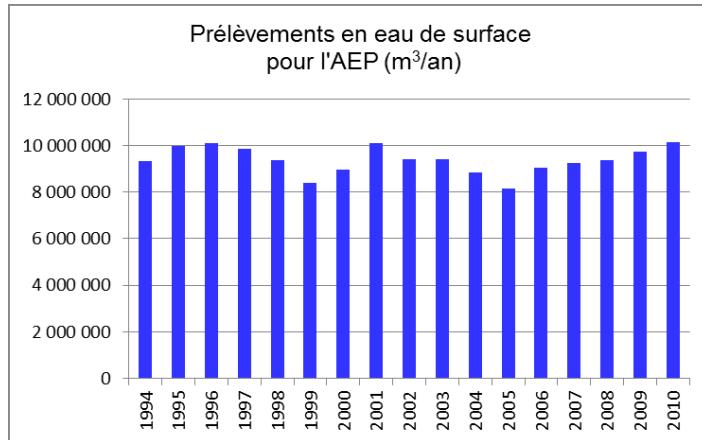


Illustration 38 - Volume annuel prélevé pour l'AEP dans les eaux de surface

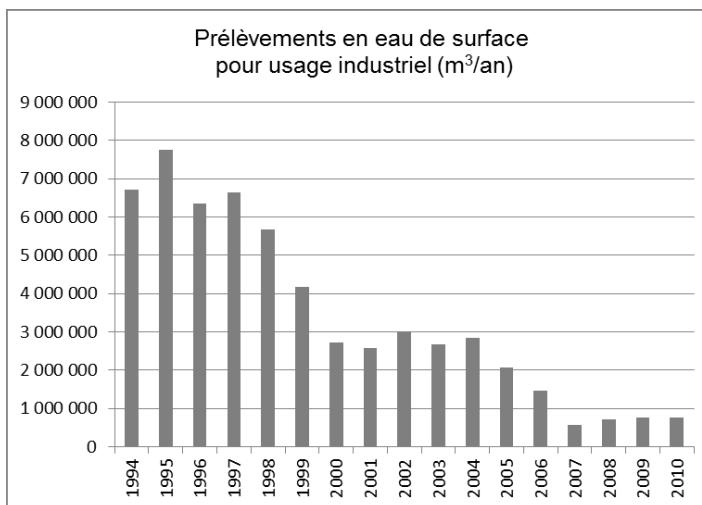


Illustration 39 - Volume annuel prélevé pour l'industrie dans les eaux de surface

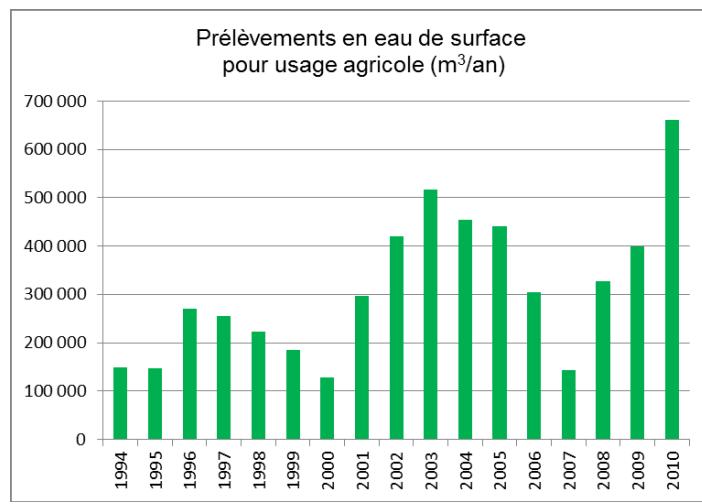


Illustration 40 - Volume annuel prélevé pour l'agriculture dans les eaux de surface

