

Chapitre 8

Modèle hydrogéologique

Introduction

Considéré sous son aspect hydrogéologique, le problème de la faisabilité du Projet Bassée est un problème d'écoulement souterrain dans un système aquifère hétérogène. On peut donc faire appel aux techniques qui sont habituellement utilisées pour modéliser ce type d'écoulement. Le problème de la Bassée sort cependant de l'ordinaire parce que l'existence de nombreux lacs de gravière introduit un type d'hétérogénéité qui n'a que rarement une telle ampleur. Un exemple comparable est celui de la vallée de la Somme. De plus, le fonctionnement des casiers devrait, par épisodes relativement brefs, perturber la structure normale des écoulements souterrains dans la Bassée aval.

Le système de casiers n'existe actuellement qu'à l'état virtuel. Comme on ne peut observer son fonctionnement, il est impossible de s'assurer de la validité des résultats du modèle. On sera donc amené à se demander si ces résultats ne sont pas erronés d'un facteur 2, 3...

La seule preuve absolue de la faisabilité consisterait à construire effectivement le système de casiers, à le faire fonctionner, à y apporter les améliorations suggérées par l'expérience, et à observer son comportement à long terme.

L'ambition de la modélisation est de faire, provisoirement, l'économie d'un tel essai « en vraie grandeur » en simulant le fonctionnement du système. La confiance que l'on peut accorder à un modèle mathématique d'un système virtuel, dont l'équivalent ne semble pas exister, repose sur une appréciation :

- des bases théoriques de la modélisation ;
- de la conceptualisation du système ;
- de la représentation de l'espace ;
- de la représentation des paramètres physiques du modèle ;
- de l'habileté du modéliste.

Certaines de ces considérations auront une influence déterminante sur la construction du modèle.

Bases théoriques. Le modèle hydrogéologique du système de *surstockage* dans la Bassée aval est fondé sur deux piliers : le principe de conservation de la matière et la loi de Darcy.

La loi de Darcy n'est valide que pour certains types de milieux et pour certaines conditions d'écoulement. Le milieu aquifère doit satisfaire les conditions suivantes :

- la phase solide forme une matrice ayant des propriétés de cohésion mécanique ;
- les pores élémentaires sont interconnectés, ce qui permet le passage de l'eau dans un réseau interstitiel très étendu ;
- les plus petites dimensions interstitielles sont grandes par rapport au libre parcours moyen des molécules ;
- les dimensions des interstices sont suffisamment petites pour que l'orientation des surfaces de contact entre deux fluides immiscibles dépende *quasi* exclusivement des forces interfaciales.

Les trois premières conditions sont certainement satisfaites dans la Bassée. On suppose que la quatrième, qui exclut les conduits de grande section, éventuellement karstiques, l'est aussi. Les reconnaissances géophysiques effectuées dans le cadre du Projet Bassée semblent écarter un tel risque. Elles n'ont cependant été que partielles, et n'ont pas un pouvoir de résolution suffisant pour voir, par exemple, des fractures. Il subsiste donc un risque d'erreur « radicale », probablement marginal, qui ne pourra être évalué qu'en complétant la reconnaissance par géophysique et en effectuant des essais avec des casiers expérimentaux. La loi de Darcy n'est applicable aux milieux fracturés, comme la Craie inférieure, que si la densité de fracturation est relativement élevée. Parmi les risques d'erreur radicale, il y a celui lié à l'existence de fractures ignorées.

Pour que la loi de Darcy soit valide, il faut que le gradient de charge hydraulique ne soit pas trop grand. Des écarts à la loi de Darcy apparaissent lorsque les forces d'inertie auxquelles sont soumises les particules d'eau interstitielle deviennent non négligeables en comparaison des autres forces.

Toutes les observations de terrain, toutes les données géologiques, géophysiques et hydrogéologiques, suggèrent que ces conditions sont satisfaites par le système aquifère de la Bassée aval.

La représentation de l'espace et les options d'aménagement. L'espace géographique de la zone du Projet Bassée est remarquablement bien connu, à la date des relevés photogrammétriques (AXIS-CONSEIL). Cette connaissance risque d'être assez rapidement dépassée, parce que les exploitations des granulats, entre autres, modifient sans cesse la géographie de la zone du Projet. La configuration future de la Bassée, dans l'hypothèse d'une réalisation effective du Projet, est une question ouverte. De nombreuses options d'aménagement et de gestion peuvent avoir une influence sur l'efficacité hydraulique du système. Par exemple on peut envisager de :

- réinjecter dans les casiers les débits de fuite récupérables ;
- imperméabiliser, par un apport de matériaux limoneux ou argileux, les zones où les Alluvions modernes sont réduites à un mince horizon de terre végétale ;
- colmater ceux des interfaces lac de gravière–Alluvions anciennes qui sont des points de fuite importants ;
- modifier la forme de certains lacs de gravière proches de la Seine, de l'Auxence, de la Voulzie ou d'éventuels drains artificiels.

Au stade actuel de l'étude du Projet, on peut considérer ces options comme des raffinements. Nous nous en tiendrons à une version de base, dans laquelle l'espace géographique ne subit pas d'autre modification que la construction du système de casiers.

Les paramètres du modèle. Il y a un modèle physique à l'intérieur du modèle mathématique ; c'est la représentation de ceux des paramètres du milieu aquifère (perméabilité, porosité...) qui interviennent dans les équations du modèle. Ce modèle physique ne peut qu'être approximatif, parce que :

- les milieux naturels sont d'une inépuisable complexité ;
- les mesures possibles sont limitées, en nombre et en qualité ;
- la représentation elle-même est problématique (effet d'échelle, mesure et prise en compte de l'anisotropie...);
- le modèle physique peut être déterministe ou probabiliste, selon les données disponibles et les objectifs de la modélisation.

En définitive, la confiance que l'on peut accorder à un ensemble de paramètres d'un modèle dépend de la capacité que l'on a d'estimer l'incertitude sur ces paramètres.

