



Faculté des Sciences Appliquées

Département GEOMAC

« Géoressources, Géotechnologies & Matériaux de Construction »

Hydrogéologie

Alain Dassargues

Tél.: +32 4 366 23 76

www.hggeomac.ulg.ac.be



Application de l'approche "Box Model" au site de Cheratte

1	PRINCIPE DE LA METHODE.....	3
2	APPLICATION AU SITE DE CHERATTE.....	4
2.1	IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES COMPARTIMENTS POUR LE SITE DE CHERATTE	5
2.2	CONSTRUCTION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE.....	7
2.3	CALIBRATION DU MODÈLE.....	10
2.4	PREMIERS RÉSULTATS	12
2.5	IMPACT DU CHOIX DES PARAMETRES SUR LES RESULTATS.....	16
2.5.1	<i>Volume des compartiments.....</i>	<i>16</i>
2.5.2	<i>Altitude de la base des compartiments.....</i>	<i>19</i>
2.6	SIMULATIONS DE DIVERS SCENARIOS	21
2.6.1	<i>Arrêts des pompes d'exhaure à des instants différents.....</i>	<i>21</i>
2.6.2	<i>Coup d'eau.....</i>	<i>23</i>
2.6.3	<i>Partage du compartiment A en deux "sous-compartiments".</i>	<i>28</i>
3	CONCLUSIONS.....	31

1 Principe de la méthode

L'approche "Box Model" consiste à diviser la zone d'étude en une série de compartiments, chacun de ceux-ci représentant une zone d'exploitation drainée par un réseau de galeries. En principe, ces zones exploitées sont séparées les unes des autres par des couches de roches non exploitées faisant office de barrière. Il est néanmoins possible qu'elles soient interconnectées par l'intermédiaire de galeries ou de failles. Il faut donc prévoir des connections entre les compartiments et disposer d'un minimum d'informations sur ces communications.

Le principe de conservation de la masse est appliqué sur chacun de ces compartiments: les différences entre les entrées (recharge pluviométrique, apports d'autres compartiments,...) et les sorties (pompages, déversements dans les cours d'eau, exportation vers d'autres compartiments,...) se traduisent par des variations du stock d'eau dans les compartiments donc par des variations de niveaux d'eau, fonction de la capacité d'emmagasinement qui caractérise chaque compartiment. Les échanges entre compartiments sont représentés par des équations de transfert de 1^{er} ordre (fonction de la différence de charge).

Par ailleurs, le réseau de galeries au sein de chaque zone exploitée facilitant les mouvements d'eau, il est probable que les gradients piézométriques au sein de ces zones sont très limités. Cette approche suppose donc que chaque compartiment est caractérisé par un seul niveau d'eau.

L'approche "Box Model" présente l'avantage de tenir compte, de façon globale, des spécificités du système minier sans nécessiter une description et une quantité de données trop importante. Cela se fait bien sûr au détriment de la précision à l'échelle plus locale. Les informations nécessaires pour caractériser chacun des compartiments sont: l'extension géométrique, les connexions avec les autres compartiments, le niveau d'eau, le niveau de drainage et les volumes pompés. Il faut également disposer d'estimations sur le coefficient d'emmagasinement, le volume de vides, la conductivité hydraulique, la recharge pluviométrique,... De tous ces paramètres, il est probable que c'est l'estimation du coefficient d'emmagasinement qui est la source la plus importante d'erreurs sur la représentation de la remontée des niveaux piézométriques après l'arrêt des pompages d'exhaure. Par contre, une fois la stabilisation stabilisée, le facteur déterminant pour la caractérisation des coups d'eau sera l'estimation de la conductivité hydraulique.

2 Application au site de Cheratte

L'application au site de Cheratte d'une approche "Box Model" a été réalisée à l'aide du logiciel EPANET2 (développé par le Water Supply and Water Resources Division of the U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory). Le service de Paul Younger a été contacté afin d'obtenir une autorisation pour l'utilisation du modèle GRAM qui y a été développé, mais celui-ci n'est pas utilisable sur des machines "windows97+". Il nous a donc mis en contact avec David Banks qui nous a récemment transmis une copie du modèle MIFIM (modélisation à l'aide de feuilles de calcul Excel développée sur base du modèle GRAM).