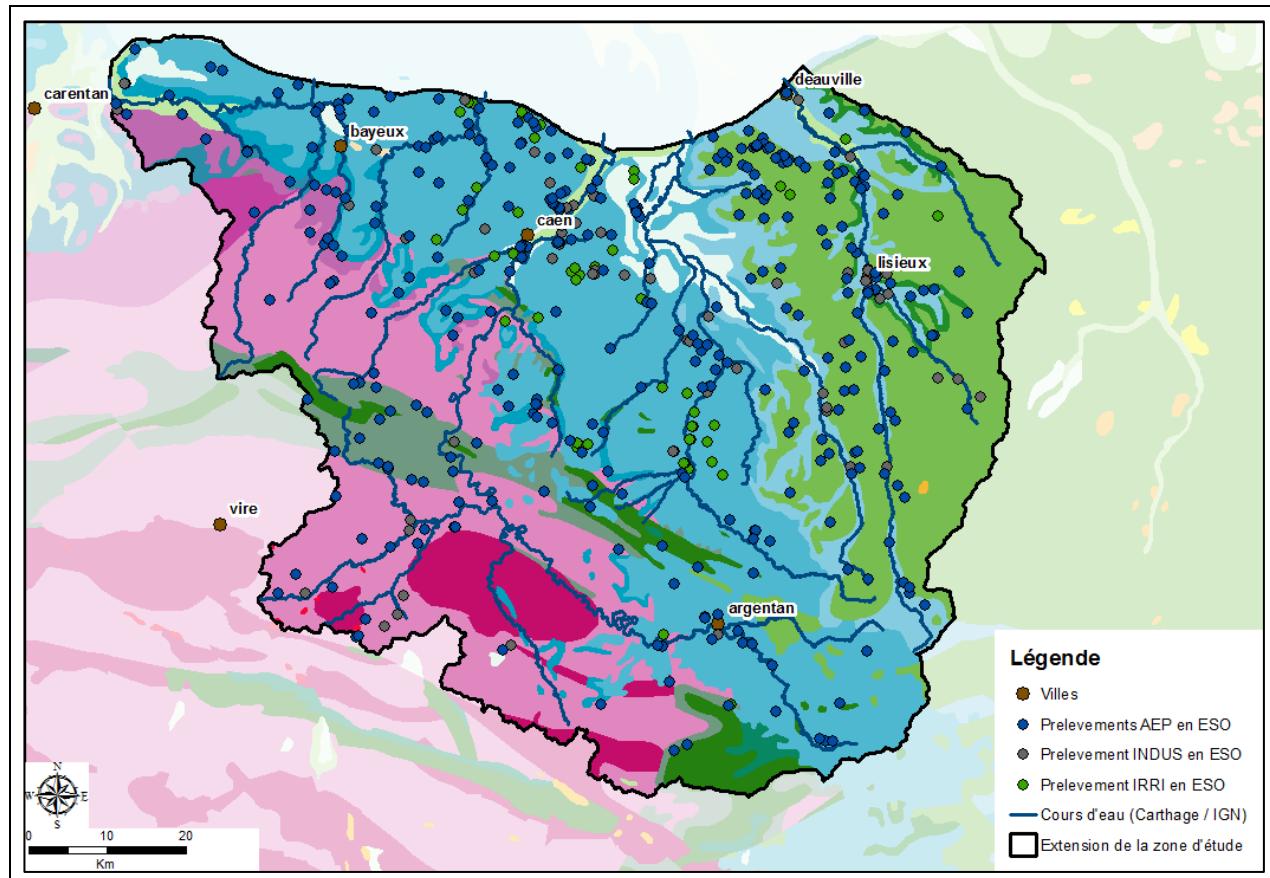


Illustration 41 - Localisation des prélèvements en eau souterraine

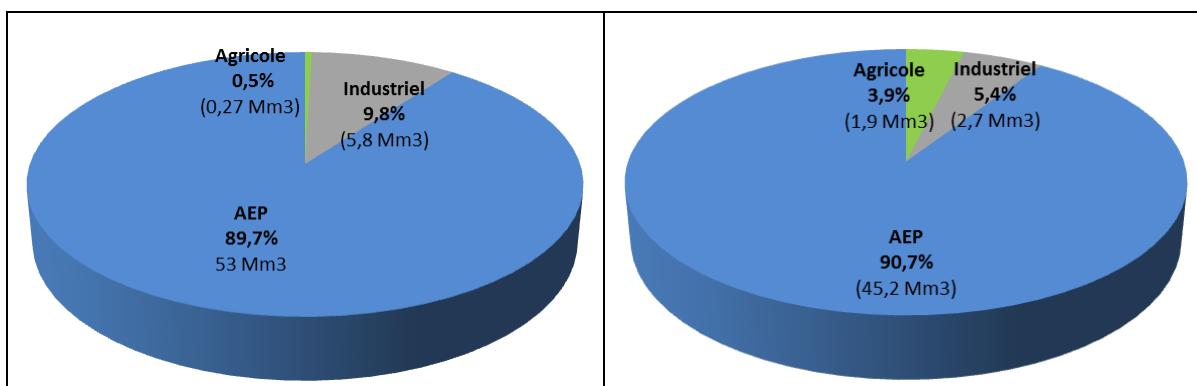


Illustration 42 – Ventilation des pompages en eau souterraine, en 1994 (à gauche) et en 2010 (à droite)