On peut classer les paramètres du modèle hydrogéologique en deux catégories :

- paramètres *géométriques* : limites d'extension horizontale des composantes du système aquifère, profondeurs, épaisseurs... ;
- paramètres *hydrodynamiques* :
 - paramètres caractérisant la capacité du milieu aquifère à emmagasiner de l'eau : porosité, coefficient d'emmagasinement ;

- paramètres caractérisant la mobilité de l'eau sous l'action de gradients de charge hydraulique : perméabilité, conductivité hydraulique, transmissivité.

La plupart des paramètres géométriques de la Bassée peuvent être considérés comme connus avec une assez bonne précision.

Les paramètres d'emménagement, plus précisément de *suremménagement*, ne devraient pas jouer un rôle important. En effet, les casiers devraient ne fonctionner qu'en période de très fort débit de la Seine. Comme le bassin de la Seine, à l'amont de la Bassée, est presque exclusivement constitué de terrains perméables, *a priori* défavorables au ruissellement, on peut supposer que ces débits extrêmes ne peuvent se produire que si les nappes phréatiques, dont celle de la Bassée, ont atteint un niveau de remplissage particulièrement élevé. En période de fonctionnement des casiers, le système aquifère de la Bassée ne devrait donc être en mesure que de stocker des quantités supplémentaires insignifiantes d'eau souterraine. Un effet de *suremménagement* ne devrait se produire que dans la partie libre de la Craie inférieure.

Ce sont les perméabilités qui sont les paramètres cruciaux du système et du modèle. Les aquifères alluviaux ont une importance particulière en hydrogéologie ; ils ont donc été l'objet de nombreuses études. Les mesures ont souvent montré que, dans un aquifère alluvial :

- les perméabilités sont généralement réparties sur plusieurs ordres de grandeur ;
- la loi de distribution statistique du logarithme de la perméabilité est gaussienne ;
- la perméabilité possède une variabilité spatiale qui dépend de la structure interne et de l'organisation des unités sédimentaires qui constituent l'aquifère.

Si la Bassée semble, apparemment, faire exception à ces règles, ce peut être un effet de la non représentativité statistique des données.

L'habilité du modéliste. La modélisation hydrogéologique est un art d'exercice délicat, où les difficultés abondent. Les données peuvent être ambiguës, les conditions dans lesquelles elles ont été recueillies, et les raisons pour lesquelles elles l'ont été, peuvent être oubliées. La plupart des problèmes à résoudre n'ont pas une solution unique. L'habilité du modéliste consiste à constamment apprécier : (i) ce qui est physiquement possible, plausible ou impossible, (ii) ce qui est important, secondaire ou négligeable, (iii) la signification exacte des données, (iv) la meilleure forme à donner au modèle.

Il est aussi essentiel de maîtriser la complexité du modèle. Dans le cas présent, cela se traduira, notamment, par l'utilisation du *principe de superposition*, qui est justifiée si le système physique est invariant et linéaire. Le grand avantage du principe de superposition est qu'il permet de considérer les évolutions naturelle et forcée du système comme indépendantes et additives. En pratique, il suffira de connaître les règles essentielles de la gestion du système de *surstockage* pour pouvoir calculer les *surcharges* hydrauliques attribuables aux seuls casiers. Le problème des conditions initiales se résout de la façon la plus simple qui soit : à l'instant initial $t = 0$, les *surcharges* hydrauliques sont nulles en tout point du système (solution triviale de l'équation de Boussinesq).

Principes de construction du modèle

Les échanges eaux de surface–eaux souterraines sont beaucoup plus importants et diversifiées dans la Bassée aval que dans la plupart des autres systèmes aquifères. Le modèle doit être capable de représenter ces échanges dans toutes les configurations où ils se produisent. Cela suppose, en particulier, que chaque lac de gravière et chaque *surlac* soit représenté par une et une seule maille. Un lac de gravière ou un *surlac*, quelle que soit sa forme, sera donc *une* maille du modèle, dotée d'une charge hydraulique variant au cours du temps en fonction des entrées et des sorties d'eau.

La représentation du système aquifère en trois couches répond à la conceptualisation qui en a été faite. Elle signifie que l'influence du *surstockage* peut se propager dans les Alluvions anciennes, dans la Craie supérieure et dans la Craie inférieure.

Le modèle doit donc être celui d'un système complexe, dont les composantes sont : deux aquifères, un aquitard, des dizaines de lacs de gravière, dix *surlacs*, trois rivières principales, plusieurs annexes hydrauliques de la Seine, des drains artificiels.

Le nombre de paramètres intervenant dans la modélisation d'un tel système est considérable (plusieurs centaines de milliers).

Discrétisation de l'espace

L'espace du système aquifère réel est *continu* ; celui du modèle est *discret* :

- on ne calcule la valeur de la charge hydraulique qu'en un nombre fini de points qui sont les centres de *mailles*. La *discrétisation* est l'opération qui consiste à découper l'espace continu en mailles ;
- la charge hydraulique d'une maille est la valeur moyenne de la charge hydraulique dans l'espace représenté par cette maille.

Le pouvoir de résolution d'un modèle, c'est-à-dire la dimension caractéristique des détails que le modèle est capable de restituer est lié à la dimension des mailles. Il est souhaitable, de ce point de vue, que les mailles soient aussi petites que possible. D'un autre côté, le nombre de paramètres, la durée des calculs et les contraintes graphiques augmentent avec le nombre de mailles. Il faut donc trouver un compromis entre pouvoir de résolution et maniabilité du modèle.

Nous avons retenu les deux principes de discrétisation suivants :

1. Discrétiser la couche des Alluvions anciennes avec des mailles raisonnablement petites ;
2. Augmenter la taille des mailles, de la couche des Alluvions anciennes vers la couche de la Craie inférieure.

Le tableau 8.1 donne les dimensions horizontales des mailles des trois couches du modèle.

