

Chapitre 9

Simulations du fonctionnement du système de *surstockage*

Ce chapitre présente les résultats de simulations visant à évaluer la faisabilité hydrogéologique du Projet Bassée.

Approche déterministe vs. probabiliste

Approche déterministe

Le seul calage actuellement possible du modèle hydrogéologique de la Bassée consisterait à ajuster les transmissivités et les coefficients d'emmagasinement, dans le but de faire coïncider les charges hydrauliques mesurées dans les piézomètres et les charges hydrauliques calculées dans les mailles correspondantes. Il s'agit d'un *problème inverse* dont la résolution permettrait d'avoir un modèle des écoulements souterrains *naturels* à l'échelle de la Bassée. Cette approche présente des difficultés bien connues^{1 2 3} : de tels problèmes sont « mal posés » ; ils n'ont pas une solution unique et sont instables vis-à-vis de faibles variations des paramètres initiaux. La configuration de la Bassée est telle que des pertes importantes, au moins en valeur relative, se produiront dans des secteurs géographiquement peu étendus, qui se situeront dans des zones d'insensibilité du calage. Les mailles proches de limites à condition de type drain ou potentiel imposé ne peuvent qu'être très peu sensibles à des variations des paramètres de calage, parce que leur charge hydraulique est fortement contrainte du fait précisément de la proximité de ces limites. Or les lacs de gravière situés à l'intérieur d'un casier et proches de la Seine, de l'Auxence ou de la Voulzie seront des sites privilégiés des débits de fuite : la perméabilité est maximum et le gradient hydraulique l'est aussi. La sensibilité au calage serait la plus faible là où il faudrait qu'elle soit la plus forte. On ne peut donc attendre d'un calage, au sens habituel du terme, une garantie de précision dans l'estimation des débits de fuite.

Approche probabiliste

Une autre approche, de nature probabiliste, est possible. Elle s'appuie sur les mesures de la perméabilité plutôt que sur celles de la charge hydraulique. L'idée initiale est que le champ de perméabilité peut être interprété comme la réalisation d'une *fonction aléatoire spatiale* dont il est possible de déterminer les caractéristiques les plus importantes en utilisant des mesures de terrain. Après que cette inférence statistique ait été réalisée, on peut générer un nombre virtuellement infini de réalisations de cette fonction aléatoire. Ces réalisations, différentes les unes des autres, ont en commun les propriétés

¹Tikhonov A., Arsénine V. (1976). Méthodes de résolution de problèmes mal posés. Mir.

²Sun N.-Z. (2000). Inverse Problems in Groundwater Modeling. Kluwer Academic Publishers.

³Tarantola A. (2004). Inverse Problems. Theory and Methods for Model Parameter Estimation. *Society for Industrial and Applied Mathematics*.

simulations du fonctionnement du système

statistiques inférées à partir des mesures de terrain. On peut interpréter les différentes réalisations comme des distributions spatiales également plausibles des paramètres du modèle. En entrant ces distributions dans le modèle, et en effectuant autant de simulations, dites « de Monte-Carlo », que de distributions calculées, on obtient des résultats (débits de fuite calculés) que l'on peut interpréter en termes probabilistes. Un avantage de cette approche est que la prise en considération de nouvelles mesures de perméabilité ne conduit jamais à une moins bonne précision des estimations des débits de fuite.

Principe de superposition

L'application du principe de superposition permet de séparer ce qui, dans la dynamique du système physique, est *naturel* et ce qui est *artificiel*. La composante naturelle serait l'évolution en l'absence du système de *surstockage*; la composante artificielle, superposée à la précédente, serait l'évolution due au *surstockage* d'eau dans les casiers. L'application du principe de superposition permet de ne calculer que les *surcharges* hydrauliques dues au *surstockage* d'eau dans les casiers. Cette approche offre deux avantages considérables :

1. L'extrême simplicité et la parfaite rigueur des conditions initiales ;
2. L'élimination du modèle de facteurs aléatoires tels que les précipitations, le ruissellement et l'évapo-transpiration ;
3. L'absence d'ambiguïté dans l'interprétation des résultats des simulations, puisque tout ce qui est calculé se rattache au seul fonctionnement du système de *surstockage*.