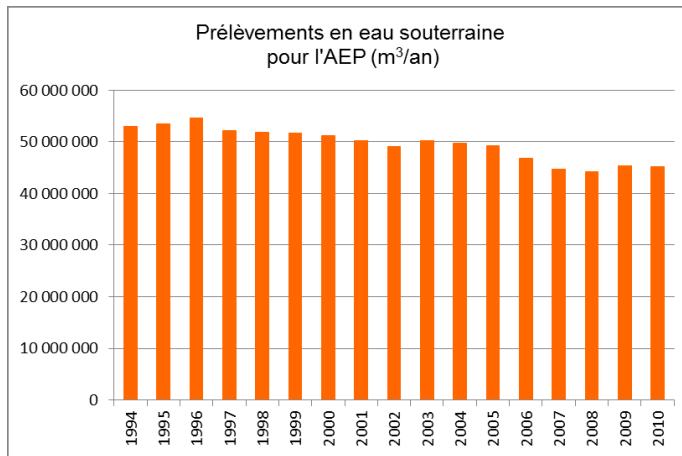


Illustration 43 - Volume annuel prélevé pour l'AEP dans les eaux souterraines

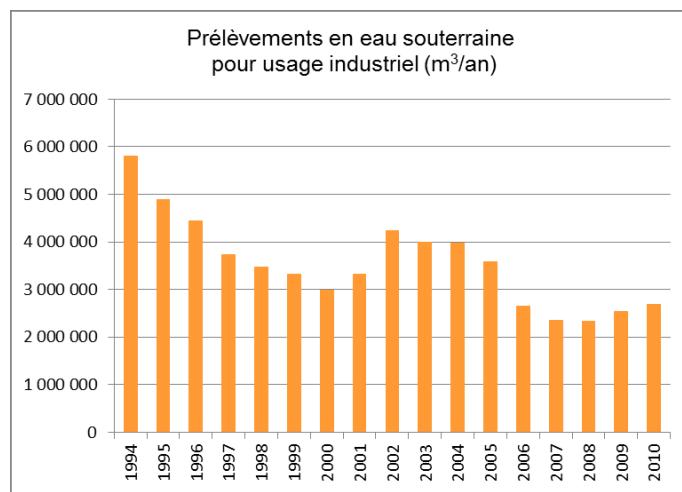


Illustration 44 - Volume annuel prélevé pour l'industrie dans les eaux souterraines

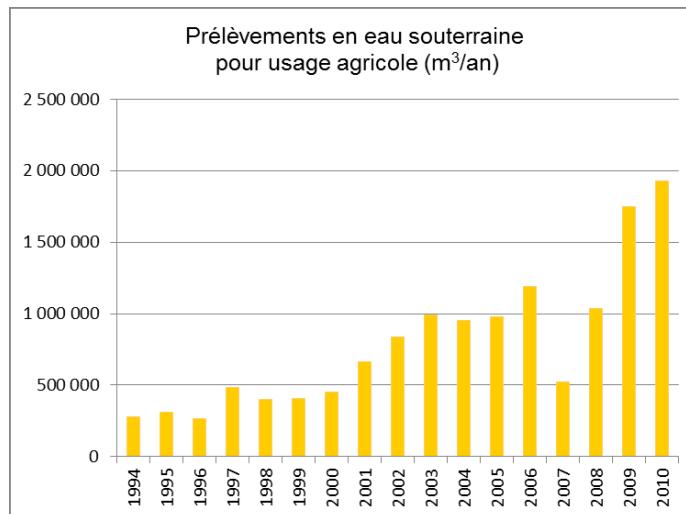


Illustration 45 - Volume annuel prélevé pour l'agriculture dans les eaux souterraines