Couche	Dimension des mailles
Alluvions anciennes	50 m × 50 m
Craie supérieure	100 m × 100 m
Craie inférieure	200 m × 200 m

Les mailles de la couche des Alluvions doivent être suffisamment petites pour représenter les forts gradients hydrauliques que le *surstockage* d'eau dans les casiers induiront localement ; il faut aussi qu'elles permettent de représenter les différents lacs de gravière, indépendamment les uns des autres. Cette exigence pourrait conduire à des dimensions de mailles excessivement petites, parce que certains lacs de gravière sont séparés d'un lac voisin par un cordon d'alluvions de quelques mètres de largeur seulement. Dans de tels cas, peu nombreux, plusieurs lacs de gravière ont été fusionnés dans le modèle.

Des informations complémentaires sur les maillages sont données dans l'annexe T.

Maillages des Alluvions. L'un des objectifs du modèle est de déterminer l'influence des lacs de gravière sur les débits de fuite des casiers. La configuration des lacs de gravière évolue constamment. Cette évolution continue ne peut être reconstituée exactement. On peut cependant la résumer par quelques cartes datées, qui seront utilisées pour la construction des maillages. Il y aura donc autant de maillages des Alluvions possibles que de configurations d'ensemble des lacs de gravière. Le tableau 8.2 donne les caractéristiques des six maillages des Alluvions construits pour cette étude. Tous ces maillages ont même extension géographique ; seuls varient les détails internes (lacs de gravière).

Les figures 8.1 et 8.2 représentent les maillages 2010 et 2050 des Alluvions anciennes. Tous les maillages des Alluvions anciennes représentent le même domaine spatial ; leurs limites sont exactement les mêmes.

TAB. 8.2: Caractéristiques des maillages des Alluvions anciennes
Variante

Paramètre	0000	1965	2003	2010	2050	9999
<i>lacs</i>	0	8	126	130	114	78
<i>surlacs</i>	10	10	10	10	10	10
<i>n_may_Alluv</i>	26346	26269	23088	22974	20958	16489
<i>n_may_cr_sup</i>	6586	6586	6586	6586	6586	6586
<i>n_may_cr_inf</i>	4813	4813	4813	4813	4813	4813
<i>nvB0_max</i>	1831	1831	1274	1274	942	1
<i>nvN1_max</i>	0	7	28	28	35	49
<i>nvS1_max</i>	0	7	28	28	35	49
<i>nvO1_max</i>	0	7	42	42	50	71
<i>nvE1_max</i>	0	7	42	42	50	71
<i>nvB1_max</i>	0	8	68	68	140	481
<i>i_max_1</i>	480	480	480	480	480	480
<i>j_max_1</i>	400	400	400	400	400	400
<i>i_max_2</i>	240	240	240	240	240	240
<i>j_max_2</i>	200	200	200	200	200	200
<i>i_max_3</i>	120	120	120	120	120	120
<i>j_max_3</i>	100	100	100	100	100	100
<i>couche_max</i>	3	3	3	3	3	3
<i>lac_max</i>	130	130	130	130	130	130
<i>surlac_max</i>	10	10	10	10	10	10

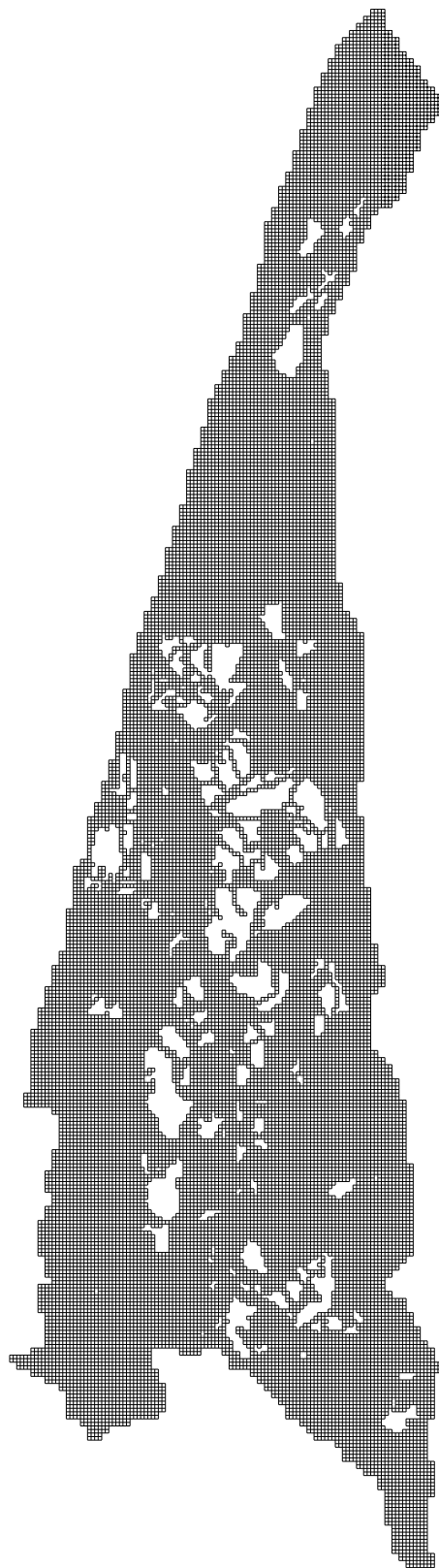


FIG. 8.1: Maillage des Alluvions anciennes, variante 2010. Les gravières qui étaient ouvertes sur la Seine en 2003 ne communiquent plus avec elle.

