
Chapitre 5

Phases de construction d'un modèle en hydrogéologie

5.1 Introduction

Tout modèle doit comporter trois phases de construction (Bertrandias, 1994, Das-sargues, 1995) :

- **Modèle conceptuel**, qui consiste à construire un modèle en adoptant une série d'hypothèses qui visent à simplifier le problème réel (géométrie et conditions des frontières, nature des matériaux géologiques, phases de fluides, mécanismes de transport, échanges, etc.) ;
- **Modèle mathématique**, au phénomène étudié est associé un modèle mathématique exprimé par une équation différentielle. Ce sont des équations exprimant les bilans des quantités extensives considérées (masse des fluides, des composés), des équations de flux, des conditions initiales et des conditions aux frontières ;
- **Modèle numérique**, souvent la solution analytique n'est pas adaptée (limites irrégulières, hétérogénéité du milieu, non-linéarité des problèmes), le modèle numérique intervient. Il permet d'effectuer un cycle interne d'itérations d'un problème sur la valeur du paramètre non-linéaire. Sa solution est trouvée en des points discrets du domaine spatio-temporel, ses équations aux dérivées partielles sont remplacées par un système d'équations algébriques en fonction des variables d'état comme inconnues et la solution du problème est obtenue pour le set spécifié de valeurs des paramètres.

Sur un plan pratique, les étapes de développement d'un modèle de circulation d'eau souterraine (figure 5.1, sont (Kessasra, 2015) :

- Définir l'objectif principal du modèle ;
- Collecter et analyser les données disponibles sur l'hydrosystème et construire sa base de données ;
- Développer une représentation de la réalité qui décrit ses caractéristiques importantes, sous forme systémique, afin d'aboutir au modèle conceptuel ;
- Traduire le fonctionnement obtenu en code informatique au travers d'équations mathématiques ;
- Calage du modèle en permanent, en ajustant les paramètres et coefficients sur une

- partie de la série de données ;
- Analyse des sensibilités du modèle et sa validation sur le reste de la série de données, en vérifiant si le comportement de notre modèle se rapproche bien de la réalité ;
 - Calage et tests de sensibilité en régime transitoire ;
 - Dispositif d'exploitation par scénarios en vue d'une gestion rationnelle des ressources en eau.

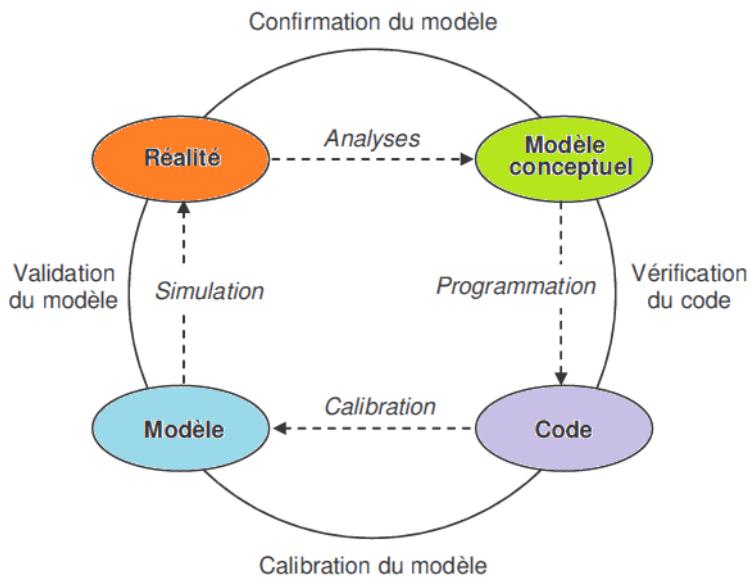


FIGURE 5.1 – Eléments de la terminologie de la modélisation (Schlesinger et al., 1979)

5.2 Conditions aux limites

La résolution des équations ne peut s'effectuer, sans formulation explicite de la condition initiale et des conditions aux limites. La condition initiale consiste à connaître la distribution du potentiel hydraulique en tout point du domaine au temps initial. Les conditions aux limites concernent les règles d'échange des flux entre le domaine modélisé et le milieu extérieur (flux d'eau, flux de matière migrant avec l'eau, ou flux de chaleur). Les limites du domaine d'étude doivent coïncider avec des limites physiques où la description des flux puisse être effectuée de manière conceptuelle à partir des observations sur le terrain. Les conditions aux limites sont de trois types, comme le montre la figure 5.2, (De Marsily, 2004) :

- Conditions aux limites de type Dirichlet qui spécifient les potentiels imposés aux frontières du domaine ;
- Conditions aux limites de type Neumann qui spécifient le flux imposé aux limites du domaine ;
- Conditions aux limites de type de Cauchy qui donnent les combinaisons linéaires existantes entre le flux et le potentiel hydraulique aux frontières du domaine.

