

Chapitre 11

Conclusions et recommandations

Conclusions

La faisabilité du Projet Bassée peut être appréciée selon plusieurs critères, plus ou moins liés entre eux, et relevant de différentes disciplines telles que la géotechnique, la géophysique, l'hydrogéologie, l'écologie... Cette étude a porté sur le seul critère hydrogéologique qui considère un phénomène physique unique et quantifiable : les fuites des casiers vers le système aquifère. Ces fuites sont dues à la perméabilité des formations du sous-sol de la Bassée et à l'existence de *surcharges* hydrauliques dans les *surlacs*, lieu de stockage de l'eau de Seine. Il y aurait donc nécessairement des écoulements des *surlacs* vers le système aquifère. Ces écoulements seraient très variables dans l'espace et dans le temps. Pour les analyser quantitativement, il faut disposer d'un modèle mathématique capable de simuler les interactions hydrauliques entre le système de *surstockage* et le système aquifère local.

Modèle hydrogéologique

Les modèles habituellement utilisés dans les études hydrogéologiques ne permettraient de représenter les caractéristiques spécifiques de la Bassée aménagée (lacs de gravière, *surlacs*) qu'en ayant recours à des artifices qui auraient nui à la crédibilité des résultats.

Le nouveau modèle (**mosarl**), développé par ARMINES dans le cadre de cette étude, s'appuie sur des principes physiques fondamentaux comme la conservation de la matière et la loi de Darcy. **mosarl** a été construit en représentant les différentes composantes du système physique avec le même degré de réalisme. Dans le modèle comme dans la réalité, les lacs de gravière, les *surlacs* et les différentes unités hydrogéologiques du système aquifère échangent des flux qui dépendent de perméabilités et de gradients locaux de potentiel. La perméabilité est le principal paramètre physique du modèle.

Le but du modèle est de fournir des descriptions, à différentes échelles d'espace, des effets du *surstockage* d'eau à l'intérieur des casiers. L'espace géographique représenté dans le modèle est l'espace réel, discrétisé en mailles. L'échelle spatiale la plus petite est donc celle d'une maille élémentaire, soit (50 m × 50 m × épaisseur) dans le cas des Alluvions anciennes. L'échelle la plus grande est celle du domaine modélisé. Les limites géographiques de ce domaine sont des limites naturelles ou artificielles. Les limites artificielles ont été définies de telle manière qu'elles n'aient aucune influence sur les résultats, ce qui se vérifie toujours *a posteriori*.

Stratégie de modélisation

L'évolution réelle du système, pendant les épisodes de *surstockage*, résulte de la combinaison d'une évolution naturelle et d'une évolution forcée due à la présence d'eau dans les *surlacs*. Cette distinction n'est utile que si ces deux évolutions sont séparables et additives, ce qui exige que le système physique soit linéaire et invariant. Pour qu'il le soit, les paramètres physiques doivent être indépendants de l'état du système. Dans le contexte hydrogéologique de la Bassée, cela suppose que l'emmagasinement d'eau

dans le système aquifère soit à son maximum. Il devrait en être approximativement ainsi pendant les épisodes de fonctionnement des casiers. En effet, le bassin de la Seine, à l'amont de la Bassée, étant constitué de terrains perméables, de fortes crues ne peuvent se produire que si les nappes phréatiques ne sont plus capables d'emmagasiner des volumes d'eau supplémentaires importants. Il semble donc raisonnable d'admettre que le comportement du système physique soit linéaire pendant les épisodes de fonctionnement des casiers. L'invariance du système correspond à l'hypothèse selon laquelle les paramètres physiques du système ne varient pas au cours du temps.

Ce raisonnement permet d'ignorer l'évolution naturelle, qui dépend de facteurs imprévisibles comme les précipitations, et de ne considérer que l'évolution forcée, due au seul *surstockage*.

L'application du *principe de superposition* présente l'avantage, considérable, de clarifier la modélisation, sans perte de rigueur :

- les conditions initiales sont définies de manière simple et rigoureuse ($h = 0$ dans toutes les mailles au temps $t = 0$) ;
- les simulations sont limitées aux seuls épisodes, relativement brefs, de fonctionnement des casiers ;
- tous les phénomènes hydrodynamiques attribuables au *surstockage*, et que le modèle est capable de simuler, sont effectivement calculés ;
- les résultats sont dépourvus d'ambiguïté, tout ce qui est calculé étant dû au *surstockage* et à lui, seul.

Simulations : hypothèses et résultats.

Le modèle est un outil mathématique qui fournit des estimations de la réponse du système physique à des entrées données.

Les entrées du modèle sont des débits injectés dans les casiers. Le principe du Projet Bassée est que, lors d'importantes crues conjointes de la Seine et de l'Yonne, lorsque l'écoulement de la Seine au droit de la Bassée atteint son maximum, des débits importants seraient pompés à proximité des casiers, puis injectés dans ceux-ci. L'allocation des débits est proportionnelle à la superficie des casiers.