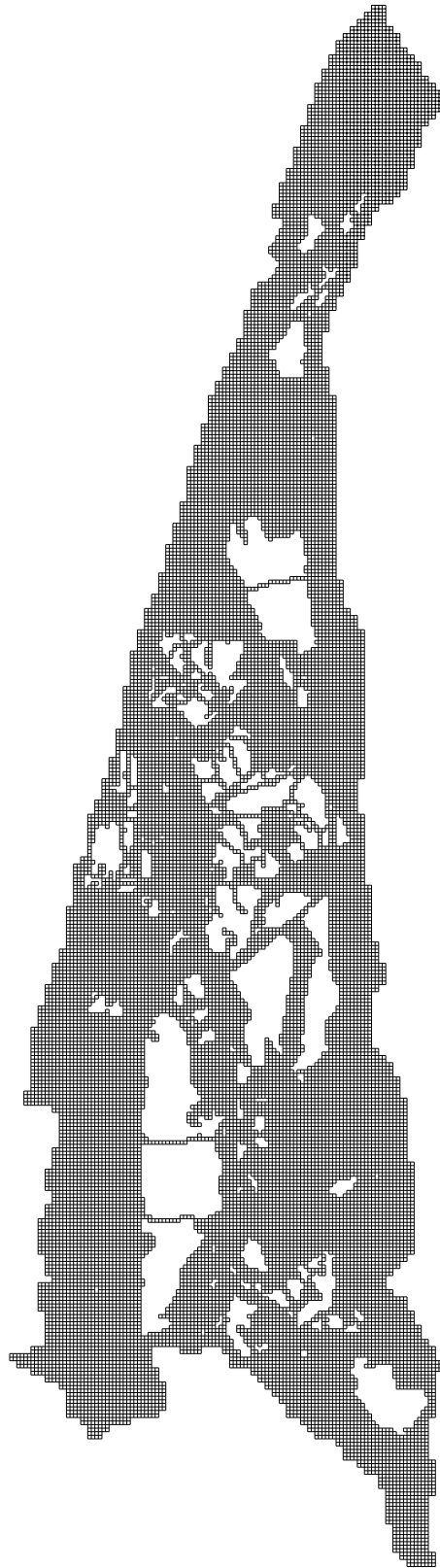


FIG. 8.2: Maillage des Alluvions anciennes, variante 2050. Les exploitations de granulats autorisées en 2001 sont réalisées.

Maillage de la Craie supérieure. Le maillage, unique, de la Craie supérieure a exactement les mêmes limites que les différents maillages de la couche des Alluvions anciennes. Il représente la partie supérieure, réputée peu perméable, de la Craie sous-alluviale. Toutes les mailles de la Craie supérieure ont des mailles voisines vers le haut, dans la couche des Alluvions anciennes, et vers le bas, dans la couche de la Craie inférieure.

Maillage de la Craie inférieure. Le maillage de la Craie inférieure est, lui aussi, unique ; son extension géographique correspond à l'espace qui va du rebord du plateau d'Ile-de-France à la ligne de partage des eaux Seine-Yonne, de Monterau à Bray-sur-Seine.

Les trois couches du modèle

Aquifère des Alluvions anciennes

La couche des Alluvions anciennes est perforée de nombreux lacs de gravière. Chaque lac de gravière d'une taille supérieure à celle d'une maille standard (50 m × 50 m) est représenté, dans le modèle, par une *maille-lac* dont le contour est une ligne brisée, constituée de segments « horizontaux » et « verticaux » jointifs, de 50 m de longueur. Cette ligne brisée épouse au mieux la forme du contour du lac de gravière.

Il faut établir une équation de bilan des flux pour chaque type de maille de la couche des Alluvions anciennes, c'est-à-dire :

- pour les *mailles-aquifère* représentant un prisme vertical d'Alluvions anciennes. On associe à ces mailles la valeur moyenne de chaque paramètre dans les espaces tri-dimensionnels qu'elles représentent ;
- pour les *mailles-lacs* représentant un des lacs de gravière. Ces mailles peuvent être considérées comme résultant de la fusion d'au moins deux mailles-aquifère, chacune ayant au moins un côté en commun avec une autre maille faisant partie de la représentation du même lac.

Chaque équation de bilan, d'une maille-aquifère ou d'une maille-lac, comporte des termes de flux horizontaux et des termes de flux verticaux.

Composantes horizontales des flux

Flux horizontaux Alluvions ⇔ Alluvions. Ce terme est présent dans une équation de bilan des flux d'une maille-aquifère lorsqu'elle a une face verticale en commun avec une autre maille-aquifère.

Soit C et V deux mailles-aquifère ayant une face en commun ; V peut prendre les valeurs N (nord), S (sud), E (est) ou O (ouest).

Le flux horizontal Q_{VC} échangé, à un instant donné, entre la maille C et la maille V est calculé en appliquant la loi de Darcy :

$$Q_{VC} = K_{VC}^h \times (\ell \times E_{VC}) \times \frac{H_V - H_C}{\ell} \quad (8.1)$$

K_{VC}^h est la conductivité hydraulique horizontale applicable aux flux échangés entre la maille C et la maille V ; E_{VC} est l'épaisseur moyenne des Alluvions anciennes dans la surface de contact verticale entre les mailles C et V ; H_C est la charge hydraulique moyenne dans la maille C ; H_V est la charge hydraulique moyenne dans la maille V ; ℓ est à la fois la longueur du côté d'une maille ($\ell = 50$ m en l'occurrence) et la distance entre les centres des mailles C et V.

K_{VC}^h dépend symétriquement de la conductivité hydraulique horizontale de la maille C et de celle de la maille V. Dans le modèle, une formule de composition harmonique des conductivités hydrauliques est utilisée. La moyenne harmonique de deux valeurs est toujours proche de la plus petite.

Flux horizontaux lac \Leftrightarrow Alluvions anciennes. Considérons une maille–lac L ; elle est toujours complètement entourée de mailles–aquifère. Les échanges d'eau entre le lac de gravière et l'aquifère se font à travers une interface dont la perméabilité contrôle les débits de fuite qui la traversent. Cette perméabilité est donc un paramètre potentiellement important du modèle. Un colmatage physique, chimique ou biologique, peut affecter ces interfaces lac–aquifère. La réalité de ce phénomène, sa nature et son intensité, sont actuellement inconnues. On peut cependant estimer que l'injection d'eau de crue de la Seine dans les casiers devrait se traduire par un colmatage progressif des interfaces lac de gravière–aquifère. L'eau qui entrera horizontalement dans l'aquifère des Alluvions anciennes à travers une interface colmatée traversera successivement deux milieux :

- l'interface colmatée qui peut être représentée par une couche de perméabilité réduite et de faible épaisseur ;
- les Alluvions anciennes, dont la perméabilité n'est pas affectée par le colmatage.