5.2.1 Potentiel imposé ou conditions de Dirichlet

Conditions de charges ou de niveaux piézométriques imposés (Potentiel imposé), elles reviennent à spécifier le potentiel (ou la pression) sur les limites où celui-ci est indépendant des flux échangés. Ce sera généralement le long du contact nappe-rivière ou un plan d'eau (Lac, mer, etc.), la charge est constante imposée par la côte de l'eau dans la rivière. Les précipitations sont supérieures au flux d'eau pouvant s'écouler dans la nappe, la charge est voisine de la côte du sol. En pratique, ces conditions peuvent être choisies au contact d'un aquifère et des eaux libres de surface, lorsque les lignes équipotentielle peuvent être distinguées (Barrage). Via ce type de limites, des flux énormes peuvent entrer ou sortir du modèle.

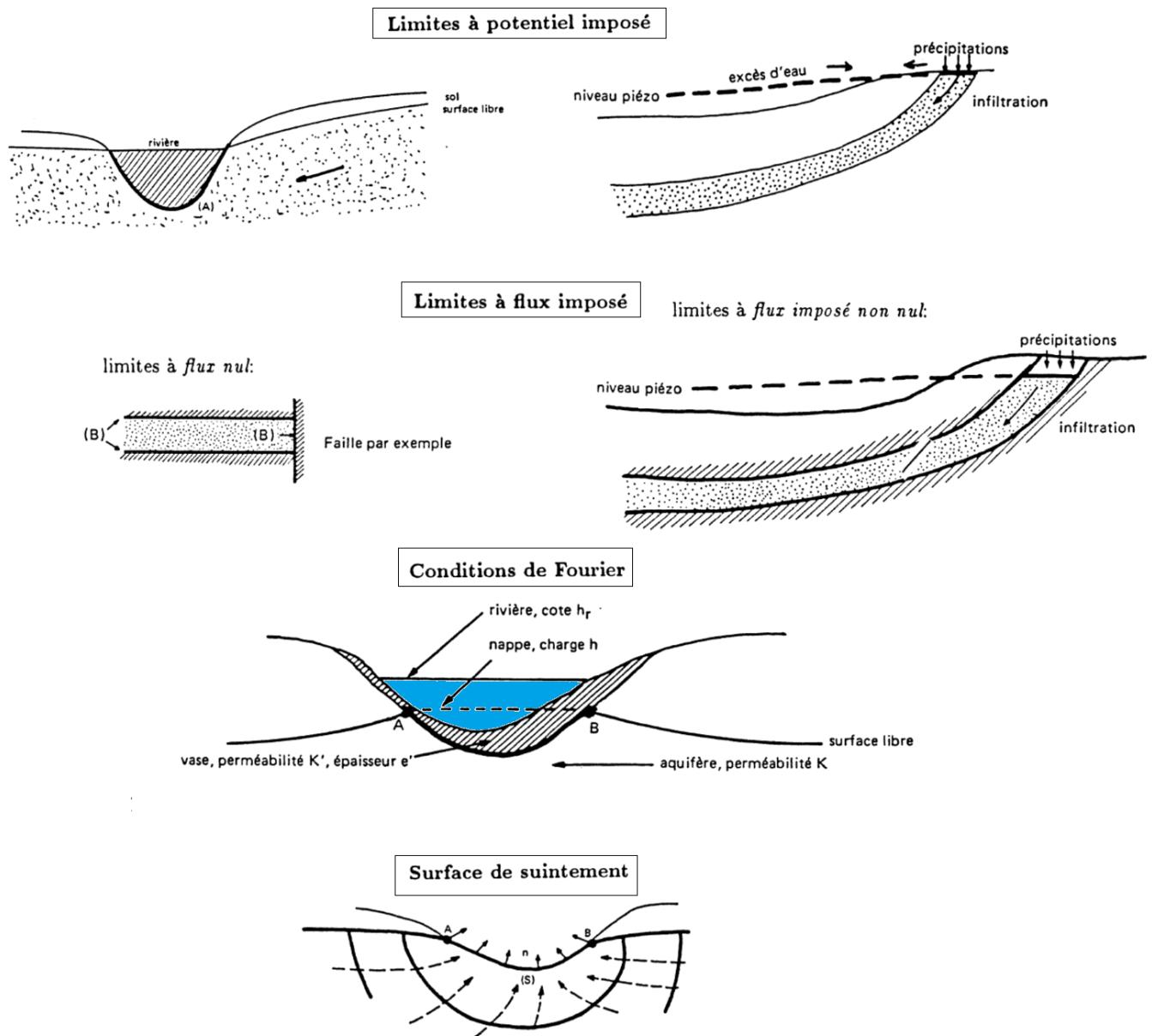


FIGURE 5.2 – Différentes conditions aux limites d'une nappe aquifère (De Marsily, 2004)