HYDRATEC a analysé les plus grandes crues connues de la Seine dans la Bassée et évalué les débits de pompage qui, en supposant l'existence du système de *surstockage*, auraient assuré un écrêtement optimal des hydrogrammes correspondants. Les figures 9.1 à 9.4 montrent les débits qui auraient été prélevés dans la Seine, au droit de la Bassée, en 1910, 1924, 1955 et 1982. La crue de 1955 a été choisie comme terme de référence pour les simulations présentées dans cette étude, parce qu'elle a les caractéristiques (durée, débit de pointe) les plus défavorables à l'efficacité du *surstockage*.

Le modèle calcule, avec un pas de temps d'une heure, la distribution spatiale de la *surcharge* hydraulique dans les différentes composantes du système : *surlacs*, lacs de gravière, aquifère des Alluvions anciennes, aquitard de la Craie supérieure et aquifère de la Craie inférieure.

À partir d'une distribution calculée de la *surcharge* hydraulique, le modèle évalue divers flux, en particulier les débits de fuite des *surlacs* vers le système aquifère.

La gestion hypothétique du système, pendant la crue de 1955, est représentée sur la figure 9.5. On distingue quatre phases :

1. *Remplissage* des casiers, de $t = 0$ h à $t = 121$ h ;
2. *Stockage passif*, de $t > 121$ h à $t = 217$ h. À la fin de cette phase, la pointe de crue de l'Yonne est parvenue à l'aval de Montereau, ce qui permet de relâcher l'eau stockée dans les casiers ;
3. *Vidange forcée*, de $t > 217$ h à $t = 455$ h. Cette vidange s'effectue en dix jours, à débit constant ($60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). L'eau des casiers est restituée à la Seine ;
4. *Relaxation* du système de $t > 455$ h à $t = 623$ h. Pendant cette phase, les casiers sont vides et le système aquifère n'évolue plus que sous l'influence de facteurs naturels.

Les figures 11.2 à 11.4 résument le fonctionnement du système ; elles montrent, à la même échelle, les débits injectés totaux (donnés) et les débits de fuite totaux (calculés). Ces figures correspondent

à la simulation de quatre options d'aménagement. La configuration des lacs de gravière est cependant toujours la même (état 2050) ; elle tient compte de la situation actuelle et des autorisations d'exploitation délivrées par l'État.

Les options d'aménagement sont : la présence ou l'absence des drains Nord et Sud, la présence ou l'absence d'écrans étanches verticaux sous certains tronçons de digues, et la pratique ou non de rabattements de nappe dans les zones habitées, exposées au plus grand risque supplémentaire d'inondation de caves.

L'évolution des débits de fuite s'analyse en phases, identiques à celles des injections :

1. Les débits de fuite des *surlacs* apparaissent dès le début des injections et atteignent leur maximum à la fin de la phase d'injection. Ils continuent à croître alors même que les débits injectés décroissent rapidement ;
2. Pendant la phase de stockage passif, les débits de fuite décroissent lentement, parce qu'ils sont contrôlés par la capacité d'ingestion du système aquifère, qui est faible ;
3. Pendant la phase de vidange forcée, la décroissance des débits de fuite devient rapide, comme celle des *surcharges* hydrauliques ;
4. Pendant la phase de relaxation, les *surlacs* sont vides et le système aquifère tend à reprendre le cours naturel de son évolution.

Les débits de fuite estimés, présentés sur les figures 11.1 à 11.4, sont ceux qu'ARMINES a préconisé de prendre en compte dans la modélisation hydraulique, dans le cadre de l'étude de faisabilité.

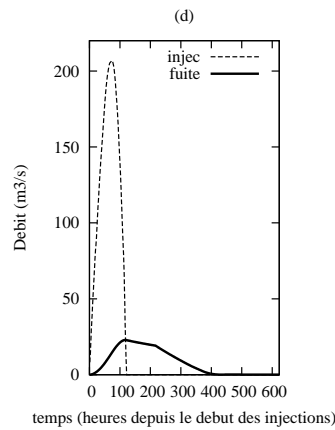


FIG. 11.1: Simulation 1 : débit injecté et débit de fuite. Hypothèses : gravières 2050, crue 1955, drains Nord et Sud, écrans, rabattements de nappe dans les villages bordiers.

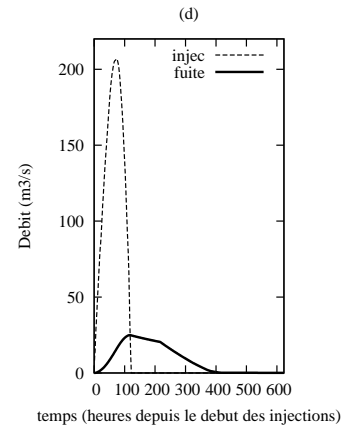


FIG. 11.2: Simulation 2 : débit injecté et débit de fuite. Hypothèses : crue 1955, gravières 2050, drains Nord et Sud traités en potentiels imposés, écrans, pas de rabattement de nappe dans les villages bordiers.