L'application du principe de superposition est légitime si le modèle est invariant et linéaire. En pratique, les paramètres du modèle ne doivent pas dépendre de la charge hydraulique qui, elle, doit dépendre linéairement des paramètres du modèle. Ces conditions devraient être satisfaites en période de précipitations surabondantes, génératrices d'une forte crue dans le bassin de la Seine, parce que le remplissage de la nappe phréatique devrait alors, selon toute vraisemblance, être proche de son maximum. Les paramètres hydrodynamiques seraient alors indépendants des charges hydrauliques et le système aquifère aurait alors un fonctionnement linéaire.

Le moteur unique de la composante artificielle de l'évolution du système aquifère est l'injection d'eau de Seine dans les casiers.

Hypothèses

Lacs de gravières

La configuration géographique des lacs de gravière à l'intérieur des casiers devrait avoir une influence importante sur l'efficacité hydraulique du *surstockage*. Parmi les configurations possibles, nous avons, pour effectuer les simulations, retenu celle de « 2050 » qui tient compte des autorisations d'exploitation déjà délivrées.

Drains en périphérie des casiers

Les *surcharges* hydrauliques générées par le *surstockage* se propageront dans les différentes composantes du système aquifère, dont la partie libre de la Craie inférieure. Il en résulterait un accroissement du risque d'inondation de caves dans les habitations situées en bordure de la plaine alluviale. Un tel risque existe déjà, du seul fait des fluctuations naturelles du niveau de la nappe phréatique. Seul le risque supplémentaire, attribuable au *surstockage* d'eau dans les casiers, peut être évalué par le modèle. Deux questions se posent :

1. Les *surcharges* hydrauliques générés par les casiers augmenteront-elles significativement le risque global d'inondation de caves ?

2. Peut-on limiter ou empêcher la propagation de ces *surcharges* hydrauliques en direction des habitations exposées à ce risque ?

Pour que le Projet Bassée soit neutre vis-à-vis du risque d'inondation de caves, il faut que les *surcharges* hydrauliques dues au *surstockage* soient nulles dans les zones les plus exposées. Le moyen hydraulique le plus simple pour parvenir à ce résultat serait constitué de drains entaillant les Alluvions anciennes. Ces drains permettraient de rabattre la surface de la nappe des Alluvions anciennes. Leur gestion consisterait à maintenir constante la cote de drainage pendant toute la durée du *surstockage*. Ces drains, s'ils pouvaient aussi rabattre la surface libre de la nappe de la Craie aux abords de la plaine alluviale, contribueraient à réduire le risque *naturel* d'inondation de caves.

Les cartes piézométriques disponibles montrent que la Seine, l'Auxence et la Voulzie sont des drains naturels de la nappe des Alluvions anciennes. En période de *surstockage*, les niveaux d'eau dans l'Auxence et la Voulzie devront donc être gérées pour qu'ils ne varient pas. Le problème est différent dans le cas de la Seine, parce que les pompages effectués pour le remplissage des casiers devraient suffire à stabiliser sa cote. La configuration géographique des drains naturels ne permettrait pas d'assurer toutes les protections nécessaires. Entre certains casiers et certaines zones habitées, il n'existe aucun drain naturel. Il faudra donc, dans ces situations, créer des drains artificiels.

Les drains, naturels ou artificiels, pourraient être utilisés, moyennant des corrections locales de la pente topographique, pour collecter les débits exfiltrés à la périphérie des digues de ceinture des casiers.