5.2.2 Flux imposé ou Conditions de Neumann

Conditions de flux ou de débit imposé, les échanges avec le milieu extérieur sont réglés par un flux d'eau traversant une portion donnée de limite indépendamment des hauteurs piézométriques. On distingue :

- La limite à flux nul ($\frac{\partial h}{\partial n} = 0$) : Si la limite correspond à une ligne de courant, aucun flux n'est toléré perpendiculairement, le flux spécifié est nul (Conditions de frontières imperméable), au contact d'une formation aquifère avec un imperméable.

- Les limites à flux imposé non-nul : un affleurement dans une zone où le taux d'infiltration de la pluie est inférieur aux possibilités d'ingestion de la nappe. C'est le taux d'infiltration de la pluie qui fera le flux entrant. On a également un prélèvement à débit imposé dans un ouvrage (Puits, forages) constitue également une limite à flux imposé.

5.2.3 Conditions de Fourier

Imaginons une rivière drainant (ou alimentant) une nappe libre mais dont le fond serait colmaté par une couche de vase peu perméable. La différence de charge $\Delta h = h_{riv} - h_{npp}$ crée le gradient nécessaire à l'écoulement d'un certain débit q par unité de surface de contact nappe-rivière d'après la loi de Darcy :

$$q = K' \frac{\Delta h}{e'} = K' \frac{h_r - h}{e'} \quad (5.1)$$

Le débit q est donné par la loi de Darcy :

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial n} \quad (5.2)$$

Par conservation du flux à la traversée de l'interface AB, on peut écrire :

$$-K \frac{\partial h}{\partial n} + \frac{K'}{e'} h = \frac{K'}{e'} h_r \quad (5.3)$$

5.2.4 Surface de suintement

Quand l'eau d'une nappe sourd vers l'extérieur, le long d'une ligne d'émergence, la surface de contact S est dite surface de suintement. Où : $h = z$ car la pression est égale à la pression atmosphérique et $\frac{\partial h}{\partial n} < 0$: Si n est orienté vers l'extérieur, le flux de la nappe est sortant.

5.3 Modélisation en régime permanent

Dans les conditions en régime permanent, on admet que les termes du bilan en eau de la nappe, exprimés dans les conditions aux limites et dans le débit algébrique prélevé, sont invariants dans le temps et l'on recherche l'état stationnaire correspondant. Le régime permanent est donc une condition qui caractérise un aquifère avant qu'une variation ne lui soit introduite (Bandani et al., 2011). Toutefois, les simulations sont basées sur deux principaux processus : *le calage et la validation*. D'une part, *le calage* est le processus d'ajustement de paramètres et flux tels que la perméabilité et la recharge, dans des