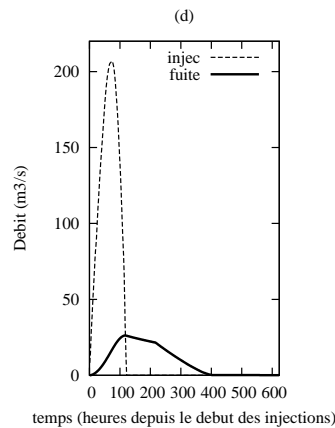


FIG. 11.3: Simulation 3 : débit injecté et débit de fuite. Hypothèses : gravières 2050, crue 1955, pas de drains Nord et Sud, pas d'écrans, pas de rabattements de nappe dans les villages bordiers.

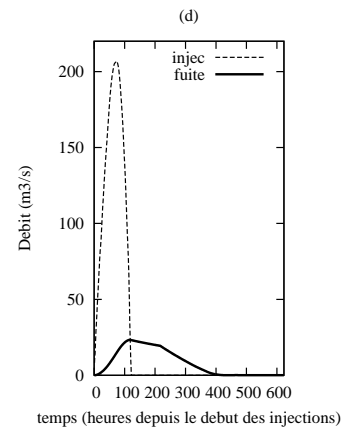


FIG. 11.4: Simulation 4 : débit injecté et débit de fuite. Hypothèses : crue 1955, gravières 2050, pas de drains Nord et Sud, écrans, pas de rabattement de nappe dans les villages bordiers.

Efficacité du *surstockage*

On peut estimer l'efficacité du *surstockage* à partir des débits injectés et des débits de fuite calculés par le modèle. On définit deux efficacités :

- l'*efficacité instantanée*, à un instant t , est le quotient, à cet instant, du débit de fuite et du débit injecté. Cette mesure de l'efficacité n'est définie que pendant la période d'injection. Elle est de 100 % au début des injections ($t = 0$), décroît à peu près linéairement jusqu'à l'instant

où le débit d'injection est maximum, puis tend vers une asymptote verticale au temps total de la phase d'injection ;

- l'*efficacité globale*, à un instant t , est le quotient du volume injecté et du volume perdu par fuites dans le système aquifère, depuis le début des injections ($t = 0$) jusqu'à l'instant t . À un instant t donné, l'efficacité globale est toujours supérieure à l'efficacité instantanée ; elle vaut 100 % au début des injections, puis décroît en tendant vers une valeur constante, atteinte à la fin de la phase de vidange forcée. Les casiers sont alors vides et les débits de fuite nuls. La valeur minimum de l'efficacité que l'on peut retenir est celle de la fin de la phase de stockage passif. Sur les courbes de variation de l'efficacité globale (*glob.*), le point correspondant est repéré par le symbole * (**fin**).

Les variations au cours du temps de l'efficacité instantanée et de l'efficacité globale sont représentées sur les figures 11.5 à 11.8, où les traits verticaux délimitent les quatre phases de la gestion du *surstockage*.

Le tableau 11.1 donne les valeurs de l'efficacité instantanée au moment où les débits d'injection sont maximum ($t = 74$ h, débit injecté total = $207 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

TAB. 11.1: Efficacité *instantanée* du *surstockage*
à l'instant où les injections sont maximum

Simulation	Efficacité (%)
1	92.9
2	92.3
3	91.9
4	92.8

Après trois jours d'injection à débit croissant, l'efficacité instantanée est supérieure à 92 %.

Le tableau 11.2 montre que l'efficacité globale, au début de la vidange forcée, est à peu près la même pour les quatre simulations ; elle est comprise entre 75 % et 80 %.

TAB. 11.2: Efficacité *globale* du *surstockage*
au début de la vidange forcée

Simulation	Efficacité (%)
1	79.2
2	77.5
3	76.2
4	78.8

Des tableaux plus détaillés de résultats sont donnés dans l'annexe J.

Amélioration de l'efficacité du *surstockage*

Ces estimations de l'efficacité globale sont des valeurs *minimum*. Elles supposent, en effet, qu'aucune mesure particulière n'a été prise en vue d'augmenter l'efficacité du *surstockage*. Or le modèle suggère qu'il est possible de le faire. En effet, les écoulements de fuite des *surlacs* apparaissent comme ayant une faible ampleur spatiale (figures 9.136, 9.137, 9.200, 9.201, 9.216, 9.217, 9.232 et 9.233). Ces écoulements ont une origine, qui est toujours une interface *surlac*-aquifère ; ils effectuent un parcours dans un milieu perméable, en particulier les Alluvions anciennes à l'aplomb des digues de ceinture ; ils réapparaissent dans un exutoire qui peut être un drain ou la surface du sol dans le cas de l'*exfiltration*. Il paraît possible d'augmenter l'efficacité globale du *surstockage* en agissant sur un ou plusieurs de ces éléments.