La conductivité hydraulique horizontale équivalente de ces deux milieux en série par rapport à la composante horizontale de l'écoulement est la moyenne harmonique des leurs conductivités hydrauliques horizontales, pondérées par leurs épaisseurs. L'épaisseur d'alluvions est égale à la longueur du demi–côté de la maille (25 m), moins l'épaisseur de la couche de colmatage interfaciale.

Une maille–lac L a n_N^L mailles voisines dans la direction « Nord », n_S^L mailles voisines dans la direction « Sud », n_E^L mailles voisines dans la direction « Est » et n_O^L mailles voisines dans la direction « Ouest ». Une maille–aquifère peut être voisine d'une maille–lac dans plusieurs directions. Le débit échangé entre un lac et l'aquifère des Alluvions anciennes est la somme algébrique des débits échangés entre la maille–lac correspondante et celles des mailles–aquifère qui ont une face commune avec elle :

$$Q_{al}^L = Q_{NL}^L + Q_{SL}^L + Q_{EL}^L + Q_{OL}^L \quad (8.2)$$

$$= \sum_{i=1}^{n_N^L} Q_{NL_i}^L + \sum_{j=1}^{n_S^L} Q_{SL_j}^L + \sum_{k=1}^{n_E^L} Q_{EL_k}^L + \sum_{l=1}^{n_O^L} Q_{OL_l}^L \quad (8.3)$$

$Q_{NL_i}^L$ est le débit qui traverse la surface de contact entre la maille–lac L et la i -ième maille–aquifère voisine, vers le Nord, du lac L .

Pour évaluer ce débit, il faut considérer que, de part et d'autre de l'interface aquifère–lac, les charges hydrauliques sont H_{NL_i} et H_L . Le débit Q_{NL_i} est donné par la loi de Darcy :

$$Q_{NL_i} = K_{NL_i} (\ell \times E_{NL_i}) \frac{H_{NL_i} - H_L}{\ell/2} \quad (8.4)$$

K_{NL_i} est la conductivité hydraulique horizontale applicable au débit échangé entre le lac et la i -ième maille voisine vers le nord ; ℓ est la longueur du côté de la maille ($\ell = 50$ m) ; E_{NL_i} est l'épaisseur saturée dans l'interface du lac et de sa i -ième maille voisine vers le nord ; H_{NL_i} est la charge hydraulique moyenne dans la i -ème maille voisine du lac L , vers le nord ; H_L est la charge hydraulique du lac à l'instant considéré.

H_L et H_{NL_i} sont deux inconnues.

K_{NL_i} est la moyenne harmonique des conductivités hydrauliques horizontales des Alluvions de la maille et de la couche de colmatage, pondérées par leurs épaisseurs respectives :

$$\frac{\ell/2}{K_{NL_i}} = \frac{(\ell/2) - \varepsilon_{N_i}}{K_{N_i}^h} + \frac{\varepsilon_{N_i}}{\kappa_{N_i}^h} \quad (8.5)$$

Flux horizontaux Alluvions \Leftrightarrow Seine. Dans la zone d'étude, le canal à grand gabarit a succédé à la Seine naturelle, entre Marolles et Bray. On peut distinguer :

- le *lit mineur*, aujourd'hui partiellement artificialisé : canal à grand gabarit, dragages, protections de berges, barrages de navigation... ;
- les anciens méandres qui communiquent seulement par l'aval avec le canal à grand gabarit ;

- les lacs de gravière en communication directe avec la Seine ou le canal à grand gabarit ;
- le lit majeur qui, avant la construction du canal à grand gabarit, était fréquemment inondé, éventuellement sur toute la largeur de la plaine alluviale. On estime à $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le débit maximum qui peut transiter par le canal à grand gabarit.

En dehors des périodes de débordement, la « Seine » est donc constituée :

- d'un tronçon naturel entre Marolles et Montereau ;
- du canal à grand gabarit entre Marolles et Bray ;
- des anciens méandres ;
- des lacs de gravière en communication directe avec le fleuve.

La Seine est une limite du système aquifère, puisqu'elle correspond à un changement radical de la nature du milieu physique . C'est une limite interne parce que ce changement se produit à l'intérieur du domaine d'extension des Alluvions anciennes. On la considère dans le modèle comme une limite à charge hydraulique imposée. Cela revient à admettre que les altitudes du fil d'eau de la Seine sont indépendantes de l'état du système aquifère. En d'autres termes, les niveaux d'eau dans la Seine ne sont pas affectés par les flux échangés entre la Seine et le système aquifère. Pour le modèle, la Seine est une réserve d'eau, toujours capable de fournir au système aquifère l'eau que celui-ci « demande » et toujours capable de recevoir du système aquifère l'eau que celui-ci « offre ». L'intensité et le sens des échanges Seine–aquifère dépendent des gradients de charge hydraulique du côté aquifère de l'interface Seine–aquifère.

Les charges hydrauliques dans les anciens méandres et dans les gravières ouvertes sont uniformes ; leur valeur est, à chaque instant, l'altitude du fil d'eau de la Seine au droit de la section par laquelle celle-ci communique avec l'annexe considérée.

Pour faciliter la gestion des conditions aux limites correspondant à la Seine, celle-ci a été maillée. Cependant, les mailles qui représentent la Seine n'ont en commun avec les mailles des Alluvions anciennes que leurs caractéristiques géométriques (dimensions, coordonnées Lambert du centre) et une charge hydraulique dont la valeur est indépendante de l'état du système aquifère.