Dans le modèle, les drains peuvent être représentés par une série de mailles à *surcharge* hydraulique imposée (à la valeur 0 m) ou par une série de mailles à condition de drain. Ces deux représentations ne sont pas équivalentes.

Représenter un drain par une série de mailles à *surcharge* hydraulique imposée revient à supposer *a priori* un fonctionnement parfait des drains. Le risque supplémentaire d'inondation de caves ne pourrait qu'être nul, puisque les *surcharges* hydrauliques seraient contraintes de ne pas se propager au-delà des drains.

La représentation d'un drain par une série de mailles à condition de drain ne signifie pas, *a priori*, un fonctionnement parfait des drains. Des *surcharges* hydrauliques pourraient se propager au delà des drains. Le risque ne serait pas éliminé *a priori* par ce qui pourrait être considéré comme un artifice de modélisation.

Dans le modèle, les deux drains artificiels, complémentaires de l'Auxence et de la Voulzie, sont :

- le *drain Nord*, situé à la marge Nord des Alluvions. Il protégerait les habitations situées en bordure de la plaine alluviale, à l'ouest de Châtenay-sur-Seine ;
- le *drain Sud*, qui coïncide avec la partie amont de l'ancien canal de navigation Bray-la Tombe.

Dans le modèle, les drains, naturels ou artificiels, sont subdivisés en *biefs* ; chaque bief correspond à un tronçon de drain situé en regard d'un casier particulier. La définition des biefs n'est utilisée que dans la comptabilité des *sur*débits drainés.

Valeurs des paramètres hydrodynamiques

Le principe de la méthode de Monte-Carlo est de construire une caractérisation probabiliste des débits de fuite en réalisant une série de simulations dans lesquelles on utilise différentes réalisations *équiprobables* de la variabilité spatiale des paramètres hydrodynamiques auxquels les débits de fuite devraient être les plus sensibles. Ceci suppose (i) que l'on dispose de données suffisamment nombreuses pour pouvoir caractériser statistiquement cette variabilité et (ii) que ces données soient statistiquement représentatives, c'est-à-dire résultent d'un échantillonnage objectif. Ces deux conditions ne semblent pas être satisfaites par les données actuellement disponibles. Il ne semble pas que l'on soit, actuellement, en position de pouvoir spécifier, de manière crédible, l'incertitude attachée aux prédictions des débits de fuite. Par contre, les mêmes considérations suggèrent qu'il est possible de raisonnablement *surestimer* les débits de fuite, ce qui est suffisant au stade de l'étude de faisabilité.

Transmissivités des Alluvions anciennes. Les essais de pompage effectués par le BRGM (1965) ont été, au moins pour la moitié d'entre eux, réalisés dans des sites délibérément choisis, parmi près de 260 sites reconnus par sondage, pour leurs caractéristiques *a priori favorables* à une exploitation intensive de l'aquifère. Les forages dans lesquels ont eu lieu ces essais étaient crépinés dans les Alluvions anciennes *et* dans la partie supérieure de la Craie. Pour éviter de *sous-estimer* les débits de fuite, nous avons supposé que les transmissivités ainsi mesurées, ne se rapportent qu'aux Alluvions anciennes. Les résultats de ces essais indiquent que la transmissivité est apparemment distribuée selon une loi uniforme : même nombre de transmissivités mesurées dans un ensemble de classes de même largeur. Il nous a semblé que l'introduction d'une plus grande variabilité spatiale des transmissivités irait dans le sens d'une plus grande vraisemblance. C'est pourquoi, pour effectuer les simulations, nous avons adopté une loi de distribution log-normale. Nous nous donnons une transmissivité moyenne $T_{\text{moy}} = 3 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ et une transmissivité $T_{\text{max}} = 1 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ à plus deux écarts-types de la moyenne. Nous calculons T_{min} à moins deux écarts-types, puis les coefficients de la transformation de Box-Muller. Nous calculons ensuite, au moyen d'un générateur de nombre aléatoires, une transmissivité pour chaque maille de la couche des Alluvions anciennes. Cette distribution n'a pas de structure spatiale, elle est purement aléatoire. La réalité est très certainement différente, mais les données sont insuffisantes pour la caractériser autrement que de cette manière assez grossière.