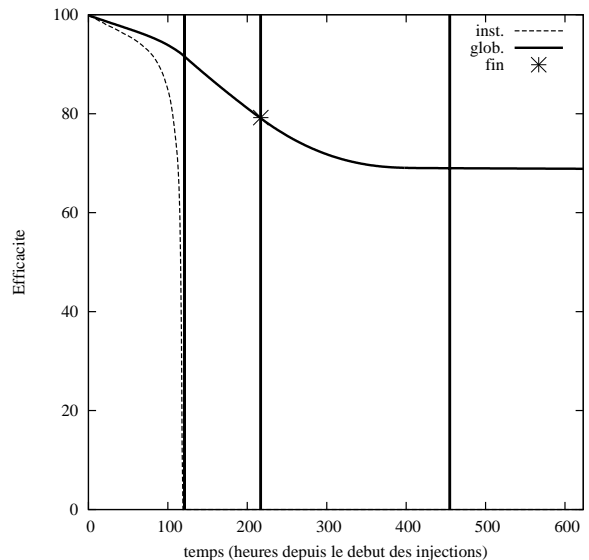


FIG. 11.5: Simulation 1 : efficacités instantanée (*inst.*) et globale (*glob.*) du *surstockage*. Hypothèses : gravières 2050, crue 1955, drains Nord et Sud, écrans, rabattement de nappe dans les villages bordiers.

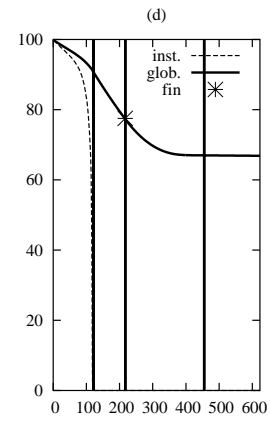


FIG. 11.6: Simulation 2 : efficacités instantanée (*inst.*) et globale (*glob.*) du *surstockage*. Hypothèses : crue 1955, gravières 2050, drains Nord et Sud traités en potentiels imposés, écrans, pas de rabattement de nappe dans les villages bordiers.

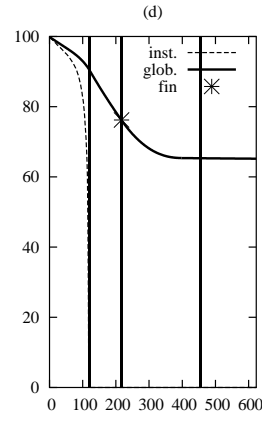


FIG. 11.7: Simulation 3 : efficacités instantanée (*inst.*) et globale (*glob.*) du *surstockage*. Hypothèses : gravières 2050, crue 1955, pas de drains Nord et Sud, pas d'écrans, pas de rabattement de nappe dans les villages bordiers.

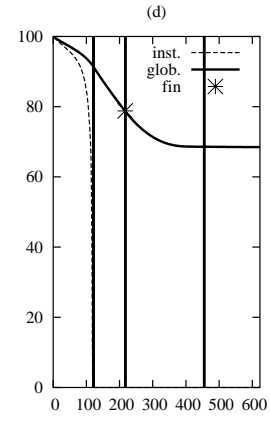


FIG. 11.8: Simulation 4 : efficacités instantanée (*inst.*) et globale (*glob.*) du *surstockage*. Hypothèses : crue 1955, gravières 2050, pas de drains Nord et Sud, écrans, pas de rabattement de nappe dans les villages bordiers.

La réduction des débits de fuite à leur point de départ consisterait à colmater certaines parties des interfaces *surlac*-aquifère. Ces interfaces peuvent être les Alluvions modernes ou soit les berges, soit le fond de certains lacs de gravière. Les conditions les plus favorables aux fuites par les parois des lacs de gravières sont aisément identifiables par un simple examen de la carte géographique. O. Schanen (1998) a mis en évidence l'efficacité du colmatage des berges, effectivement réalisé par les sociétés d'exploitation des granulats, lors des réaménagements de carrière. La localisation précise des fuites par les Alluvions modernes, hétérogènes, semble plus difficile. Un inconvénient de ce contrôle des débits de fuite « à la source » serait d'avoir un effet permanent sur les écoulements souterrains naturels.

La réduction des débits de fuite par action sur le parcours souterrain consisterait à remblayer certaines parties de certains lacs de gravière, celles qui sont très proches des drains, naturels ou artificiels. En augmentant ainsi ces distances, on agirait sur le gradient hydraulique et, éventuellement, sur la perméabilité. Une mesure similaire, faisant d'ailleurs partie des « options » d'aménagement simulées, est la mise en place d'écrans imperméables verticaux, atteignant la base des Alluvions anciennes.