EPANET présente l'avantage d'être disponible via internet (<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html>) et d'être facilement adaptable à la problématique des écoulements en milieu minier. Ultérieurement, des tests seront réalisés à l'aide du modèle MIFIM afin de comparer les résultats de ces deux techniques de modélisation.

EPANET permet la modélisation des écoulements d'eau sous pression et de la qualité des eaux dans des réseaux de distribution d'eau. Les variables calculées par EPANET sont l'évolution des hauteurs d'eau dans les réservoirs, les débits dans les conduites et les concentrations en matières dissoutes.

Il est donc possible d'utiliser ce logiciel pour étudier la problématique des écoulements dans les bassins miniers abandonnés selon l'approche "Box Model".

Les écoulements dans ces réseaux de conduites sont régis par deux lois:

- 1) une première loi qui donne le débit entre deux nœuds (Q_{ij}) en fonction de la différence de hauteur d'eau (ou de pression, H) qui existe entre ces nœuds:
$$H_i - H_j = h_{ij} = r \times Q_{ij}^n + m \times Q_{ij}^2.$$
 h représente les pertes de charge, r est un coefficient représentant la résistance à l'écoulement, n un coefficient caractéristique de l'écoulement et m un coefficient destiné à tenir compte des pertes de charge mineures;
- 2) l'équation de continuité appliquée en chaque nœud: $\sum_j Q_{ij} - D_i = 0$; D_i représente un terme "source/puits" pour le nœud i .

Il existe différentes formules empiriques permettant d'estimer les pertes de charge dans une conduite en fonction des caractéristiques de celle-ci:

- la relation de Hazen-Williams: $H_L = \frac{4,727 \cdot L \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot d^{4,871}}$, H_L représente la perte de charge, L la longueur de la conduite, Q le débit traversant la conduite, d le diamètre de la conduite et C un coefficient caractéristique de la rugosité;
- la relation de Darcy-Weisbach: $H_L = \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$, v représente la vitesse du fluide, g la gravité et f un facteur de friction (adimensionnel);
- la relation de Chezy-Manning: $H_L = \frac{4,66 \cdot n^2 \cdot L \cdot Q^2}{d^{5,33}}$, n représente le coefficient de rugosité de Manning.

2.1 Identification et caractérisation des compartiments pour le site de Cheratte

La zone exploitée a été divisée en une série de compartiments. Sur base du tracé des galeries dressé par l'ISSEP, les 3 principales concessions présentes sur le site ont été subdivisées en 5 réseaux "indépendants" de galeries (il existe probablement des relations entre ces compartiments mais l'examen des plans miniers n'a pas permis de les mettre en évidence). Cette subdivision est représentée sur la carte en annexe 1:

- la concession d'Argenteau-Trembleur a été divisée en 2 compartiments (A et B);
- la concession de Hasard-Cheratte a été divisée en 2 compartiments (C et D);
- la concession de Espérance-Violette compte un compartiment (E)

Le volume associé à chacun de ces compartiments a été estimé en leur affectant une partie du volume de vide résiduel total (pour la zone d'étude) proportionnelle à la superficie exploitée présente dans chaque compartiment (Tableau 1). La première hypothèse de travail était d'utiliser l'estimation la plus importante du volume total des vides résiduels fournie par l'ISSEP, soit $3,85 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Dans EPANET, les compartiments identifiés ci-dessus sont représentés par des cylindres fictifs caractérisés par un diamètre et une hauteur. Le volume de vide cité ci-dessus correspond à la zone exploitée entre le sommet du houiller et le niveau de la Meuse (nous ne disposons pas d'estimations des volumes exploités sous le niveau de la Meuse). Ce volume se répartit entre les cotes 55 m (niveau moyen de la Meuse dans la zone étudiée) et 130 m

(grossière approximation du niveau moyen du sommet du Houiller). Le diamètre de ces cylindres est déduit de la section obtenue en divisant le volume du compartiment par la hauteur du cylindre (75 m). Les différentes grandeurs caractéristiques de ces cylindres sont présentées dans le Tableau 1.