Pour chaque simulation de Monte Carlo, une nouvelle distribution des transmissivités dans les mailles est générée. Les principales propriétés statistiques d'ensemble ne varient cependant pas d'une simulation à l'autre, ce qui permet de comparer leurs résultats.

Perméabilités verticales des Alluvions modernes. Dans le modèle, la loi de distribution statistique de la perméabilité verticale des Alluvions modernes est celle de la figure 6.9.

Perméabilités verticales de la Craie inférieure. Dans le modèle, ces perméabilités sont supposées avoir une distribution log-normale, 95 % d'entre elles se situant dans l'intervalle $[10^{-6} \text{ m s}^{-1}, 10^{-7} \text{ m s}^{-1}]$.

Débits injectés dans les *surlacs*

HYDRATEC a déterminé, pour les quatre crues majeures du bassin de la Seine pendant le vingtième siècle (1910, 1924, 1955 et 1982), les débits d'écrêtement qui, en supposant l'existence du système de *surstockage* et une prévision *quasi* parfaite de la crue, auraient été prélevés dans la Seine et injectés dans les casiers.

Les figures 9.1 à 9.4 représentent ces quatre « hydrogrammes ». Ils se distinguent par le temps de montée, la durée, le nombre de pics et la valeur du ou des maximum.

Parmi ces quatre crues historiques, celle de 1955 devrait produire les débits de fuite les plus élevés : pic maximum ($220 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) et durée normale (122 heures). Nous choisissons donc comme critère hydrogéologique de faisabilité l'efficacité globale correspondant à la crue de 1955. La figure 9.5 montre les débits de remplissage et de vidange correspondant à cette crue.

Résultats

Simulations de Monte-Carlo

Une série de simulations de Monte-Carlo ont été réalisées en faisant varier les champs de perméabilité des Alluvions modernes, des Alluvions anciennes et de la Craie supérieure. Le nombre de calculs réalisées dans chaque série de simulations est d'environ cent, ce qui a assuré une convergence satisfaisante en probabilité. Pour chaque valeur du temps écoulé depuis le début de l'injection d'eau dans les casiers, on a calculé :

- le débit de fuite dépassé dans 50 % des cas ;
- les débits de fuite dépassés et non dépassés dans 75 % des cas ;

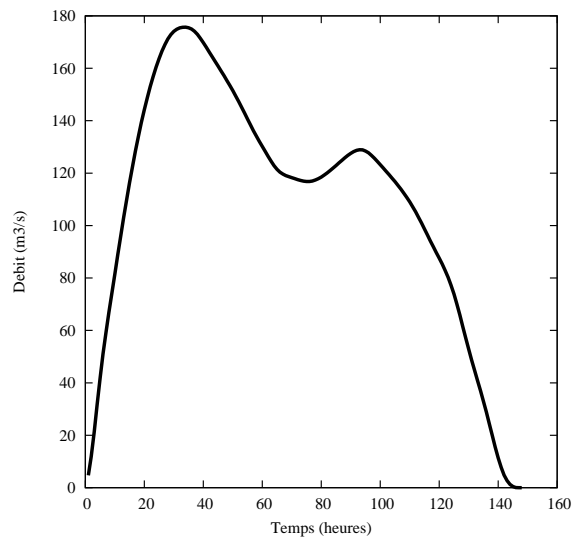


FIG. 9.1: Crue 1910 : débits optimaux de prélèvement dans la Seine (d'après HYDRATEC).