Flux Alluvions \Leftrightarrow Auxence/Voulzie. L'Auxence et la Voulzie sont deux petits affluents pérennes de la Seine. Dans la Bassée aval, ces rivières coulent directement sur les Alluvions anciennes, sans les entailler notablement. On ne connaît pas de manière détaillée quelles sont les relations entre ces rivières et la nappe. Les jaugeages de l'Auxence montrent que celle-ci draine la nappe des Alluvions anciennes. À proximité de la confluence avec la Seine, le débit de l'Auxence augmente brusquement, ce qui ne peut s'expliquer que par la discontinuité du fil d'eau de la Seine de part et d'autre du barrage de Marolles. Du point de vue de la modélisation, l'essentiel est qu'en période de fonctionnement des casiers, il y ait continuité hydraulique entre ces rivières et la nappe des Alluvions anciennes, ce qui ne fait aucun doute. Au voisinage de l'Auxence et de la Voulzie, les lignes de courant de l'écoulement souterrain dans les Alluvions anciennes doivent avoir une structure *tridimensionnelle*. La composante verticale de la vitesse macroscopique augmente avec la proximité à l'axe de ces rivières. Dans sa version actuelle, le modèle ne peut représenter que des écoulements *bidimensionnels* dans les aquifères. Il faut néanmoins tenir compte du changement de structure des écoulements souterrains à proximité immédiate des drains superficiels que sont l'Auxence et la Voulzie. Pour cela, on introduit un type particulier de condition aux limites, appelé « condition de drain », illustré par la figure 8.3.

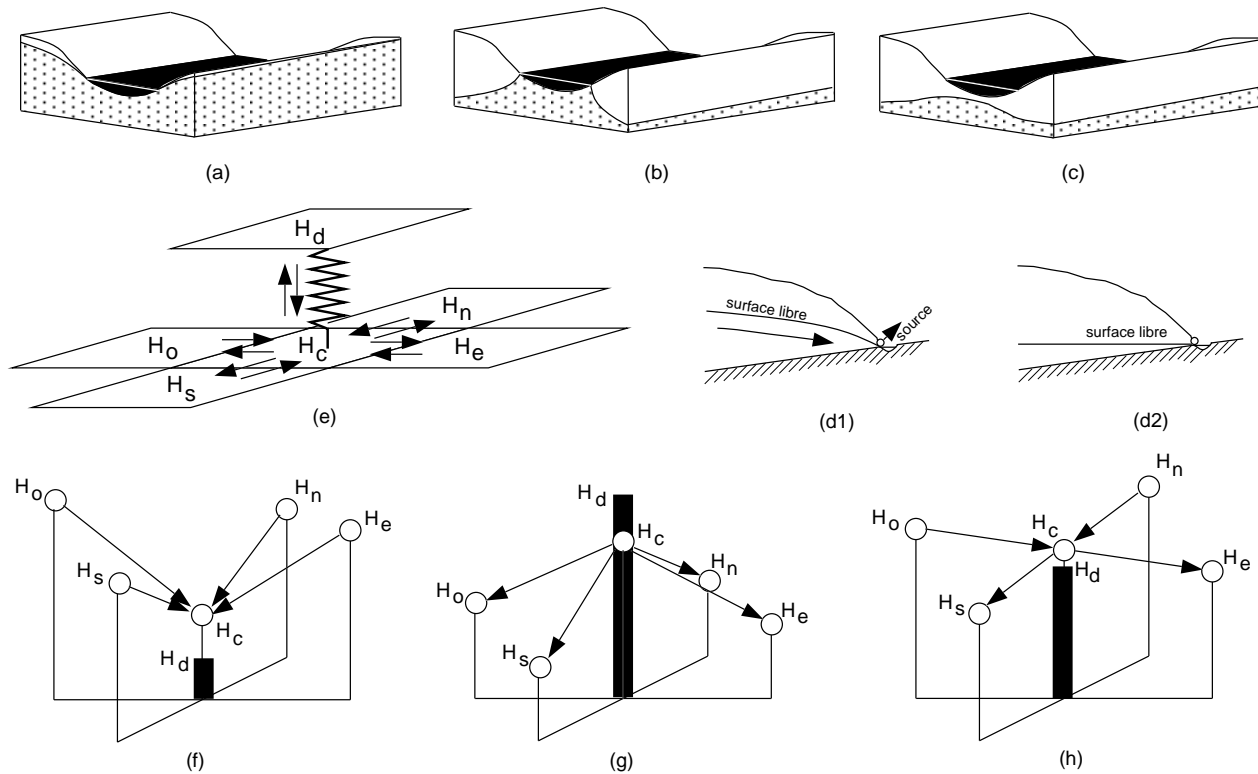


FIG. 8.3: Condition de drain. (a) : aquifère drainé par un cours d'eau ; (b) : aquifère drainant un cours d'eau ; (c) : cours d'eau rechargeant un aquifère à travers sa surface libre ; (d1) : source de débordement ; (d2) : source tarie ; (e) : schéma d'une maille connectée à un drain ; (f) : convergence des écoulements vers le drain fonctionnant comme un puits ($H_d < H_c$) ; (g) : divergence des écoulements à partir d'un drain fonctionnant comme une source ($H_d > H_c$) ; (h) : ($Q_{nc} + Q_{oc}$) < ($Q_{sc} + Q_{ec}$) : le drain fonctionne comme un puits faible ($H_c > H_d$).

Les cinq mailles des figures 8.3-(f), -(g) et -(h) sont les mailles C, N, S, E et O de la couche des Alluvions anciennes. Le drain associé à la maille C est représenté par une cote de drainage H_d et un coefficient de drain C_d . L'équation de bilan des flux d'une maille des Alluvions anciennes connectée à un drain s'écrit :

$$T_{nc}(H_n - H_c) + T_{oc}(H_o - H_c) + T_{sc}(H_s - H_c) + T_{ec}(H_e - H_c) + K_d A_d \frac{H_d - H_c}{e_d} = A_c \frac{\Delta H_c}{\Delta t} + q_c \quad (8.6)$$

K_d est la conductivité hydraulique du milieu poreux à travers lequel se produisent les échanges aquifère–drain ; cette conductivité est représentée par une résistance sur la figure 8.3-(e) ; A_d est l'aire de l'interface aquifère–drain dans la maille C ; H_d est la charge hydraulique dans le drain, au droit de la maille C ; H_c est la charge hydraulique des Alluvions anciennes dans la maille C ; q_c est le débit injecté ou prélevé dans la maille C. $K_d A_d / e_d$ est un paramètre hybride, mêlant des facteurs géométriques et hydrauliques ; c'est le *coefficient de drain* C_d .

$$\boxed{T_{nc}(H_n - H_c) + T_{oc}(H_o - H_c) + T_{sc}(H_s - H_c) + T_{ec}(H_e - H_c) + C_d(H_d - H_c) = A_c \frac{\Delta H_c}{\Delta t} + q_c} \quad (8.7)$$

En régime permanent, $\Delta H_c / \Delta t = 0$ et

$$\boxed{T_{nc}(H_n - H_c) + T_{oc}(H_o - H_c) + T_{sc}(H_s - H_c) + T_{ec}(H_e - H_c) + C_d(H_d - H_c) = q_c} \quad (8.8)$$

Aquitard de la Craie supérieure

Une maille de la Craie supérieure peut avoir, dans le plan de cette couche, de une à quatre voisines, géométriquement identiques. Dans la direction verticale, il faut tenir compte de la contrainte selon laquelle deux lacs différents de la couche des Alluvions anciennes ne peuvent avoir, au plus, qu'un point en commun.