Compartiment	Superficie exploitée (m ²)	% de la superficie totale exploitée	Volume du compartiment (m ³)	Section fictive du compartiment (m ²)	Diamètre caractéristique (m)
A	4,30×10 ⁶	43,4	1,67×10 ⁶	2,23×10 ⁴	168,5
B	1,80×10 ⁶	18,2	7,00×10 ⁵	9,33×10 ³	109,0
C	8,00×10 ⁵	8,1	3,11×10 ⁵	4,15×10 ³	72,7
D	2,75×10 ⁶	27,8	1,07×10 ⁶	1,43×10 ⁴	134,7
E	2,50×10 ⁵	2,5	9,72×10 ⁴	1,30×10 ³	40,6
Total	9,90×10 ⁶	100,0	3,85×10 ⁶		

Tableau 1 – Caractéristiques des 5 compartiments

Par ailleurs, des pompes d'exhaure se sont poursuivies jusqu'en 1982 au puits Marie (concession d'Argenteau-Trembleur – Boxe A) afin d'y maintenir le niveau d'eau à la cote –64 m. Ce niveau a donc été choisi comme base pour l'ensemble des compartiments et les cylindres ont été étendus vers le bas jusqu'à cette cote en conservant la même section que celle adoptée entre le niveau de la Meuse et le sommet du Houiller.

Cette façon de procéder revient à imposer un coefficient d'emménagement constant sur toute la hauteur du compartiment. Il serait possible de représenter des variations du coefficient d'emménagement en faisant varier la valeur du diamètre caractéristique du compartiment (tout en s'assurant de la conservation du volume global du compartiment).

Initialement deux configurations de réseau ont été testées: une première où tous les compartiments sont interconnectés et une seconde où les compartiments sont isolés les uns des autres. Aucune de ces configurations n'ayant donné de résultats satisfaisants, c'est finalement une configuration intermédiaire qui a été retenue: les compartiments A, B, C et D sont tous interconnectés alors que le compartiment E n'est connecté qu'au compartiment D. La figure en annexe 2 représente de façon schématique la conceptualisation du site de Chératte selon une approche "Box Model".

2.2 Construction du modèle mathématique

Quatre objets gérés par EPANET 2 ont été utilisés pour simuler les écoulements en milieu minier:

- 1) les "*junctions*": utilisées pour représenter la recharge des réseaux de galeries et les éventuels pompage d'exhaure en y imposant un débit;
- 2) les "*reservoirs*": utilisés pour représenter les eaux de surface. Leur niveau reste constant au cours du temps, quels que soient les apports;
- 3) les "*tanks*": utilisées pour représenter les zones d'exploitation minière (le niveau y varie en fonction des apports et prélèvements);
- 4) les "*pipes*": permettent de représenter les transferts d'eau entre ces différents objets.

Chaque compartiment est donc représenté par un assemblage d'au moins une "*junction*" (pour simuler la recharge), un "*tank*" (pour représenter la capacité des zones d'exploitation minière et le réseau de galeries) et un "*reservoir*" pour représenter les eaux de surface. La Figure 1 représente la façon dont ces objets ont été agencés pour représenter le site de Cheratte.