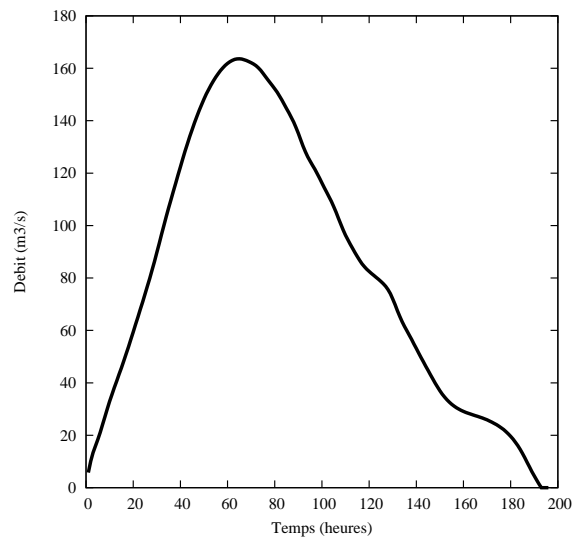


FIG. 9.2: Crue 1924 : débits optimaux de prélèvement dans la Seine (d'après HYDRATEC).

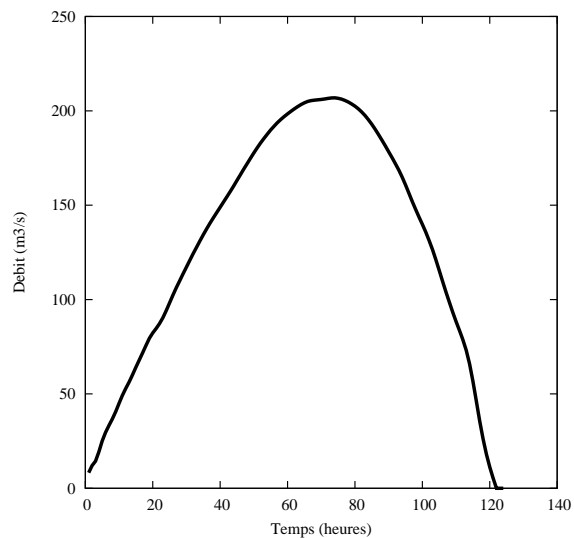


FIG. 9.3: Crue 1955 : débits optimaux de prélèvement dans la Seine (d'après HYDRATEC).

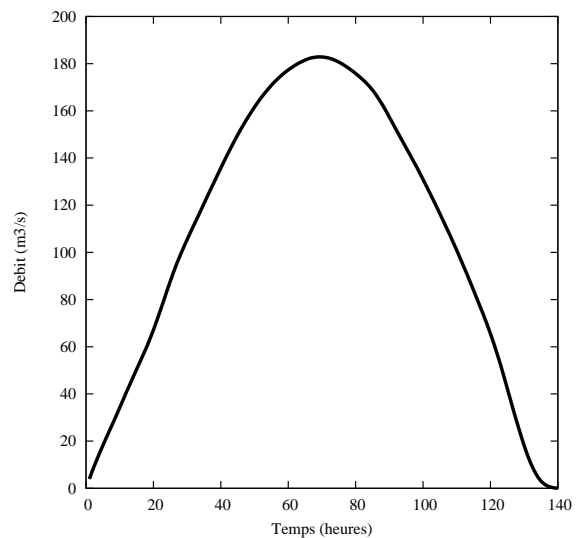


FIG. 9.4: Crue 1982 : débits optimaux de prélèvement dans la Seine (d'après HYDRATEC).

- les débits de fuite dépassés et non dépassés dans 95 % des cas.

L'examen de ces résultats montre que l'intervalle contenant 95 % des débits de fuite calculés est étroit au point que n'importe quelle simulation paraît « représentative ». D'autre part si, toutes choses étant égales par ailleurs, on compare les résultats obtenus avec les transmisivités aléatoires et avec les transmisivités calées du modèle EDF, on obtient des résultats presque identiques. Ceci s'explique par l'absence de structure spatiale dans le modèle des champs de perméabilité. Cette absence de structure fait, sans doute trop facilement, émerger une moyenne spatiale qui est la même pour toutes les réalisations. Ceci montre que, pour estimer l'incertitude sur les débits de fuite, on a besoin d'une meilleure caractérisation de la variabilité spatiale des perméabilités.