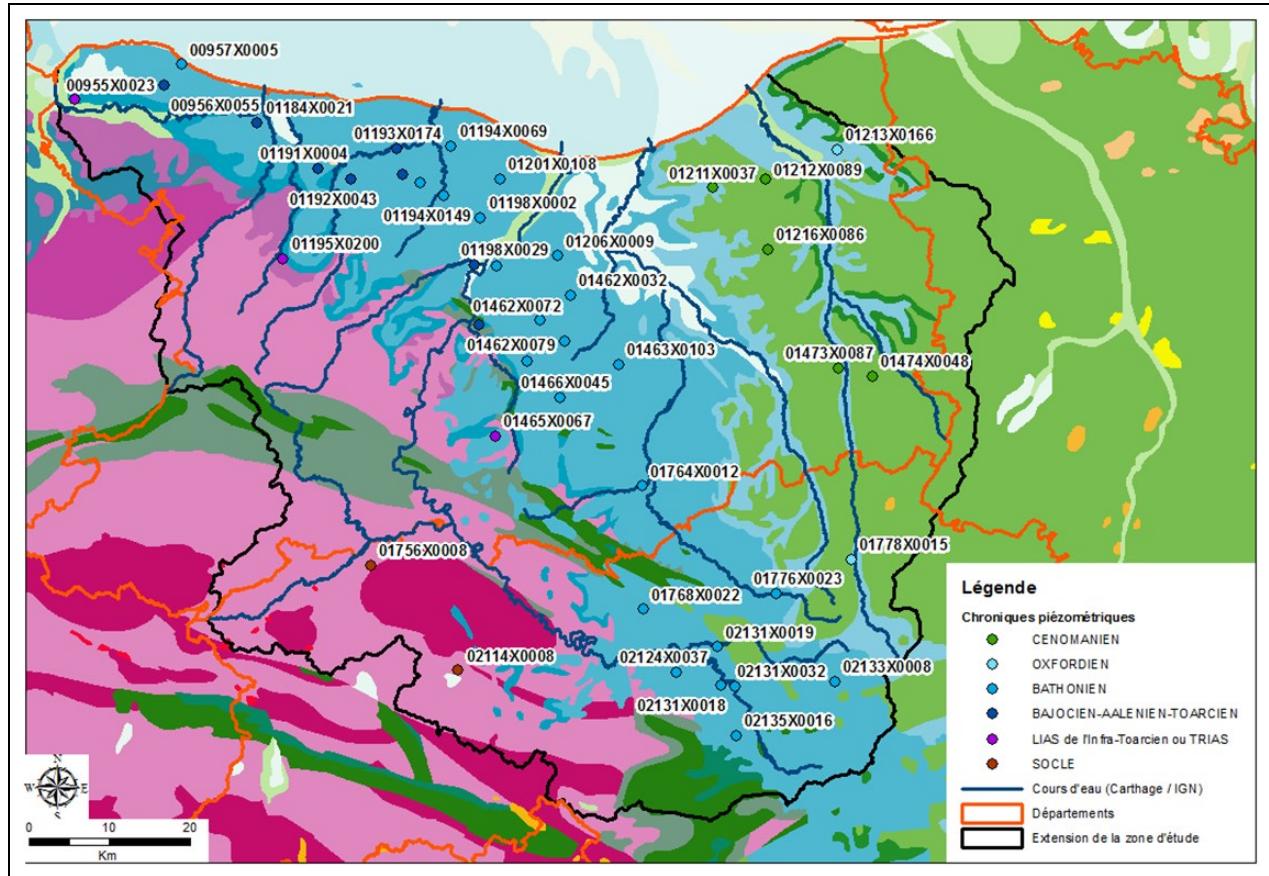


Illustration 46 – Localisation des piézomètres de suivi et fond géologique

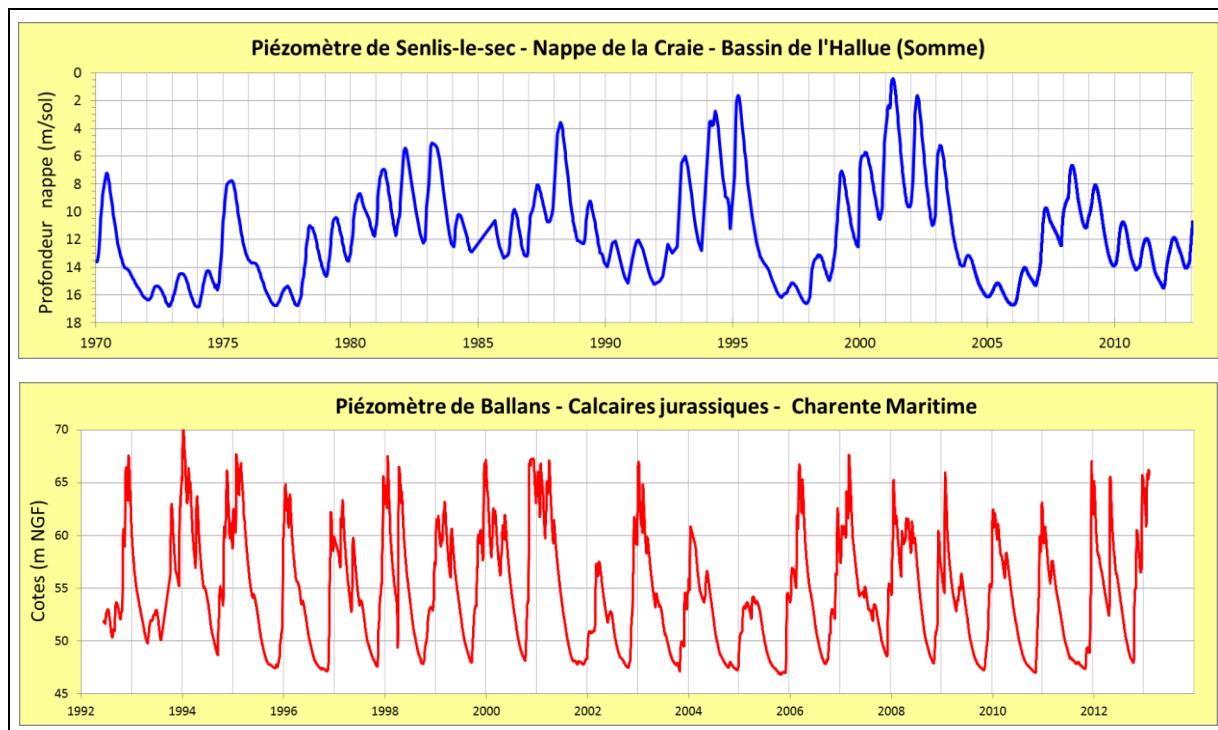


Illustration 47 – Chroniques piézométriques
(fluctuations annuelles avec inertie pluri-annuelle en haut, oscillations annuelles en bas)

Annexe 2

***Valeurs usuelles de perméabilité,
emmagasinement (libre et captif spécifique)
et porosité d'interstices***

Perméabilités

Perméabilité (en m/s)	10^{-9} et moins	10^{-7}	10^{-5}	10^{-3}	10^{-2} et plus
Type de roche (exemple)	Argiles Matrices des roches compactes	Sable très fin et limon	Sable fin et moyen	Alluvions mélangées de sable	Alluvions très grossières
Classement hydrogéologique	Imperméable	Faiblement perméable	Perméable	Perméable	Extrêmement perméable
Comportement	Confinement Rôle de limite	Échanges par drainance	Aquifère médiocre	Bon aquifère	Aquifère exceptionnel
Productivité d'un puits**	Quasi nulle	0,01 l/s ou 860 l/j	1 l/s	100 l/s	1 m ³ /s

* Dans le milieu fissuré, la perméabilité déduite des pompages d'essai est la perméabilité équivalente des fissures recoupées, associées à l'ensemble de la masse rocheuse.

** Exemple : débit théorique d'un puits parfait dans un aquifère de 20 mètres d'épaisseur, exploité avec un rabattement de 5 mètres.

Illustration 48 - Perméabilité des roches (Collin, 2004)

Selon Gh. de Marsily (2004) :

Les grès ont une perméabilité analogue à celle des sables, si'ils ne sont pas trop cimentés. On a mesuré, par exemple, 10^{-5} m/s pour les grès vosgiens en Lorraine¹⁴. Si les grès sont à ciment calcaire, celui-ci peut être dissous du fait de la présence de CO₂ dans les eaux, augmentant ainsi la perméabilité.

Pour les roches à porosité de fissure, les valeurs de conductivité hydraulique sont extrêmement variables, mais généralement inférieures à celles des milieux détritiques. Il faut noter que la perméabilité peut varier, dans une roche fissurée, avec la contrainte par fermeture des microfissures. Inversement, une pression élevée dans une fissure peut « ouvrir » la fissure et augmenter la perméabilité.