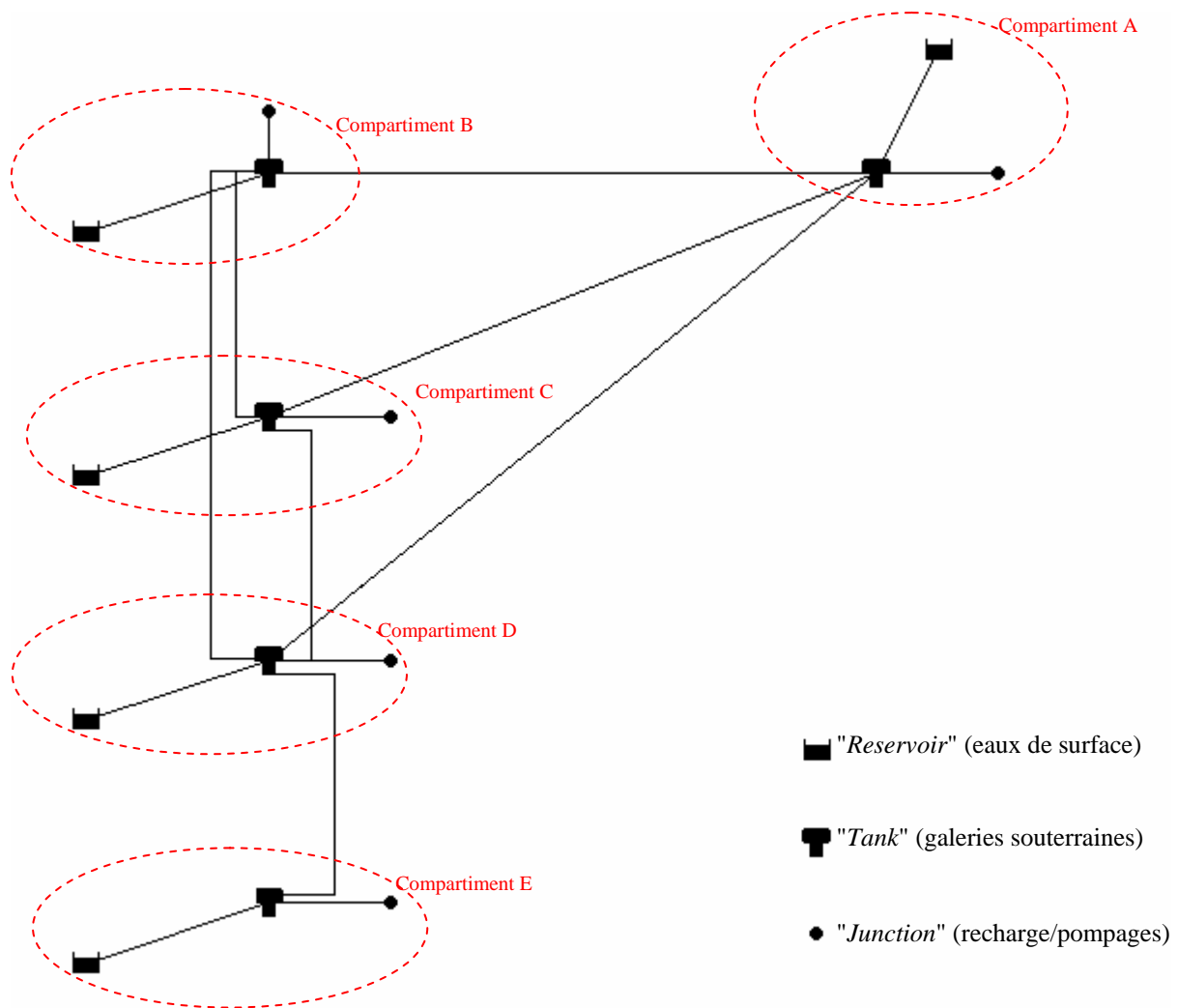


Figure 1 - schématisation des différents compartiments à l'aide du logiciel EPANET

Pour ces objets, les paramètres à spécifier sont les suivants:

- 1) pour les "*junctions*": l'altitude et le débit entrant ou sortant (débit imposé);
- 2) pour les "*reservoirs*": le niveau d'eau (niveau d'eau imposé);
- 3) pour les "*tanks*": un diamètre caractéristique, l'altitude de la base de la citerne, un niveau d'eau initial, un niveau d'eau minimal en-dessous duquel l'eau ne peut pas descendre et un niveau d'eau maximal au-dessus duquel l'eau ne peut pas monter;
- 4) pour les "*pipes*": la longueur, le diamètre et un coefficient représentant la résistance à l'écoulement (fonction de la loi utilisée pour le calcul des pertes de charge).

Il faut encore signaler que le "comportement" de ce système peut être précisé grâce à l'utilisation de règles permettant par exemple de changer le statut d'un "*pipe*" de "fermé" à

"ouvert" en fonction du niveau d'eau dans un "tank" (ce qui est utile pour représenter le niveau de drainage d'un compartiment par exemple),...

Le Tableau 2 reprend les paramètres adoptés initialement pour ces différents objets.

Paramètres		Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
"Tank"	Diamètre caractéristique (m)	168,4	109	72,7	134,8	40,6
	Altitude de la base (m)	-64	-64	-64	-64	-64
	Niveau initial (m)*	0	0	0	0	0
	Niveau minimal (m)*	0	0	0	0	0
	Niveau maximal (m)*	194	194	194	194	194
"Reservoir"	Niveau d'eau (m)	92	55	55	55	55
"Junction"	Débit (l/s)	13,9	5,7	2,5	8,7	0,8
"Pipe"	Longueur (m)	1000	1000	1000	1000	1000
	Diamètre (m)	12	12	12	12	12
	Rugosité**	100	100	100	100	100