Simulations du fonctionnement du système de *surstockage*

Une série cohérente de simulations a été réalisée, afin de déterminer la sensibilité des résultats à des variations des principaux paramètres d'aménagement.

Le fonctionnement hypothétique du système est schématisée sur la figure 9.5, basée sur l'hydrogramme de crue de 1955.

Les résultats de quatre simulations sont présentés. On peut les comparer parce que les valeurs de tous les paramètres sont les mêmes dans ces quatre simulations. Les différences de résultats ne sont dues qu'à des choix différents dans les options d'aménagement et de gestion :

- Présence ou absence du drain Nord et du drain Sud ;
- Présence ou absence d'écrans imperméables qui seraient mis en place sous les digues, dans les secteurs où la largeur du terrain d'assise de celles-ci est faible, du fait de la proximité d'une rivière et d'un lac de gravière ;
- Manière de représenter les drains naturels (Auxence, Voulzie) et les drains artificiels (drain Nord et drain Sud). Deux modes de représentation ont été utilisés : condition de drain et potentiel imposé ;
- Gestion ou pas des remontées de nappe, induites par le *surstockage*, dans les zones habitées les plus proches de la plaine alluviale : Marolles, la Tombe, Gravon, Châtenay, Balloy, Bazoches, Bray, Égligny, Vimpeles, Volangis, Saint-Sauveur et les Ormes.

Les résultats sont présentés sous forme de cartes et de graphiques :

- Cartes des *surcharges* hydrauliques dans l'une des couches du modèle, à l'un des temps charnière de l'évolution du système. Ces cartes montrent les courbes d'égale valeur de la *surcharge* hydraulique calculée par le modèle. Elles sont construites en utilisant les valeurs calculées de la *surcharge* hydraulique dans les mailles de la couche considérée (Alluvions, Craie supérieure ou Craie inférieure). L'équidistance des courbes est de 0.1 m : entre deux courbes adjacentes, la valeur de la *surcharge* hydraulique varie de 0.1 m.

Les mailles pour lesquelles la valeur calculée de la *surcharge* hydraulique est comprise entre 0.1 m et 0.2 m sont coloriées en bleu-vert ; cette plage de couleur donne la limite d'extension de la zone où l'influence du *surstockage* d'eau dans les casiers sur la couche considérée est significative. Les mailles pour lesquelles la valeur calculée de la *surcharge* hydraulique est inférieure à 2 cm sont coloriées en vert clair ; cette plage de couleur représente la partie de la couche considérée où l'influence du *surstockage* est négligeable ;

- Cartes des « débits verticaux » dans la couche des Alluvions, à l'un des temps charnière de l'évolution du système (voir légende de la figure 9.5). Ces débits verticaux sont positifs ou négatifs. Ils correspondent :
 - aux débits de fuite des *surlacs*, soit à travers les interfaces *surlac*–Alluvions anciennes, soit à travers les interfaces lac de gravière (inclu dans un *surlac*)–Alluvions anciennes. Dans ce dernier cas, le flux horizontal est rapporté à la maille qui est du côté Alluvions anciennes de l'interface. Ces débits de fuite sont tous localisés à l'intérieur des différents casiers ;
 - aux débits exfiltrés à travers les Alluvions modernes. L'exfiltration est due au fait qu'à la périphérie externe des casiers, la *surcharge* hydraulique des Alluvions est supérieure à 0 m.