Il faut mettre à part le cas des calcaires et des roches solubles où la dissolution par le CO₂ élargit les fissures dans la mesure où l'eau circule. On aboutit très rapidement à des vides importants où circulent de véritables rivières souterraines : c'est le régime karstique.

La perméabilité des aquifères de craie est étroitement corrélée à la densité de fissuration, laquelle est en général très dépendante du contexte géomorphologique. Dans la notice de l'Atlas hydrogéologique de la Somme, Roux et Comon notent (1978) :

La répartition de la fissuration dans la craie séno-turonienne de la vallée de la Somme est hétérogène : géographiquement, elle est très faible sous les plateaux, bonne sous les vallées sèches et souvent forte sous les vallées humides ; verticalement elle diminue progressivement avec la profondeur pour finir par disparaître totalement. La craie compacte et imperméable forme alors pratiquement le substratum de la craie fissurée.

¹⁴ Une perméabilité similaire de 10^{-5} m/s est également attribuée aux immenses réservoirs de grès cambro-ordovicien de la péninsule arabique (Brgm, 2008).

Dans l'atlas hydrogéologique de l'Oise, Caous et Comon précisent (1987) :

Les valeurs de la transmissivité vont de $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ au centre des plateaux (débits spécifiques de l'ordre de $1 \text{ m}^3/\text{h/m}$), à $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ en vallées sèches (10 à $50 \text{ m}^3/\text{h/m}$) et $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ en vallées humides (plus de $100 \text{ m}^3/\text{h/m}$).

Coefficients d'emmagasinement

En hydrogéologie, la fonction capacitive des formations est rendue par la notion de coefficient d'emmagasinement. En modélisation des écoulements souterrains, on attribue en général deux valeurs de coefficient d'emmagasinement à chaque maille, une valeur d'emmagasinement libre et une valeur d'emmagasinement captif spécifique, le logiciel de modélisation sélectionnant de lui-même la valeur appropriée selon que la nappe est libre ou captive dans la maille considérée.

Le coefficient d'emmagasinement, noté S ($\text{m}^3 \times \text{m}^{-2} \times \text{m}^{-1} \Rightarrow$ sans dimension), est le rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface d'un aquifère à la variation de charge hydraulique correspondante, sans référence au temps (ou en un temps illimité) (Castany, Margat, 1977).

Coefficient d'emmagasinement libre

Pour les nappes libres, le coefficient d'emmagasinement est assimilable à la porosité dite « efficace » (Castany, 1961), ou « effective » (Tison, 1951), ou encore « porosité de drainage » (Vachaud, 1968) : c'est le rapport entre le volume d'eau qu'un milieu poreux saturé peut libérer sous l'effet d'un drainage gravitaire complet, à son volume total :

$$S = V_{\text{Eau gravitaire}} / V_{\text{Milieu poreux}}$$

Les ordres de grandeur communément admis pour les coefficients d'emmagasinement libre sont les suivants :

Graviers	25 %
Sable et graviers	20 %
Sable fin, grès	10 %
Graviers argileux/cimentés	5 %
Sables argileux	2 - 4 %
Argile	< 1 %
Craie (porosité totale supérieure à 40 %)	2 à 5 %

Coefficient d'emmagasinement captif spécifique

Dans un aquifère captif, le coefficient d'emmagasinement est lié à la compressibilité et à l'expansibilité de l'eau et du milieu aquifère, ainsi qu'à l'épaisseur de la couche aquifère. Pour cette raison, **il ne faut utiliser que la notion de coefficient d'emmagasinement captif spécifique (noté S_s , dimension m^{-1})**, paramètre intrinsèque de la formation égal au rapport entre le coefficient d'emmagasinement et la hauteur aquifère saturée ($S_s=S/e$, où e désigne l'épaisseur de la formation saturée).