La réduction des débits de fuite « à l'exutoire » consisterait à récupérer ces débits, là où ils réapparaissent, et à les réinjecter dans le casier le plus proche. Comme les débits de fuite ne sont pas pris en considération dans le dimensionnement des casiers, ces réinjections sont, en principe, possibles. Pour qu'il n'en soit pas ainsi, il faudrait que des précipitations *surcompensent* les fuites. On aurait alors à évacuer ces apports extérieurs excédentaires, de façon à permettre la réinjection dans les casiers des débits drainés, sans risque de débordement. La collecte des débits exfiltrés peut nécessiter un remodelage de la surface topographique à la périphérie externe des digues de ceinture. La maîtrise du niveau d'eau dans les drains collecteurs des débits de fuite constitue la principale garantie de neutralité du *surstockage* vis-à-vis du risque d'inondation de caves.

En définitive, le seul flux induit par les fuites et sur lequel on ne puisse envisager une action est le *suremmagasinement* dans le système aquifère. Comme ce terme est faible en valeur relative, et comme des entrées indépendantes (*sur*débits de l'Auxence et de la Voulzie), peuvent le compenser, il doit être possible d'augmenter considérablement l'efficacité globale du *surstockage* et de la porter à une valeur proche de 100 %.

Fiabilité des estimations du modèle

Il est actuellement difficile d'évaluer précisément la fiabilité des estimations, par le modèle, de l'efficacité du système de *surstockage*. Les données de perméabilité ne paraissent suffisantes que pour une première estimation raisonnable des débits de fuite. Pour pouvoir encadrer cette estimation par une fourchette de précision, il faudrait avoir des mesures concentrées à proximité des digues de ceinture des casiers et recueillies selon un plan d'échantillonnage qui garantisse leur représentativité. Ce qui donne un assez fort crédit aux estimations du modèle est que les options de modélisation qui auraient pu conduire à une *sous*-estimation des débits de fuite ont été soigneusement identifiées et rejetées. Cet argument n'est cependant pas absolu, pour deux raisons :

1. Le modèle n'est pas une représentation parfaite du système physique ; il comporte des simplifications dues, en particulier, à l'impossibilité d'observer le fonctionnement réel du *surstockage* ;
2. Il faudrait avoir une connaissance objective des paramètres hydrodynamiques du modèle (perméabilités, conductivités hydrauliques...) pour être certain que cette approche a effectivement conduit à une *surestimation* raisonnable des débits de fuite.

Il convient de remarquer que la modération des débits de fuite tient, en partie, à deux causes « structurelles », indépendantes des paramètres hydrodynamiques :

1. La configuration géométrique des casiers, en particulier leurs formes compactes et leurs grandes dimensions ;

2. La courte durée du *surstockage* comparativement aux constantes de temps caractéristiques du système aquifère.

Les dimensions et la configuration géométrique des casiers contribuent à limiter les débits de fuite. Ceux-ci prennent naissance le long du bord interne des digues. Progressivement, la zone des fuites s'étend vers le centre des casiers, mais cette extension s'effectue lentement. On note toujours, dans la partie centrale de chaque casier, la présence d'un plateau piézométrique qui correspond à une zone de stagnation de l'eau souterraine (figures 9.124, 9.125, 9.188, 9.189, 9.204, 9.205, 9.220 et 9.221).

Risques d'inondation de caves.

Le principal risque direct, lié aux écoulements souterrains, et sur lequel le modèle hydrogéologique peut apporter des précisions quantitatives, est celui d'inondation de caves dans les zones habitées situées en bordure de la plaine alluviale, à proximité des casiers.

Un tel risque existe déjà, du seul fait des fluctuations naturelles du niveau de la nappe phréatique. Si aucune précaution particulière n'était prise, le *surstockage* ne pourrait qu'accroître ce risque pendant les périodes de fonctionnement des casiers. Le modèle suggère cependant que des dispositifs hydrauliques appropriés, tant dans leur conception que dans leur gestion, sont susceptibles de réduire considérablement ce risque. Un effet de bord de ces dispositifs serait même de réduire le risque naturel. Il semble donc envisageable que le système de *surstockage* puisse être rendu neutre vis-à-vis du risque d'inondation de caves.

Le dispositif de protection des habitations contre les inondations de caves serait constitué de drains, naturels et artificiels. La condition pour que cette protection soit effective et indiscutable est que, depuis le commencement du remplissage des casiers jusqu'au commencement de la vidange forcée, les lignes d'eau dans ces drains soient maintenues constantes.