Tableau 2 – Paramètres initiaux affectés aux différents objets du modèle (* par rapport à la base de la citerne; ** c'est la relation de Hazen-Williams qui a été adoptée, ce paramètre est adimensionnel)

Le diamètre caractéristique des "tanks", a été déterminé précédemment lors de l'estimation des caractéristiques des compartiments (Tableau 1). L'altitude de la base a été fixée à –64 m, cela correspond au niveau d'eau maintenu dans le compartiment A jusqu'à l'arrêt des pompages d'exhaure en 1982. Ne disposant pas de ce type d'informations pour les autres compartiments, l'altitude de la base y a été fixée arbitrairement à –64 m. Par ailleurs, on suppose que initialement, le niveau d'eau dans les différents "tanks" étaient au niveau de la base du compartiment, c'est pourquoi le niveau initial à été placé à 0 m dans tous les "tanks". De même, on suppose que les "tanks" peuvent se vider entièrement, c'est pourquoi le niveau d'eau minimal correspond à la base du compartiment. Enfin le niveau maximal correspond à l'altitude du sommet du Houiller soit 130 m, ce niveau se situe donc à 194 m au-dessus de la base du "tank".

Les "reservoirs" sont caractérisés par un niveau d'eau qui reste constant au cours du temps. Ce niveau correspond à l'altitude du niveau dans les cours d'eau qui recueillent les eaux d'exhaure des différents compartiments: la Meuse (niveau moyen à 55 m dans la zone d'étude) pour les compartiments B, C, D et E; et le Bolland pour le compartiment A (niveau à 92 m à l'exhaure "Paradis").

Le débit initial affecté aux "junctions" (recharge) a été choisi de façon arbitraire, il correspond à une recharge des compartiments de 100 litres par m² de surface exploitée et par année. Ce paramètre sera modifié lors de la calibration, de même que les caractéristiques des conduites.

Les caractéristiques des "*pipes*" correspondent aux valeurs par défaut attribuées par le logiciel lors de la création de ces objets.

2.3 Calibration du modèle

La calibration du modèle est en fait une confrontation des résultats fournis par celui-ci et des valeurs observées. Il faut donc choisir les grandeurs qui feront l'objet de cette comparaison. Dans le cas de l'approche "Box Model", deux paramètres ont été retenus: un niveau d'eau caractéristique du compartiment et les débits d'eau fournis par les compartiments aux eaux de surface.

Concernant les débits d'exhaure, les estimations proviennent des relevés faits lors de la localisation des exutoires sur le site. Il s'agit donc de valeurs très approximatives (Tableau 3). Lorsque l'approche mixte sera adoptée pour la modélisation, ces estimations seront affinées notamment sur base des résultats des analyses des mesures de débits réalisées depuis le début de l'étude de ce site.

Le choix d'un niveau caractéristique du compartiment est plus délicat: en effet, assimiler le niveau dans le compartiment à une valeur constante dans l'espace revient à supposer d'une part que l'eau y circule sans y rencontrer d'obstacle et d'autre part que la zone exploitée représentée par le compartiment est très homogène or ce n'est pas le cas dans la pratique puisque les zones exploitées présentent une hétérogénéité importante (zones exploitées, zones non exploitées, galeries, zones effondrées,...) et que le mouvement de l'eau peut être perturbé par des éboulements de galeries (à l'origine des coups d'eau). De plus, les observations piézométriques sont ponctuelles et relativement peu nombreuses. Dans la pratique, le niveau caractéristique mesuré retenu pour chaque compartiment a été choisi dans des puits ou piézomètres, chaque fois situés à proximité d'une galerie cartographiée et présentant une anomalie par rapport à la piézométrie régionale, indiquant un drainage par le réseau de galeries (Tableau 3).

Paramètres	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Niveau d'eau (m)	97	65	59	64	56
Décharge (l/s)	23	25	21	29	?

Tableau 3 – Valeurs "observées" des niveaux d'eau et de débits d'eau vers les eaux de surface pour les différents compartiments.