En milieu captif, le coefficient d'emmagasinement spécifique s'exprime en fonction de la porosité totale (Φ), de la masse volumique du fluide de formation (ρ), de l'accélération de la pesanteur (g), et des compressibilités de la matrice rocheuse (C_m) et du fluide de formation (C_f) :

$$S_s = \rho g [\Phi C_f + (1-\Phi) C_m]$$

Selon les échelles de compressibilité de Freeze & Cherry (1979) et Domenico & Lifflin (1965), la compressibilité de la matrice rocheuse couvre une large gamme :

argiles plastiques	10^{-7} à 10^{-6} Pa $^{-1}$ (ou m 2 /N ou m 3 /m 3 /Pa),
argiles consolidées	10^{-8} à 10^{-7} Pa $^{-1}$,
sables, graviers, grès	10^{-10} à 10^{-7} Pa $^{-1}$,
roches fissurées	10^{-10} à 10^{-8} Pa $^{-1}$
roches compactes	10^{-11} à 10^{-9} Pa $^{-1}$,
eau pure	$4.6 \cdot 10^{-10}$ Pa $^{-1}$ à 20°C et $4.4 \cdot 10^{-10}$ Pa $^{-1}$ à 40°C,

Les calculs théoriques conduisent aux valeurs de coefficient d'emmagasinement spécifique présentées à l'Illustration 49.

Coefficient d'emmagasinement spécifique Ss (m $^{-1}$)						
Porosité totale (%)	Compressibilité de la matrice Cm (Pa $^{-1}$)					
	1.E-11	1.E-10	1.E-09	1.E-08	1.E-07	1.E-06
1	1.4E-07	1.0E-06	9.8E-06	9.7E-05	9.7E-04	9.7E-03
2	1.9E-07	1.1E-06	9.7E-06	9.6E-05	9.6E-04	9.6E-03
5	3.2E-07	1.2E-06	9.5E-06	9.3E-05	9.3E-04	9.3E-03
10	5.4E-07	1.3E-06	9.3E-06	8.9E-05	8.8E-04	8.8E-03
15	7.6E-07	1.5E-06	9.0E-06	8.4E-05	8.3E-04	8.3E-03
20	9.8E-07	1.7E-06	8.8E-06	7.9E-05	7.9E-04	7.8E-03
25	1.2E-06	1.9E-06	8.5E-06	7.5E-05	7.4E-04	7.4E-03
30	1.4E-06	2.0E-06	8.2E-06	7.0E-05	6.9E-04	6.9E-03

Illustration 49 - Valeurs théoriques du coefficient d'emmagasinement spécifique

En pratique, les coefficients d'emmagasinement spécifique attendus dans les différents types de formations géologiques doivent se situer entre :

- | | |
|--|----------------------------------|
| $6 \cdot 10^{-4}$ et $9 \cdot 10^{-3}$ m $^{-1}$ | pour les argiles plastiques, |
| 10^{-4} et 10^{-3} m $^{-1}$ | pour les argiles consolidées, |
| 10^{-6} et 10^{-3} m $^{-1}$ | pour les sables, graviers, grès, |
| 10^{-6} et 10^{-4} m $^{-1}$ | pour les roches fissurées, |
| 10^{-7} et 10^{-5} m $^{-1}$ | pour les roches compactes, |

La valeur de $4.6 \cdot 10^{-6}$ m $^{-1}$ correspond à un milieu totalement occupé par de l'eau (porosité de 100 %).

On peut considérer que **la valeur de 10^{-7} m^{-1} constitue une limite inférieure pour le coefficient d'emmagasinement spécifique** en hydrogéologie, dans les milieux naturels constitués d'eau et de roche.

Porosité d'interstices

- Granite et gneiss non altérés:	0,02	à	1,8	%
- Quartzites:		0,8	%	
- Schistes, ardoises, micaschistes:	0,5	à	7,5	%
- Calcaires, dolomies primaires:	0,5	à	12,5	%
- Dolomies secondaires:	10	à	30	%
- Craie:	8	à	37	%
- Grès:	3,5	à	38	%
- Tufs volcaniques	30	à	40	%
- Sables:	15	à	48	%
- Argiles:	44	à	53	%
- Argiles gonflantes, vases:		jusqu'à	90	%
- Sols de cultures labourés:	45	à	65	%

Illustration 50 - Porosités d'interstices, hors porosité de fissures (Marsily, 2004)

Annexe 3

*Sommaire-type d'un rapport descriptif
d'une modélisation hydrogéologique maillée*