Une composante horizontales du flux, entrant ou sortant d'une maille de la Craie supérieure, est décrite par :

$$\begin{aligned} Q_{\text{vc}} &= K_{\text{vc}} \times ((2\ell) \times E_{\text{vc}}) \frac{H_{\text{v}} - H_{\text{c}}}{2\ell} \\ &= K_{\text{vc}} E_{\text{vc}} (H_{\text{v}} - H_{\text{c}}) \\ &= T_{\text{vc}} (H_{\text{v}} - H_{\text{c}}) \end{aligned}$$

Une maille C de la couche de la Craie supérieure a comme voisines vers le haut : n_{A} mailles-aquifère (50 m \times 50 m) de la couche des Alluvions anciennes et n_{L} mailles-lacs. n_{A} peut valoir 4, 3, 2 ou 1, et n_{L} peut valoir 1 ou 2. n_{A} et n_{L} ne sont pas indépendants, du moins si $n_{\text{L}} > 0$. Le débit échangé entre la maille C de la Craie supérieure et la maille H des Alluvions anciennes s'écrit

$$Q_{\text{HC}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{A}}} K_{\text{HC}_i} \times A_{\text{HC}_i} \frac{H_{\text{H}_i} - H_{\text{C}}}{E_{\text{HC}}} + \sum_{l=1}^{n_{\text{L}}} K_{\text{HL}_l} A_{\text{LC}_l} \frac{H_{\text{L}_l} - H_{\text{C}}}{E_{\text{LC}}}$$

$K_{\text{HC}_i}^{\text{v}}$ est la conductivité hydraulique verticale applicable aux échanges entre la maille H et la maille C. C'est une moyenne harmonique des conductivités hydrauliques verticales $K_{\text{H}_i}^{\text{v}}$ et K_{C}^{v} des mailles H_i et C, pondérées par leurs dimensions verticales. A_{HC_i} est l'aire de la surface horizontale de contact entre les deux mailles superposées.

Lorsqu'une maille de la Craie supérieure est recouverte par l'aquifère des Alluvions, on calcule la moyenne harmonique des conductivités hydrauliques verticales des deux mailles, pondérées par leurs épaisseurs saturées.

Lorsqu'une maille de Craie supérieure est recouverte par une maille-lac, on suppose que le fond du lac est tapissé par une couche de colmatage, caractérisée par une épaisseur $\varepsilon_{\text{LC}_l}$ et par une conductivité hydraulique verticale $\kappa_{\text{LC}_l}^{\text{v}}$.

Aquifère de la Craie inférieure

Dans le modèle, la Craie inférieure est considérée comme un aquifère et représentée par une couche unique, discrétisée en mailles de 200 m \times 200 m. Une maille de la couche de la Craie inférieure peut être recouverte par 0, 1, 2, 3 ou 4 mailles de la Craie supérieure. Les maillages sont cependant construits de telle manière que ce nombre soit toujours 0 ou 4.

Si une maille de la Craie inférieure a 0 voisine vers le haut, c'est qu'elle se trouve dans la zone de Craie sub-affleurante, donc à l'extérieur de la plaine alluviale. L'écoulement souterrain dans la Craie est *quasi* horizontal. Les échanges avec l'atmosphère (infiltration, évapo-transpiration) correspondent à des flux dans la partie non saturée de la Craie. Ce sont des termes source/puits indépendants de l'état de la nappe.

Si une maille de la Craie inférieure a 4 voisines dans la Craie supérieure, l'équation de bilan des flux de cette maille comportera quatre termes de flux verticaux, en plus des termes horizontaux, puisqu'il y a continuité hydraulique entre la Craie supérieure et la Craie inférieure.

Surlacs

Un *surlac* correspond à l'eau de Seine stockée à l'intérieur d'un casier délimité par des digues supposées étanches. L'espace intérieur de chaque casier comporte plusieurs lacs de gravière.

Dans le modèle, un *surlac* est représenté par *une* maille à laquelle est associée une charge hydraulique variant en fonction des entrées et des sorties d'eau. La charge hydraulique d'un *surlac* est l'altitude du plan d'eau dans ce *surlac* à un instant donné. Les entrées physiques seraient :

- les débits injectés depuis la Seine ;
- les débits de fuite récupérés dans l'Auxence, la Voulzie et les drains artificiels ;
- les précipitations reçues dans l'emprise des casiers.

Les sorties physiques seraient :

- les débits de fuite « hydrogéologiques » à travers l'interface *surlac*–aquifère constitué d'une mosaïque de trois types de surfaces :
 1. La surface du sol, c'est-à-dire le toit des Alluvions modernes ;
 2. Les parois des lacs de gravière, constituées d'Alluvions anciennes, éventuellement colmatées ;
 3. Le fond des lacs de gravière, constitué de la superposition d'une couche de sédiments déposés au fond du lac, et du toit de la Craie supérieure.
- les débits de fuite « géotechniques » à travers les digues. Le modèle ne calcule pas ces écoulements ;
- les débits de vidange forcée.

Il est important de comptabiliser les débits de fuite hydrogéologiques en distinguant ces trois voies.

L'équation de bilan des flux d'un *surlac* tient compte des lacs de gravière et des Alluvions modernes qui seront submergés par lui. On suppose que les lacs de gravière situés à l'intérieur d'un casier perdent leur identité dès le début du remplissage de ce casier. Ils n'ont plus de charge hydraulique ; seul le *surlac* qui les submerge en a une.