Les quelques mesures piézométriques réalisées par le passé semblent indiquer que le processus de remontée est complètement terminé depuis un certain nombre d'années, le niveau d'eau mesuré utilisé pour la calibration dans les compartiments est par conséquent un

niveau à l'équilibre. Ceci est confirmé par les renseignements fournis dans le procès des aciéries de la Meuse: l'arrêt des pompes d'exhaure dans la concession de Argenteau-Trembleur est survenue dans le courant 1982, et le coup d'eau s'est produit quelques mois après cet arrêt. Les experts ont conclu que le niveau d'eau dans la concession de Argenteau-Trembleur ont du remonter de quelques dizaines de mètres en plusieurs mois, le phénomène a donc été très rapide.

Enfin, certaines mesures piézométriques réalisées dans le compartiment A sont inférieures au niveau de référence choisi pour ce compartiment et même au niveau de drainage (exhaure Paradis à ± 92 m). Pourtant, l'exhaure Paradis donne un débit d'eau important (23 l/s). Ceci semblerait indiquer que le compartiment A pourrait être divisé en deux compartiments. Cependant, les données disponibles actuellement ne sont pas suffisantes pour distinguer ces deux compartiments (volumes respectifs, niveaux de référence, débit d'exhaure,...). C'est pourquoi, initialement, le compartiment A a été représenté par un seul compartiment. Ultérieurement, des simulations seront réalisées de façon à représenter le partage en deux de ce compartiment (voir § 2.6.3).

Les paramètres modifiés pour que le modèle fournisse des résultats proches des observations sont les caractéristiques des conduites interconnectant les différents compartiments et les connectant aux eaux de surface et la valeur de la recharge. Le cas échéant, des connexions entre compartiments ont été désactivées afin d'augmenter la qualité des résultats fournis par le modèle.

A la suite de la calibration, il apparaît au bilan, que les valeurs de recharge sont proches des valeurs de débits fournis par les compartiments aux eaux de surface, ce qui est normal puisque après un certains temps, et en absence de tout autre échange avec l'extérieur, le système parvient à l'équilibre.

Concernant les caractéristiques des conduites, des distinctions peuvent être faites:

- les liaisons compartiments – eaux de surface ont été modifiées de façon à diminuer au maximum la résistance qu'elles opposent à l'écoulement (diminution de la longueur, augmentation du diamètre, diminution de la rugosité), ceci permet d'obtenir des débits d'exhaure proches de ceux observés sans nécessité de différences de niveaux d'eau trop élevées entre compartiments et eaux de surface;

- les liaisons entre compartiments: les liaisons entre le compartiment E et les compartiments A, B et C ont été désactivées de façon à éviter que le niveau d'eau dans le compartiment E ne soit pas trop élevé par rapport aux observations.

Les caractéristiques après calibration de ces différentes liaisons sont présentées dans le Tableau 4.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E	Eaux de surface
Comp. A		90 65 100	100 50 100	110,0 40,0 100,0		0,1 25 200
Comp. B			100 50 100	100,0 50,0 100,0		0,25 25 200
Comp. C				100,0 50,0 100,0		0,15 25 200
Comp. D					100 12 100	0,2 25 200
Comp. E						0,5 20 200

Tableau 4 – Propriétés des liaisons entre compartiments et entre compartiments et eaux de surface déterminées par calibration (de haut en bas: longueur en m, diamètre en m, rugosité).

La comparaison entre les valeurs observées de niveaux d'eau et de débits d'exhaure et celles calculées montre que le choix de ces valeurs de paramètres donne de bons résultats (Tableau 5).

Compartiment	Niveau d'eau (m)		Débit vers les eaux de surface (l/s)	
	Observé	Calculé	Observé	Calculé
Comp. A	97	96,73	23	20,3
Comp. B	65	64,66	25	24,5
Comp. C	59	58,89	21	19,8
Comp. D	64	63,54	29	25,9
Comp. E	56	55,67	?	2,2

Tableau 5 – Comparaison entre valeurs observées et valeurs calculées par le modèle pour les niveaux d'eau et les débits en direction des eaux de surface caractérisant les 5 compartiments.

2.4 Premiers résultats

Une première simulation a été réalisée visant à reproduire la situation actuelle. La période couverte par cette simulation est de 30 ans, les calculs se font avec un pas de temps de 10 jours. Cette simulation peut être divisée en deux parties: elle débute par une phase durant laquelle des pompes d'exhaure sont maintenues dans les différents compartiments. Cette

phase se prolonge jusqu'à ce que les niveaux se stabilisent. La seule contrainte est que le débit d'exhaure dans le compartiment A doit être d'environ 6000 m³/j et que le niveau d'eau doit y être à -64 m. Pour les autres compartiments, nous ne disposons d'aucunes informations sur les débits d'exhaure et d'éventuels niveaux de référence à respecter. Cette première phase vise à produire une situation à l'équilibre (situation qui prévalait avant l'arrêt des pompes mais pour laquelle nous ne disposons d'aucune information). Lorsque l'équilibre est atteint, les pompes sont arrêtés simultanément dans tous les compartiments. La remontée et la stabilisation des niveaux dans ces compartiments correspond à la deuxième phase de la simulation.