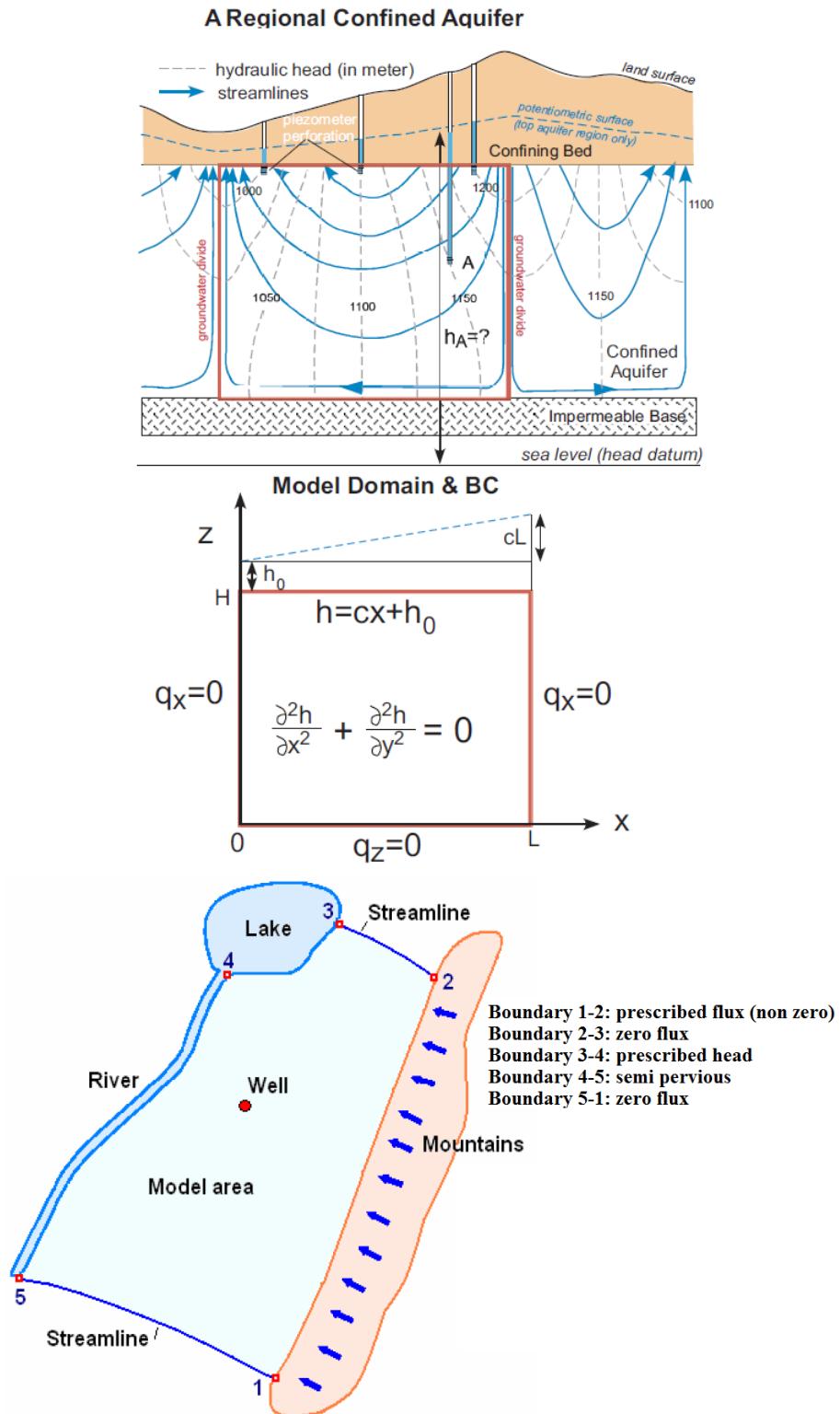


FIGURE 5.3 – Conditions aux limites et domaine modélisé (Zheng, 2011) et exemple de conditions aux limites (Rausch, 2010)

gammes raisonnables, afin qu'ils puissent correspondre aux observations et mesures de terrain. D'autre part, la validation est un processus visant à tester le modèle calibré en état d'équilibre en démontrant qu'il peut prévoir avec succès un ensemble d'observations

non-utilisées précédemment dans son calage (Wels, 2012). La calibration et la validation du modèle s'assurent donc qu'il soit capable de produire des résultats conformes aux données de terrain. Si les résultats ne sont pas concluants il peut être nécessaire de réviser le modèle conceptuel. Enfin, l'hydrogéologue exploite son modèle pour répondre à l'objectif initialement posé de prédition, de visualisation de l'état de l'aquifère (Janssens-Coron, 2007). Les processus de calage et de validation peuvent inclure plusieurs itérations (Wels, 2012) :

- L'examen initial du calage et de validation du modèle : des données existantes sont comparées aux résultats issus des simulations et du calage ;
- Les données ou les écarts de performance sont identifiés : évaluer le taux d'erreurs du modèle ;
- En supposant que les écarts de performance ne peuvent pas être atteints ou améliorés à travers des modifications acceptables introduites sur le modèle conceptuel ou des variations plausibles dans les paramètres, il faudrait prendre une décision qui consiste à rassembler plus de données avant de confirmer la validation du modèle pour pouvoir atteindre les objectifs fixés et procéder à des simulations prédictives.

A ce titre, les paramètres de calage qui sont communément utilisés dans les modèles se regroupent en :

- Propriétés hydrauliques, choisies par l'identification et la cartographie des zones de propriétés hydrauliques semblables. Les hauteurs d'eau à un ou plusieurs points répartis sur l'étendue de l'aquifère et peuvent inclure des hauteurs observées dans plusieurs unités hydrogéologiques superposées ;
- Taux de recharge, évalué en se basant sur l'étude locale ou régionale des précipitations, du bilan d'eau, du type de couverture, des propriétés des sols, mais aussi du flux de décharge d'eau souterraine dans le réseau de drainage superficiel (réseau hydrographique). D'autres flux parfois utilisés dans le calage du modèle incluent l'infiltration nette dans la nappe (recharge), des pertes de suintement (cours d'eau et lacs) et des volumes pompés des forages (exploitation) ainsi que ceux injectés dans l'aquifère (Recharge artificielle).

5.3.1 Calage du modèle

Le calage d'un modèle hydrogéologique permet d'identifier les données non-mesurées (paramètres hydrodynamiques, recharge, conditions aux limites) en ajustant les hauteurs piézométriques calculées aux hauteurs mesurées. Cet ajustement peut être effectué de manière manuelle par essais-erreurs (Trial-and-errors) ou à l'aide d'algorithme de minimisation (calage automatique). Cette méthode permet de proposer plusieurs jeux de données cohérents avec l'ensemble des informations quantitatives (niveaux de nappe, valeurs de transmissivité) et qualitatives (zonation, ordre de grandeur de la recharge) disponibles. Cette recherche de l'ensemble des solutions possibles et compatibles avec toute l'information existante, permet une évaluation des imprécisions liées au calage du modèle, imprécisions qui peuvent avoir un effet important sur la fiabilité des prédictions futures. Souvent, certaines de ces informations ne sont pas disponibles, il faut les estimer. On utilise pour cela un jeu de données de terrain, des valeurs mesurées *In-situ*, qui ne peut pas servir ultérieurement à la validation du modèle.

La transmissivité est considérée, comme facteur clé du calage. Se fait par une généralisation de T dans l'ensemble des noeuds, suivie d'un ajustement direct et progressif dans chaque maille pour se rapprocher du gradient de charge observé, autrement dit, permettre une meilleure adéquation entre les résultats de calcul et ceux de terrain. Les valeurs de T doivent être ajustées jusqu'à ce que les isopièzes tendent à se superposer. Quelles que soient les données de départ, le système évolue rapidement, puis de plus en plus lentement vers une situation stable. La **stratégie du calage** commence par zones aval vers les zones amont, on enregistre les résultats de T. On aura une base de données calculées de h. On calcule l'ajustement entre la piézométrie calculée et celle observée pour toutes les mailles. Lorsque le calage des deux piézométries calculée et observée est correct, il est nécessaire de vérifier la conservation des flux en eau. Le code numérique permet d'accéder au bilan en eau de chacun des termes d'écoulement et au bilan total. Si le calage piézométrique effectué simule très correctement la piézométrie de référence, il présentera un bilan total presque nul. Mais ceci n'est toujours pas le cas en raison des erreurs d'estimation et de calage.

Parmi les autres paramètres qu'on utilise, la géométrie des réservoirs aquifères qui conditionne les résultats des modèles mathématiques. Il s'agit de l'épaisseur de la zone saturée qui, généralement, reste constante si le modèle converge bien.

5.3.2 Etude de sensibilité

Avant toute utilisation du modèle, il convient de réaliser une **étude de sensibilité** aux différents paramètres. Cette démarche concerne plus le système étudié que l'outil lui-même. Le modèle calibré peut être utilisé comme base pour un modèle prédictif, en vue de prévoir et d'évaluer la façon dont le système aquifère souterrain puisse changer en réponse aux divers changements, tels que les contraintes hydrologiques et climatiques, les conditions aux frontières (Wels, 2012). La réponse de la nappe aux tests est souvent le dénoyage et l'assèchement des mailles actives (figure 5.4) et la distorsion des isopièzes. L'intérêt d'une telle pratique est multiple car elle permet, tout d'abord, de connaître la précision nécessaire pour l'introduction de chaque paramètre, mais aussi de distinguer les processus qui influencerait le résultat de ceux qui auront une incidence faible. L'analyse d'incertitude et de sensibilité peut être entreprise pour couvrir les aspects suivants :

- Illustrer et évaluer le degré d'influence des contraintes dans les modèles conceptuels et le degré de fiabilité des résultats des modèles prédictifs (Wels, 2012) ;
- Quantifier l'impact des variations des paramètres estimés (Wels, 2012), déterminer la plage de variation optimum des paramètres, et l'influence d'une variation sur les résultats (Dassargues et Monjoie, 1991) ;
- Étudier les interactions entre paramètres (relations éventuelles) ;
- Fournir un aperçu perspicace sur la façon dont les résultats du modèle peuvent être utilisés.

Par ailleurs, il convient de vérifier le bon fonctionnement du modèle. Des problèmes dus à certains paramètres ou données initiales totalement incorrectes (différents des conditions réelles) qui provoquent une incohérence, à des mauvais choix quant à la discréétisation dans le temps ou dans l'espace, à des options mal choisies pour les ruptures de situation

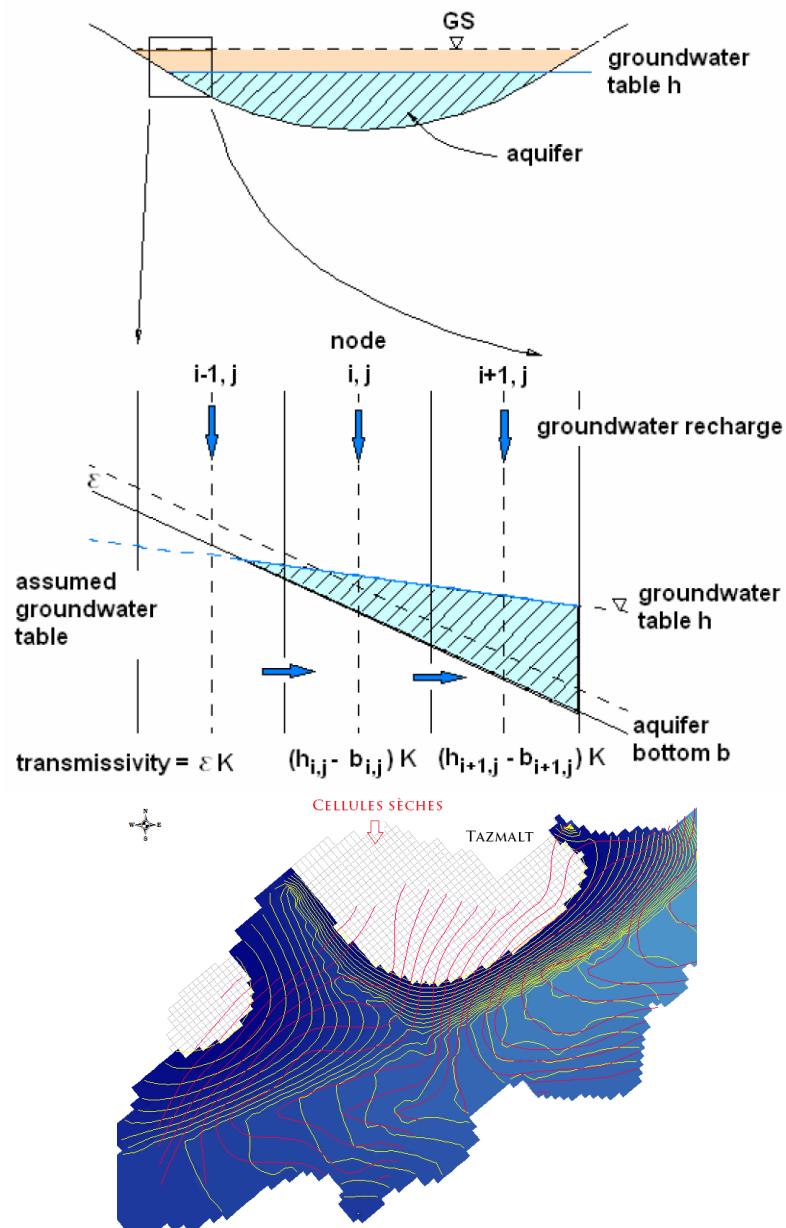


FIGURE 5.4 – Assèchement des mailles dans un aquifère libre (Rausch, 2010) et test de sensibilité à la perméabilité dans la Soummam (Kessasra, 2015)

(passage du régime permanent au transitoire, passage entre deux situations en transitoire différentes).

5.3.3 Validation du modèle

La validation d'un modèle est son utilisation dans de nouvelles situations. Le transfert des modèles à une situation nouvelle peut se faire soit, dans le temps, soit dans l'espace. Dans le temps, à partir des entrées et des sorties mesurées, on contrôle les performances du modèle, et donc indirectement du modèle conceptuel, calé sur un site et une période donnés, pour une période temporelle différente de la première. La validation dans le temps est la plus fréquemment utilisée en modélisation quand elle n'est pas l'unique.

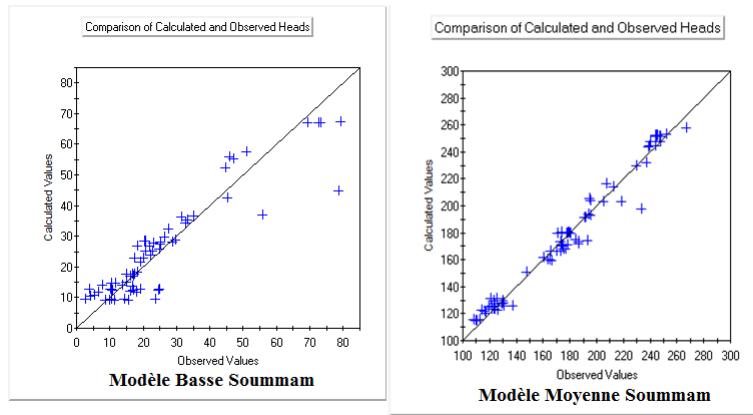


FIGURE 5.5 – Diagrammes de corrélation du modèle de la Soummam (Kessasra, 2015)

Klemes (1986) affirme pourtant qu'elle n'est pas suffisante pour tester la validité de la formulation du modèle conceptuel car la tendance de la série temporelle utilisée dans la validation n'est pas forcément inconnue. En effet, la série temporelle utilisée pour la validation peut contenir la même information que celle de la phase de calage. Le modèle conceptuel fait une interpolation dans un cadre connu, à la place d'une extrapolation dans une nouvelle situation. Klemes propose, pour le calage et la validation d'un modèle conceptuel, l'utilisation de la démarche classique de deux échantillons dans le temps, et de deux échantillons dans l'espace (création de deux modèles différents) pour tester sa transposabilité ou le confronter à de nouvelles conditions hydrologiques.

L'élaboration de la vérification et de la validation du modèle exige l'utilisation de critères quantitatifs et qualitatifs. Des tests statistiques peuvent être utilisés, en vue de la détection d'erreurs systématiques (biais) comme les diagrammes de dispersion (scatter diagrams). Le but est de montrer qu'il n'y a aucune erreur systématique dans la distribution spatiale des différences entre les hauteurs piézométrique modélisées et celles mesurées. Cette représentation graphique est souvent associée à des statistiques d'erreur moyenne. Les charges hydrauliques mesurées placées sur l'axe horizontal et les charges hydrauliques calculées sur l'axe vertical, avec un point représentatif de chaque paire de données d'observation. Ces diagrammes sont utiles dans la détection des valeurs atypiques, du clustering (groupe) et des tendances générales (Kessasra, 2015).

Les tests de validation comprennent également : (1) des critères qualitatifs (comparaisons de graphiques observés et calculés ou de résidus), (2) des critères statistiques quantitatifs (critère de Nash) et (3) une analyse des incertitudes (Nascimento, 1995). Par ailleurs, ces tests peuvent être enrichis par l'analyse comparative des modèles conceptuels qui chacun a généré des codes différents. Les analyses de ce genre en hydrologie et hydrogéologie ont apporté des informations importantes concernant la précision et la complexité des modèles.

5.4 Modélisation en régime transitoire

5.4.1 Principe

Les modèles d'écoulement permettent (Jensen, 1987) l'étude de bilans (détermination des tendances régionales des écoulements dans le réservoir et leurs interactions avec les eaux de surface, les autres aquifères), les effets des puits de pompage (cônes de dépression et périmètre de protection) et les nouvelles conditions dans la réalimentation de la nappe (changements climatiques, urbanisation, irrigation). Ces deux derniers objectifs appartiennent au régime transitoire. En régime transitoire, on introduit donc une perturbation et on suit, grâce au modèle, la vitesse d'établissement d'un nouvel équilibre dynamique, c'est-à-dire le temps nécessaire à l'établissement d'un nouveau régime permanent. On injecte dans le même modèle des débits d'exploitation afin de suivre la réaction de la nappe par rapport aux prélèvements/injection. Si on calcule T et S pour chaque noeud, on peut calculer le rapport T/S, qui est un moyen de gestion de la nappe.

Ces modèles simulent des problèmes liés aux stress hydriques, aux épisodes de sécheresse, aux cycles d'exploitation, aux changements d'aménagement de surface, à court, moyen et long termes. Les simulations doivent être entamées par des conditions initiales représentatives du milieu souterrain à un pas de temps indiqué, et finissent dans une durée de temps spécifié dans le modèle. En effet, le temps est divisé en des pas de temps, et les charges hydrauliques sont calculées à la fin de chaque pas de temps.