***Sommaire-type d'un rapport descriptif
d'une modélisation hydrogéologique maillée***



1. Cadre et objectifs de la modélisation hydrogéologique
2. Extension du domaine modélisé, en plan et sur la verticale.
3. S'il n'y a pas eu de rapport de synthèse hydrogéologique, description des données utilisées pour la modélisation, sur la base du sommaire-type proposé à l'Annexe 1.
4. S'il n'y a pas eu de modélisation géologique 3D et de rapport associé, description du contexte géologique et de la structure géométrique afférente.
5. Contexte hydrogéologique modélisé
Options retenues (et argumentées) pour simplifier le log litho-stratigraphique synthétique afin de l'adapter aux objectifs de la modélisation hydrogéologique.
6. Logiciel utilisé pour la modélisation des écoulements souterrains (nom, version, caractéristiques, etc.)
7. Principales options adoptées pour la modélisation numérique
Maillage, conditions aux limites, représentation du réseau hydrographique, représentation des recharges pluviales.
8. Calage en régime hydrodynamique permanent :
 - Période(s) de simulation et état(s) de référence retenus pour le calage en permanent.
 - Principales étapes du processus de calage, stratégie adoptée, difficultés rencontrées.
 - Hypothèses testées, abandonnées, retenues.
 - Analyses de sensibilité réalisées et résultats associés.
 - Résultats obtenus :
 - o comparaison entre carte(s) piézométrique(s) « observée(s) » et simulée(s) en fin de calage ;
 - o diagramme(s) de dispersion présentant les niveaux piézométriques simulés en fonction des niveaux piézométriques mesurés dans les piézomètres de suivi ;
 - o comparaison entre débits observés et simulés aux exutoires (et dans le réseau hydrographique, si applicable) ;
 - o bilan hydraulique donnant les principales composantes des débits d'écoulement dans la/les couche(s) modélisée(s) et les débits échangés entre couches ;
 - o distribution spatiale des perméabilités horizontales et verticales ajustées par calage dans les différentes formations.
 - Principaux enseignements apportés par le calage en permanent.

9. Calage en régime hydrodynamique transitoire :

- Période(s) de simulation et état(s) de référence retenus pour le calage.
- Principales étapes du processus de calage, stratégie adoptée, difficultés rencontrées, temps de calcul indicatifs.
- Hypothèses testées, abandonnées, retenues.
- Analyses de sensibilité réalisées et résultats associés.
- Résultats obtenus :
 - o comparaison entre chroniques piézométriques observées et simulées dans les piézomètres de suivi ;
 - o comparaison entre carte(s) piézométrique(s) « observée(s) » et simulée(s) à quelques périodes de référence ;
 - o diagramme(s) de dispersion entre niveaux piézométriques simulés et observés dans les piézomètres de suivi à quelques périodes-clefs ;
 - o comparaison entre chroniques de débit observées et simulées aux exutoires (et dans le réseau hydrographique, si applicable) ;
 - o bilans hydrauliques à différentes périodes-clefs, donnant les principales composantes des débits d'écoulement dans la/les couche(s) modélisée(s) et les débits échangés entre couches ;
 - o distribution spatiale des perméabilités horizontales/verticales et des coefficients d'emmagasinement ajustés par calage dans les différentes formations.
- Principaux enseignements apportés par le calage en régime transitoire.

10. Analyses de sensibilité effectuées sur quelques hypothèses importantes.

11. Validation du modèle, résultats obtenus et enseignements apportés sur la représentativité du modèle.

12. Commentaires sur le modèle à l'issue des phases de calage et de validation : points forts, points faibles, domaine d'exploitation du modèle, pistes d'amélioration.

13. Description du contenu numérique du modèle à l'issue du calage, via des tableaux et des cartes illustrant la distribution spatiale des principaux paramètres (perméabilité, emmagasinements, anisotropie, etc.).

14. Scénarios prévisionnels :

- Description des scénarios prévisionnels, des hypothèses de modélisation adoptées, et des options de simulation associées.
- Principaux résultats obtenus, présentés et commentés selon une trame similaire à celle des résultats de calage en régime transitoire.
- Principaux enseignements apportés par la simulation des scénarios prévisionnels.
- Conclusions et recommandations pour la gestion de la nappe.

15. Conclusions et recommandations :

- Représentativité du modèle, incertitudes résiduelles, propositions pour y remédier, améliorations suggérées.
- Suivi et exploitation du système aquifère.



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Écotechnologies (D3E)
Unité Gestion de la ressource
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr