

Chapitre 10

Incertitudes

Nature des incertitudes

Un modèle hydrogéologique tel que celui de la zone du Projet Bassée est une représentation approchée de la réalité physique. Il comporte nécessairement des erreurs qui tiennent, notamment, aux approximations qui sont faites et aux incertitudes sur les valeurs des paramètres physiques. Six types d'erreurs peuvent être distingués :

1. Erreurs « phénoménologiques » ;
2. Erreurs de conceptualisation ;
3. Erreurs de géométrie ;
4. Erreurs de modélisation ;
5. Erreurs sur les valeurs des paramètres physiques ;
6. Erreurs numériques.

Erreurs phénoménologiques. Des *erreurs phénoménologiques* se produisent lorsque les équations du modèle traduisent mal les phénomènes physiques réels. Le modèle hydrogéologique est fondé sur la loi de Darcy et sur l'équation de conservation de la matière. Il peut exister des circonstances dans lesquelles les écoulements souterrains ne sont pas régis par la loi linéaire de Darcy. Ceci se produit, par exemple, lorsque le milieu aquifère n'est pas un milieu poreux, au sens usuel du terme, ou lorsque le gradient hydraulique dépasse une valeur-critique.

Dans les Alluvions modernes, il peut exister des conduits de grandes sections, dans lesquels les écoulements ne sont pas régis par la loi de Darcy. Ces conduits seraient, par exemple, des terriers, des taupinières, des moules externes de racines d'arbres...

On sait, d'une manière générale que, dans la Craie aquifère, il peut exister des fissures de grande extension, faiblement connectées à d'autres fissures ou à des réseaux intersticiels. Les lois d'écoulement dans ces fissures, qui peuvent être très conductrices, dévient sensiblement de la loi de Darcy.

L'existence *potentielle* de conduits karstiques dans la Craie a été signalée par plusieurs auteurs ; les investigations géophysiques menées dans la Bassée ont plutôt conclu à leur inexistence¹.

La loi de Darcy n'est applicable que si le gradient hydraulique ne dépasse pas une valeur critique. Au delà de cette valeur-seuil, les débits ne dépendent plus linéairement du gradient de charge hydraulique. Cela peut se produire bien avant l'apparition d'écoulements turbulents². La valeur critique du

¹Cependant le rapport : Vernoux J.-F., O. Schomburgk, F. Hanot, M. Donsimoni (2004). Projet d'aménagement du site de la Bassée – analyse des travaux de reconnaissance réalisés en 2002–2003. Rapport final BRGM/RP-52712-FR indique que si *ces investigations ont apporté de nombreuses données nouvelles, utiles à la compréhension du fonctionnement du système [. . .] ces données auraient pu être mieux valorisées et [. . .] les campagnes d'investigations géophysiques apparaissent trop limitées.*

²Hubbert M. K. (1956). Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. vol. 207, pp. 222–239.

nombre de Reynolds, calculé en considérant le diamètre moyen des grains, est $Re^* \approx 1$; la turbulence apparaît à des nombres de Reynolds beaucoup plus élevés, de l'ordre de 600 à 700.

Erreurs de conceptualisation. Des *erreurs de conceptualisation* se produisent lorsque les unités hydrogéologiques du système ne sont pas distinguées, ou sont mal identifiées. La prise en compte de formations peu perméables est souvent cruciale, parce que ces formations ont un rôle essentiel dans la structuration des écoulements souterrains. La conceptualisation devrait tenir compte de l'échelle de temps considérée, de la distribution spatiale des perméabilités et d'observations de l'état du système aquifère. Dans le cas de la Bassée, on ne dispose que d'un ensemble fragmentaire de données. Les données locales les plus abondantes sont de nature qualitative. Elles permettent de distinguer deux unités : les Alluvions et la Craie. Ces deux unités sont des aquifères. L'existence d'un niveau moins perméable, entre les Alluvions anciennes et la Craie campanienne, est démontrée par les forages du Projet Bassée. L'origine de cette Craie altérée sous les Alluvions est discutée dans l'Annexe F. L'hypothèse d'une altération Quaternaire, postérieure à la mise en place des Alluvions anciennes (Mégnien, 1976), est celle qui paraît le mieux expliquer les caractéristiques effectivement observées de la Craie sous les Alluvions de la Bassée.

En raison de leur continuité spatiale et de leur perméabilité élevée, les Alluvions anciennes constituent l'élément primordial du système aquifère de la Bassée. La Craie a un moindre rôle, surtout aux échelles de temps considérées dans le Projet Bassée.

Erreurs géométriques. Les *erreurs géométriques* sont des erreurs dans la représentation des caractéristiques géographiques du système physique. La discrétisation de l'espace en mailles carrées de $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ne permet pas d'introduire dans le modèle tous les détails révélés par l'étude photogrammétrique. En particulier, certains groupes de lacs, séparés par d'étroits cordons d'alluvions, ne peuvent être représentés comme un ensemble de lacs individuels. Les parois des lacs et, plus généralement, des interfaces eau libre-aquifère sont verticales, au lieu d'être inclinées. Dans l'ensemble cependant, les erreurs géométriques ne devraient que peu affecter l'évaluation des débits de fuite.

Erreurs de modélisation. Les *erreurs de modélisation* proviennent des simplifications adoptées lors de la phase de conception du modèle.

La principale simplification est que les écoulements souterrains dans les aquifères sont supposés être bi-dimensionnels. Cela doit être généralement vrai, mais il y a des exceptions locales de petite échelle. Il existe des structures d'écoulement tri-dimensionnelles au voisinage des cours d'eau qui n'entaillent pas totalement la couche des Alluvions. De telles structures existeront aussi sous les digues des casiers. La représentation bi-dimensionnelle de structures d'écoulement localement tri-dimensionnelles devrait jouer dans le sens d'une *surestimation* des débits de fuite : pour une même différence de charge hydraulique, la longueur parcourue par les particules d'eau souterraine est plus grande dans le premier cas que dans le second.

Une autre simplification est que les paramètres hydrodynamiques sont considérés comme indépendants de l'état du système aquifère. En particulier, les transmissivités ne varient pas avec la charge hydraulique. En période de fonctionnement des casiers, la nappe phréatique devrait être remplie et les transmissivités devraient donc avoir effectivement une valeur constante, égale à la valeur maximum possible.

Erreurs sur les valeurs des paramètres hydrodynamiques. Les erreurs sur les valeurs des paramètres hydrodynamiques du modèle sont certainement la principale source d'incertitudes sur les prédictions du modèle. Des problèmes ont été relevés concernant la signification des transmissivités mesurées et leur représentativité statistique. Les mesures de la perméabilité verticale des Alluvions modernes par la technique des doubles anneaux donnent des valeurs probablement *surestimées*. Un

autre ordre de difficultés tient à la caractérisation spatiale des champs de perméabilité. Cette caractérisation paraît actuellement insuffisante parce que le modèle spatial suggéré par les données disponibles n'est guère compatible avec les modèles déduits des observations sédimentologiques effectuées sur des milieux alluviaux comparables à ceux de la Bassée.

Erreurs numériques. Les *erreurs numériques* sont liées à la représentation des nombres sur un nombre fini de bits dans la mémoire de l'ordinateur. Elles sont négligeables.

Évaluation des incertitudes.

Si les données de terrain à partir desquelles on estime les valeurs des paramètres du modèle sont suffisantes en qualité et en quantité, il devient possible d'évaluer, avec un certain réalisme, les incertitudes affectant les prédictions du modèle. La qualité des données a un aspect intrinsèque et un aspect statistique. L'aspect intrinsèque correspond à la nécessité d'effectuer des mesures de paramètres effectivement représentés dans le modèle. Par exemple, les essais de pompage doivent être effectués dans des forages crépinés dans les Alluvions anciennes ou dans la Craie inférieure, mais pas dans les deux. L'aspect statistique correspond à la nécessité de choisir les points de mesure selon une procédure qui garantisse l'absence de biais statistique (*surestimation* ou *sousestimation* systématique) dans les résultats.

La caractérisation hydrogéologique actuelle du site du Projet Bassée pourrait, et devrait, être améliorée. L'un des résultats de la modélisation est de donner des indications précises sur la position et l'étendue du domaine spatial où une acquisition de données supplémentaire serait la plus utile (cf. cartes des débits de fuite et des débits exfiltrés).