5.4.2 Calage en transitoire

Le modèle nécessitera, encore une fois, une phase de calage et de validation. L'objectif de ce processus est d'ajuster les charges calculées par le modèle aux chroniques piézométriques observées sur des piézomètres témoins. Un nouveau paramètre est intégré au calage, il s'agit de l'emmagasinement de l'aquifère (S), la notion de coefficient d'emmagasinement n'intervient uniquement qu'en régime transitoire. Mais pour le cas d'une nappe libre, la porosité de drainage s'y substitue. Sur MODFLOW, ce paramètre est intégré sous forme de "Specific Yield". Il fera ensuite l'objet de tests de sensibilité à certains paramètres (porosité de drainage, perméabilités, etc.). Les données requises pour ce genre de simulation sont (Wels, 2012) :

- Les propriétés d'emmagasinement devraient être spécifiées et les conditions hydrauliques initiales doivent être définies de façon à être représentatives du site d'étude ;
- Les conditions aux limites ajustées sous le régime transitoire (e.g. seasonal recharge flux rate, seasonal river stage variation, diversions of natural streams).
- Des conditions aux limites doivent être vérifiées pour des interactions avec les stress hydrauliques qui se propagent au fil du temps et particulièrement après les temps de simulation ;
- Les données de prélèvement se rapportant aux débits pompés (AEP, irrigation et industrie) ;
- Les données utilisées pour le calage devraient inclure également les essais de pompage, les données de surveillance d'une durée suffisante qui montrent les variations saisonnières et les réponses aux stress artificiels induits par l'extraction ;

- Tester les différentes unités hydrostratigraphiques dans différents endroits afin d'avoir une confiance dans le calage du modèle.

Ce type de simulation permet de mesurer, l'inertie ou à contrario la réactivité du système hydrogéologique. Pour les systèmes peu réactifs, les paramètres hydrogéologiques comme la piézométrie, la transmissivité, ne réagissent que très lentement aux aléas climatiques et au changement dans le rythme d'exploitation de la nappe. Dans ce cas, après avoir démontré ces propriétés par une modélisation utilisant des pas de temps assez petits, il sera possible d'effectuer des calculs plus simples à partir de paramètres globaux (annuels) du climat par exemple. Cette démarche ne sera pas possible pour des systèmes plus réactifs. Généralement, il existe une différence notable entre l'inertie du système pour l'établissement d'un régime permanent en terme de flux d'eau et une inertie nettement plus marquée pour l'établissement d'un régime hydro-salin.

5.4.3 Exploitation par scénarios

L'exploitation du modèle par scénarios a pour but de mieux comprendre la réaction de la nappe face aux différentes sollicitations humaines. Suivre l'évolution des niveaux simulés en fonction de l'accroissement de la demande en eau serait d'une utilité pour l'élaboration d'un plan de gestion. A l'issue de chaque scénario, l'examen se portera sur son bilan d'eau, qui est le calcul des bilans de flux d'eau en entrées et sorties du système sur l'ensemble du modèle, ou par zones ou sub-regions. Ces bilans, sous forme de balances, permettent de déterminer la capacité de stockage de la nappe, les calculs d'échanges oued-nappe qui représentent un terme crucial dans la compréhension du fonctionnement des aquifères, et la part de recharge par les pluies et les frontières extérieures (voir notre cas d'étude). Nous rappelons que les activités humaines ont une influence croissante sur les systèmes hydrologiques et qu'il est nécessaire de les prendre en compte dans la modélisation, parmi leurs effets :

- La construction de barrages provoque des effets majeurs sur les régimes d'écoulement. Toutefois, ils permettent de constituer ou distribuer des ressources supplémentaires afin de satisfaire des demandes en eau (Malaterre, 1995 ; Bader, 2004). Cas du barrage de Tichi Haf près d'Akbou ;
- Les changements physiques dans l'usage du sol tels que la déforestation, qui conduit souvent à un accroissement des pointes de crues et de l'érosion des sols (Eckhardt et al., 2003). Le drainage des zones humides modifie souvent le régime des écoulements (Kao et al., 2001). Les pratiques agricoles modifient les conditions d'infiltration et de recharge des eaux souterraines (Leonard et Andrieux, 1998 ; Christin, 2004) et l'urbanisation accroît la rapidité des écoulements, comme dans la ville de Sidi Aich ;
- La demande en eau croissante du fait de l'augmentation des populations (OMM, 1994), des surfaces irriguées et des cultures très consommatrices en eau (ASCA, 2006) ;
- L'émission de gaz à effet de serre provoquera une modification climatique avec notamment la réduction de l'énergie solaire et, avec des répercussions sur les systèmes hydrologiques.