Aux points d'entrée de l'Auxence et de la Voulzie dans la Bassée, il faudrait dériver les excès de débit, par rapport à leur valeur à l'instant zéro du remplissage, et les injecter dans les casiers. Entre les points d'entrée de ces rivières dans la Bassée et leur point de confluence avec la Seine, il faudrait réinjecter les *surdébites* dans les casiers. Pour les drains artificiels (« drain Nord » et « drain Sud ») qu'il faudrait mettre en place à la périphérie externe de certains tronçons de digues de ceinture des casiers, il faudrait également réinjecter les *surdébites* dans les casiers. Ces dérivations et réinjections augmenteront très sensiblement l'efficacité du *surstockage*.

Faisabilité du Projet Bassée

La modélisation hydrogéologique suggère que le Projet Bassée est *faisable*. Les arguments suivants peuvent être avancés :

1. Les estimations actuelles des débits de fuite donnent des valeurs modérées, considérées comme acceptables ;
2. La modération de ces débits s'explique, en partie, par des facteurs géométriques (formes et dimensions des casiers) sur lesquels il n'y a guère d'incertitude ;
3. La plus grande partie des débits de fuite peuvent être récupérés. La récupération effective des *surdébites* et leur réinjection dans les casiers devrait conduire d'une part à une très grande efficacité du *surstockage*, d'autre part à sa neutralité hydraulique vis-à-vis de son environnement.

Ces conclusions sont évidemment conditionnées par l'état actuel des connaissances sur le contexte hydrogéologique du Projet Bassée. Cet état des connaissances semble suffisant pour effectuer des prédictions acceptables en première analyse. Par contre, pour des raisons qui tiennent à la quantité et, parfois, à la qualité des données, il ne permet pas d'encadrer les prédictions du modèle par une fourchette d'incertitude crédible.

Cette section décrit une logique probabiliste ¹ d'acquisition de données de terrain et de modélisation hydrogéologique qui doit permettre d'encadrer les prédictions du modèle par des intervalles de confiance.

Cadre méthodologique

D'une manière générale, le modéliste est confronté à deux types d'incertitudes : des incertitudes irréductibles, inhérentes à la complexité et à la variabilité de la nature elle-même, et des incertitudes *scientifiques* qui tiennent à l'imperfection des outils utilisés pour représenter les phénomènes de la nature et au nombre limité de données.

Les incertitudes scientifiques peuvent être réduites en raffinant le modèle, en acquérant des données supplémentaires et en analysant les données de façon plus pénétrante.

La nature et l'importance du Projet Bassée imposent de réduire progressivement l'incertitude scientifique. L'approche « bayésienne » fournit un cadre méthodologique qui, contrairement à l'approche déterministe, formalise le lien entre l'état d'information (données) et l'estimation quantitative de l'incertitude.

Cette démarche affecte les principales étapes de la modélisation :

- définition du cadre général de l'étude ;
- conceptualisation du système et construction du modèle ;
- calage du modèle ;
- réalisation de simulations prédictives.

Définition du cadre

Les buts de la modélisation du Projet Bassée, l'extension spatiale de la zone d'étude et l'horizon de temps sont bien définis.

Le niveau de caractérisation hydrogéologique du site dépend, en fait, du degré de tolérance à l'incertitude, qui n'est pas du ressort du modéliste. Le fait de pouvoir quantifier l'incertitude et d'en comprendre les principales conséquences peut conduire à une plus grande tolérance et permet de fixer une borne pratique aux besoins en données.

Conceptualisation du système

Le modèle conceptuel résume, sous diverses formes qui peuvent aller jusqu'à la mise en équations, les processus et les propriétés hydrogéologiques qui doivent être représentés dans le modèle parce qu'ils sont susceptibles d'influencer les résultats.

La conceptualisation hydrogéologique est basée sur l'identification des différentes échelles spatiale d'hétérogénéité de la perméabilité. Trois échelles d'espace sont particulièrement importantes : celle de l'ensemble de la zone d'étude du Projet Bassée, celle des mailles du modèle et l'échelle microscopique associée à l'émergence de la notion d'homogénéité.

À l'échelle supérieure, on a distingué trois unités hydrogéologiques et des « interfaces », comme les Alluvions modernes, qui ne sont pas des unités hydrogéologiques à proprement parler, mais dont la perméabilité ne peut qu'influencer les débits de fuite. À cette échelle, l'incertitude la plus importante semble résider actuellement dans la question du faciès et de la perméabilité de la partie supérieure de la Craie lorsqu'elle est recouverte par les Alluvions anciennes.

L'expérience hydrogéologique accumulée depuis des décennies suggère qu'à petite échelle, notamment dans les aquifères alluviaux, la perméabilité peut varier de plusieurs ordres de grandeur (=

¹Bernier J., E. Parent, J.-J. Boreux (2000). Statistique pour l'environnement : traitement bayésien de l'incertitude. Lavoisier.

puissances de 10) sur des distances de l'ordre du mètre, et que cette variabilité spatiale, structurée par la géologie, a une influence considérable sur les écoulements souterrains.