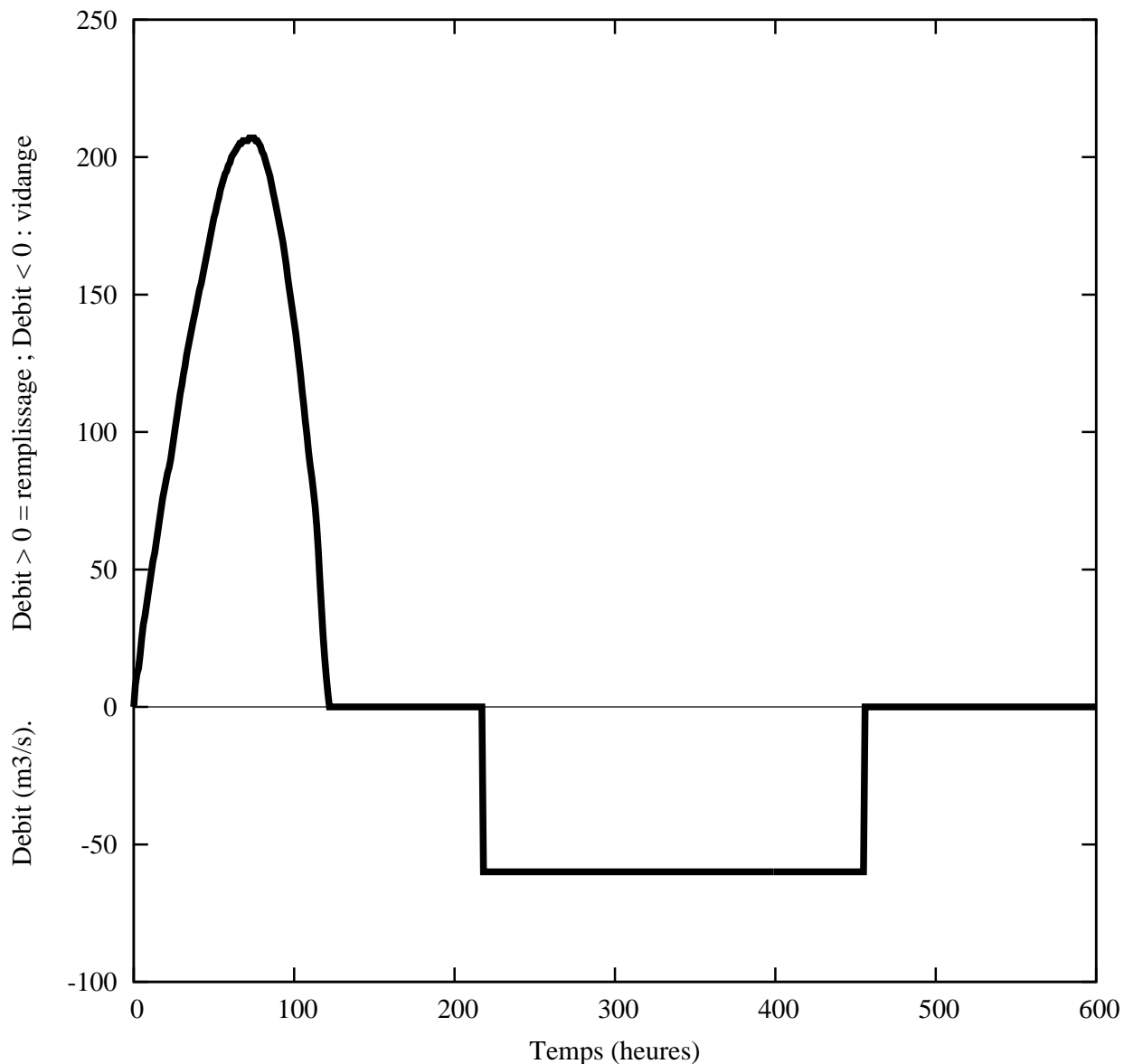


FIG. 9.5: Crue de 1955 : débits de remplissage et de vidange des casiers (d'après HYDRATEC). On peut distinguer, dans la gestion, hypothétique, du système pendant cet épisode de crue : (1) une phase de remplissage des casiers ; (2) un phase de stockage passif, pendant laquelle il n'y a ni injection ni vidange. Les casiers, remplis au maximum, se vident lentement en raison des débits de fuite ; (3) un phase de vidange forcée ; (4) un phase de résorption des effets du *surstockage* sur le système aquifère : les *surcharges* hydrauliques tendent vers zéro. Le débit maximum de remplissage est de $210 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; le débit de vidange est constant à $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Le remplissage des casiers commence au temps $t = 0 \text{ h}$ et se termine au temps $t = 121 \text{ h}$; la vidange des casiers débute au temps $t = 217 \text{ h}$ et se termine au temps $t = 455 \text{ h}$. On calcule l'évolution du système jusqu'au temps $t = 623 \text{ h}$, soit une semaine après la fin de la vidange des casiers. Les cartes de l'état du système sont sorties aux temps caractéristiques $t = 121 \text{ h}$, $t = 217 \text{ h}$, $t = 455 \text{ h}$ et $t = 623 \text{ h}$. Les débits de fuite sont calculés au pas de temps horaire. Aux temps $t \leq 0$, les *surcharges* hydrauliques et les *surdébites* liés au *surstockage* d'eau dans les casiers ont une valeur nulle.

Comme les Alluvions modernes ont une certaine perméabilité, la surface topographique fonctionne comme une surface de drainage à la *surcote* $h = 0$ m. Une partie des débits de fuite ressort à l'extérieur des digues de ceinture des casiers. Ce débit constitue l'*exfiltration* ;

- Courbes d'évolution des débits de fuite en fonction du temps, selon le chemin qu'elles empruntent. Sont distinguées par une courbe particulière :