Terminologie

Les *injections* sont les débits pompés dans la Seine, puis répartis dans les différents casiers. Chaque casier reçoit une fraction, proportionnelle à sa surface interne, du débit total prélevé dans la Seine.

Les *fuites* sont les débits qui, à un instant donné, sortent des *surlacs* pour entrer dans l'une des composantes du système aquifère. Elles peuvent se produire à travers trois types d'interfaces :

- l'interface Alluvions modernes–atmosphère (surface topographique naturelle) ;
- l'interface Alluvions anciennes–lacs de gravière ;
- l'interface Craie supérieure–lacs de gravière.

Un *bilan* est une comptabilité des flux qui, à un instant donné, traversent les limites d'un domaine spatial défini conventionnellement. Symboliquement, pour le domaine spatial considéré, à chaque instant :

$$\boxed{\text{Débit entrant} - \text{débit sortant} = \text{Variation de volume par unité de temps} + \text{terme source/puits}}$$

Une maille est le plus petit espace pour lequel on puisse faire un bilan. L'ensemble du système est le plus grand espace pour lequel on puisse faire un bilan. Les bilans globaux se rapportent à un espace ainsi défini :

- la *limite supérieure* est constituée de :
 - l'interface Alluvions modernes–atmosphère ;
 - l'interface Alluvions anciennes–eau libre (Seine, Auxence, Voulzie, drain Nord et drain Sud, lacs de gravière) ;
 - l'interface Craie supérieure–eau libre (Seine et lacs de gravière).
- les *limites latérales* sont les limites d'extension géographique des couches du modèle ;
- la *limite inférieure* est le mur de la Craie inférieure. Il importe peu que cette surface ne soit pas précisément définie.

Les *entrées* du bilan global sont les débits de fuite des *surlacs*.

Les *sorties* du bilan global peuvent être classées en trois rubriques :

1. Les débits drainés par la Seine, l'Auxence, la Voulzie et, éventuellement, le drain Nord et le drain Sud ;
2. Les débits exfiltrés ;
3. Les augmentations du volume d'eau emmagasiné dans le système aquifère.

L'*efficacité hydraulique* du *surstockage* caractérise l'aptitude des casiers à conserver l'eau. On peut définir deux efficacités du *surstockage* :

1. L'efficacité *instantanée* au temps t :

$$E_{\text{inst.}}(t) = 100 - \left(\frac{q_{\text{fuite}}(t)}{q_{\text{inject.}}(t)} \times 100 \right), \quad t > t_0 \quad (8.9)$$

t_0 est le temps auquel débutent les injections d'eau de Seine dans les casiers ; $q_{\text{fuite}}(t)$ est le débit de fuite total au temps t ($t \geq t_0$) ; $q_{\text{inject.}}(t)$ est le débit injecté total au temps t ($t \geq t_0$).

2. L'efficacité *globale* au temps $t \geq t_0$:

$$E_{\text{glob.}}(t) = 100 - \left(\frac{\int_{t_0}^t q_{\text{fuite}}(t) dt}{\int_{t_0}^t q_{\text{inject.}}(t) dt} \times 100 \right), \quad t > t_0 \quad (8.10)$$

C'est le quotient, exprimé en pourcent, du volume « perdu » (fuites) et du volume injecté, depuis t_0 jusqu'à $t > t_0$. L'intervalle de temps à considérer commence au début du remplissage des casiers ($t = t_0$) et se termine au début de la vidange forcée ($t = 217$ h dans le cas de la crue de 1955 pris comme référence pour les simulations). En effet, les débits de fuite pendant la vidange forcée des casiers sont neutres du point de vue de l'efficacité globale du *surstockage*, puisque celui-ci n'a plus de raison d'être. La définition pratique de l'efficacité *globale*, dans le cas de la crue de 1955, sera donc :

$$E_{\text{glob.}}^*(t) = 100 - \left(\frac{\int_{t_0}^t q_{\text{fuite}}(t) dt}{\int_{t_0}^t q_{\text{inject.}}(t) dt} \times 100 \right), \quad t_0 < t \leq 217 \text{ h} \quad (8.11)$$

$E_{\text{inst.}}(t)$, $E_{\text{glob.}}(t)$ et $E_{\text{glob.}}^*(t)$ sont exprimés en pourcent ; plus ces pourcentages sont élevés, plus le système de *surstockage* est performant.

Conclusion

La construction d'un modèle hydrogéologique original, capable de représenter, avec une parfaite cohérence, sinon avec un parfait réalisme, les différentes facettes du système de la Bassée aménagée, caractérisée par la coexistence d'éléments artificiels (*surlacs*, lacs de gravière, canal à grand gabarit) et d'éléments naturels (aquifères, méandres) permettra d'apporter des réponses aux questions d'ordre hydrogéologique posées par le Projet Bassée.

L'évaluation de l'efficacité hydraulique du système de *surstockage* suppose, outre la connaissance des débits injectés, celle des débits de fuite qui traversent les interfaces *surlac*-aquifères. Le modèle peut fournir la valeur globale des débits de fuite, leur répartition par *surlac* et, pour chaque *surlac*, la répartition par type d'interface.

L'évaluation des risques sur l'environnement, en particulier les habitations bâties à proximité immédiate de la plaine alluviale, suppose la connaissance des *surcharges* hydrauliques induites dans toutes les composantes du système aquifère par le *surstockage* d'eau dans les casiers. Le modèle peut calculer directement ces *surcharges* hydrauliques, pour une suite d'instantanés consécutifs et pour

toutes les mailles du modèle. On peut donc cartographier la distribution spatiale de ces *surcharges* hydrauliques à différents instants.

Des dispositifs hydrauliques, naturels ou artificiels, sont susceptibles, s'ils sont gérés correctement, de garantir la neutralité du système de stockage vis à vis des risques d'inondation de caves. Le modèle peut, dans une certaine mesure, simuler un fonctionnement imparfait de ces dispositifs.