Pour décrire des structures aussi complexes, l'approche déterministe nécessiterait l'estimation d'un très grand nombre de paramètres, ce qui n'est guère envisageable dans un domaine étendu comme celui du Projet Bassée. La statistique classique, qui ignore les distances entre points de mesures et leur configuration relative, est impuissante à exprimer une structure de corrélations spatiales. L'alternative est de faire appel aux fonctions aléatoires spatiales, un outil mathématique puissant dont l'étude est l'objet de la géostatistique. À l'aide de ces outils on peut, en particulier, créer des images du champ d'une variable « régionalisée », telle que la perméabilité. Ces fonctions aléatoires sont caractérisées par des lois spatiales que l'on peut identifier à partir de mesures de terrain et d'informations de différentes natures. Le modèle de fonction aléatoire doit être le plus simple possible, et être adapté au but de l'analyse, ce qui suppose que l'on détermine quelle facette de la variabilité spatiale il convient de modéliser.

La démarche la plus efficace pour réduire les incertitudes scientifiques est, en définitive, de conditionner les fonctions aléatoires spatiales par des mesures de terrain.

À l'échelle intermédiaire des mailles, les perméabilités assimilables par le modèle hydrogéologique sont des moyennes sur des volumes de (50 m × 50 m × épaisseur) pour les Alluvions anciennes, (100 m × 100 m × épaisseur) pour la Craie supérieure et (200 m × 200 m × épaisseur) pour la Craie inférieure.

Il est donc indispensable que les techniques de mesure utilisées pour déterminer la perméabilité permettent aussi de connaître l'échelle spatiale de la mesure. La meilleure technique paraît être celle des essais de pompage avec piézomètres. Il existe d'autres techniques qui peuvent être intéressantes, dans des conditions de site particulières ou pour la facilité avec laquelle on peut les associer à des mesures géophysiques.

Un paramètre ignoré jusqu'ici, faute de données, est l'anisotropie de la perméabilité. Sa prise en considération pourrait contribuer à une meilleure estimation des débits de fuite. En effet, si l'axe majeur du tenseur de transmissivité coïncide, comme il est probable, avec l'axe longitudinal de la plaine alluviale, les écoulements de fuite, qui sont plutôt transversaux, s'effectueraient dans des directions de plus faible perméabilité. Pour pouvoir déterminer un tenseur de transmissivité par essai de pompage, il faut disposer d'au moins trois piézomètres.

Certaines méthodes géophysiques légères permettent d'accéder facilement à la conductivité électrique apparente des terrains superficiels, jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur. La mise en œuvre de ces méthodes électromagnétiques pourrait permettre de construire des images réalistes du réservoir des Alluvions anciennes. Une théorie récente, exposée dans les annexes M, N et O, ainsi que de nombreuses mesures de terrain, suggèrent qu'il existe une corrélation exploitable entre les conductivités électrique et hydraulique. Les progrès récents en matière de mesures électromagnétiques, en forage ou depuis la surface, permettent d'envisager, dans des conditions raisonnables, une prospection systématique de la zone où le modèle prédit l'existence de débits de fuite significatifs.

Des observations sédimentologiques, portant sur l'organisation spatiale des faciès, permettraient aussi d'affiner l'analyse quantitative des perméabilités.

Deux questions se posent :

1. Où faut-il faire des mesures de perméabilité ?
2. Quel doit être l'espacement des mesures ?

L'intérêt d'une mesure supplémentaire de perméabilité, ou de transmissivité, n'est pas le même partout dans la Bassée. Les simulations du fonctionnement du *surstockage* montrent que les trajets parcourus par les débits de fuite sont courts, de l'ordre de la largeur des digues de ceinture. Ces débits doivent donc être surtout sensibles aux perméabilités dans l'environnement proche des digues. Il faut donc concentrer les mesures de perméabilité des Alluvions anciennes à l'emplacement et au voisinage des digues de ceinture.

La question de l'espacement des points de mesure est plus délicate. Le meilleur modèle de variogramme que l'on puisse actuellement ajuster aux mesures (BRGM, 1965) de la transmissivité des Alluvions anciennes semble être un modèle « à effet de pépite ». Cela traduirait l'absence de corrélation dans la variabilité spatiale de la transmissivité, absence qui a de grandes chances de n'être qu'apparente. Elle s'expliquerait par le fait que la variabilité spatiale est caractérisée par des échelles de longueur qui sont inférieures à la plus petite distance entre points de mesure, soit environ 1 000 m. L'espacement des points de mesure devrait donc être inférieur à 1 000 m. Par ailleurs, dans un contexte alluvial, comme celui de la Bassée, on s'attend à ce que, lorsque l'échelle spatiale des mesures de perméabilité augmente, des types nouveaux de variabilité soient pris en compte, du fait de la plus grande diversité des processus sédimentologiques à l'origine de la perméabilité. Le variogramme devrait alors croître indéfiniment ; l'espacement minimum des points de mesure serait alors déterminé par la dimension des mailles. L'espacement minimum serait donc de 50 m et l'espacement maximum de 1 000 m.