 - les fuites globales à travers les interfaces *surlac*–Alluvions modernes ; sur les graphiques, ces courbes sont labellées « All mod » ;
 - les fuites globales à travers les interfaces lac de gravière (inclu dans un *surlac*)–Alluvions anciennes ; sur les graphiques, ces courbes sont labellées « Lacs » ;
 - les fuites globales à travers les interfaces lac de gravière (inclu dans un *surlac*)–Craie supérieure ; sur les graphiques, ces courbes sont labellées « Craie » ;
 - les débits de fuites totaux, toutes trajectoires confondues ; sur les graphiques, ces courbes sont labellées « TOTAL ».

Les temps sont en heures, comptées depuis le début des injections d'eau de Seine dans les casiers. Les débits sont en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

- Cartes zoomées sur les zones habitées, situées en bordure de la plaine alluviale, potentiellement exposées au risque d'inondation de caves. Ces cartes sont des agrandissements des cartes générales des *surcharges* hydrauliques ; les mêmes conventions (plages bleu–vert ou vert, équidistance des courbes) leur ont été appliquées. Il y a douze zones habitées : Châtenay-sur-Seine, Égligny, Vimpelles, Volangis, les Ormes-sur-Voulzie, Saint-Sauveur-lès-Bray, Bray-sur-Seine, Bazoches-lès-Bray, Balloy, Gravon, la Tombe et Marolles-sur-Seine. Trois figures sont données pour chaque zone habitée :

1. Distribution de la *surcharge* hydraulique dans les mailles des Alluvions correspondant à l'une des zones de risque potentiel d'inondation de caves, à la fin de la phase de remplissage des casiers ($t = 121$ h) ;
2. Distribution des *surcharges* hydrauliques dans la zone de risque potentiel, au début de la phase de vidange *et* courbe des débits extraits des Alluvions, dans la zone de risque potentiel ;
3. Distribution des *surcharges* hydrauliques dans les mailles des Alluvions constituant la zone de risque potentiel, à la fin de la phase de vidange des casiers ($t = 455$ h).

La figure 9.6 montre la numérotation des 8 *surlacs*.