Mais la réalisation de mesures électromagnétiques et hydrauliques « coopératives », c'est-à-dire comparables parce qu'effectuées à la même échelle d'espace, est susceptible de fournir des images de la structure de la perméabilité des Alluvions anciennes. Si cette combinaison de techniques est productive, les mesures locales de la perméabilité (essais de pompage...) serviraient à étalonner la corrélation, prévue par la théorie, entre les logarithmes des conductivités électrique et hydraulique. L'intérêt de cette option tient à ce que les mesures hydrauliques sont intensives et les mesures électromagnétiques extensives.

Avant d'appliquer systématiquement cette méthode, il faudrait vérifier l'existence effective de corrélations et leur stabilité dans l'espace. Il faut donc prévoir une phase préliminaire d'expérimentation et de mise au point méthodologique, comportant des mesures depuis la surface et des mesures en forages.

Calage

Il est actuellement impossible de confronter les prédictions du modèle à des observations du comportement du système de *surstockage*, puisque celui-ci n'existe pas. La fiabilité de ces prédictions repose donc essentiellement sur la véracité des paramètres hydrodynamiques du modèle, en particulier de la perméabilité dans la partie de la Bassée affectée par des débits de fuite. D'où l'importance cruciale d'une caractérisation suffisante de ces perméabilités par des mesures de terrain appropriées, seule méthode permettant actuellement de quantifier l'erreur sur les estimations des débits de fuite par le modèle.

Prédictions

Les prédictions ne sont vraiment satisfaisantes que si on peut leur associer des intervalles de confiance, et ce d'une manière qui reflète les incertitudes qui ont été accumulées, et reconnues, au différents stades de la modélisation. Il faut tenir compte (i) des effets de la variabilité spatiale et du nombre limité des données, (ii) des insuffisances du modèle conceptuel, (iii) de la discrétisation en mailles et (iv) de ce dont il n'a pas été tenu compte dans la modélisation. Ce faisant, il faut veiller à ne pas introduire de biais qui pourraient conduire, en particulier, à une sous-estimation des débits de fuite et de leurs conséquences.

L'encadrement des prédictions du modèle par des intervalles de confiance peut être réalisé en utilisant des techniques géostatistiques éprouvées, les estimations conditionnelles et les simulations conditionnelles. L'idée est de remplacer la réalité unique par de nombreuses images également vraisemblables et qui la représentent aussi bien que les données disponibles permettent de le faire. Toutes ces images ont la même structure de corrélation spatiale et honorent les données. On utilise chacune d'elles pour simuler les écoulements, comme si elle était la réalité. On analyse ensuite les résultats de ces simulations pour en tirer, en termes probabilistes, des quantifications de l'incertitude sur les prédictions du modèle.

L'avantage principal de l'approche bayésienne est de n'être pas limitée par la complexité des phénomènes, du moment qu'ils sont observables/mesurables, ni par la géométrie du domaine. Le conditionnement des simulations par des données de différentes natures et de différentes qualités permet, en définitive, de situer le modèle sur l'échelle qui va de l'incertitude complète au déterminisme pur. L'apport de nouvelles données introduit des contraintes supplémentaires qui permettent de réduire la fourchette d'incertitude.

Esquisse d'un programme d'acquisition de mesures hydrogéologiques

Pour accroître la fiabilité des prédictions du modèle et la quantifier, on peut recommander l'acquisition de données supplémentaires portant sur les points suivants :

1. L'hétérogénéité des Alluvions modernes ;
2. La perméabilité des Alluvions anciennes ;
3. Les faciès et la perméabilité de la partie supérieure de la Craie recouverte par les Alluvions anciennes.

Une cartographie de l'épaisseur et de la nature des constituants des Alluvions modernes, accompagnée de mesures de la perméabilité de ces constituants, permettrait de situer dans l'espace l'origine de certains débits de fuite. Elle aiderait aussi à l'implantation de *casiers expérimentaux* qui permettraient de mesurer certains paramètres hydrodynamiques à une échelle spatiale hectométrique et qui, surtout, offriraient des données concrètes sur le fonctionnement du système de *surstockage*.

La construction d'images détaillées de la structure de la perméabilité des Alluvions anciennes paraît nécessaire et techniquement possible dans des conditions raisonnables.

Le problème du rôle de la Craie supérieure doit pouvoir être clarifié par une combinaison de mesures géophysiques et de mesures locales de la différence de charge hydraulique entre les Alluvions anciennes et la Craie inférieure.

Ce programme de mesures de terrain doit être réalisé prioritairement à l'emplacement, et dans l'environnement proche, des digues de ceinture des casiers.