Le graphique de la figure 2 représente l'évolution des niveaux d'eau dans les compartiments suite à l'arrêt des pompes d'exhaure.

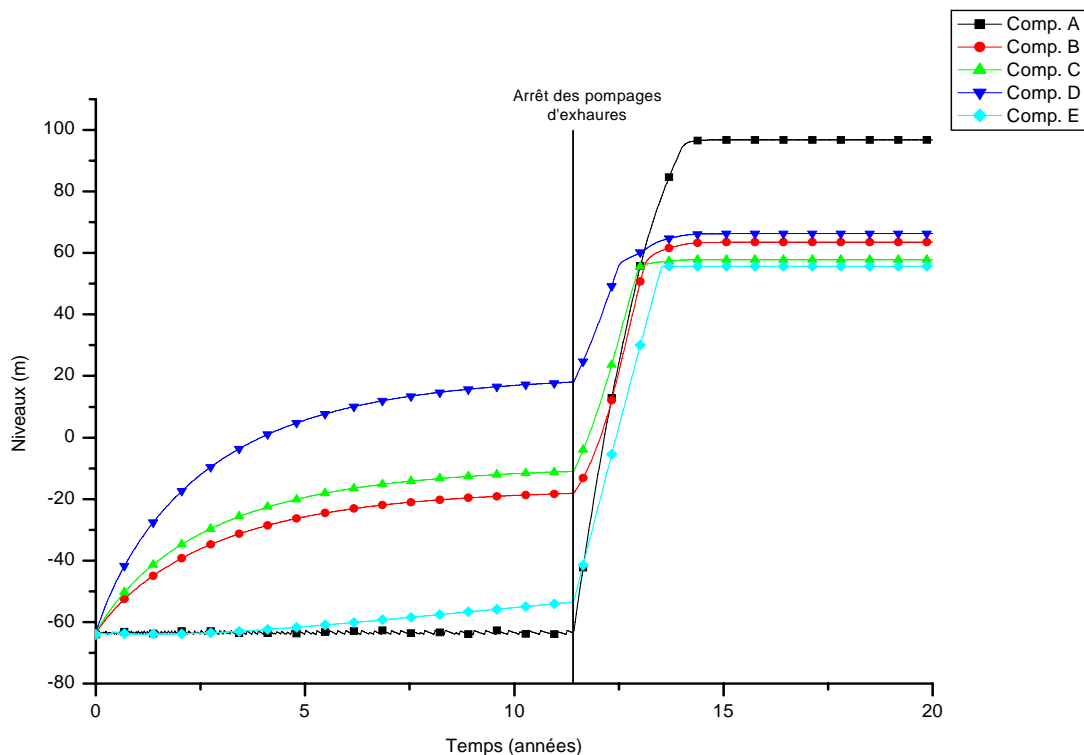


Figure 2 - Evolution des niveaux d'eau (m) dans les différents compartiments suite à l'arrêt des pompes d'exhaure

Elle montre notamment qu'il s'écoule un peu moins de trois années entre le moment où le pompage d'exhaure dans le compartiment A est arrêté et le moment où le niveau d'eau dans ce compartiment atteint le niveau observé actuellement (et supposé à l'équilibre). Pour les

autres compartiments, le temps de stabilisation varie entre 1 année et 3 années, mais en réalité il dépend fortement du niveau d'eau à l'équilibre atteint durant la phase de pompage.

Le graphique de la Figure 3 représente les flux transmis par les compartiments aux eaux de surface.

Ce graphique montre qu'initialement, aucun flux d'eau n'est restitué aux eaux de surface car le niveau d'eau dans le compartiment est inférieur au niveau des eaux de surface (niveau de drainage des compartiments). Par contre, lorsque l'exhaure débute, les débits d'eau augmentent et se stabilisent très rapidement.

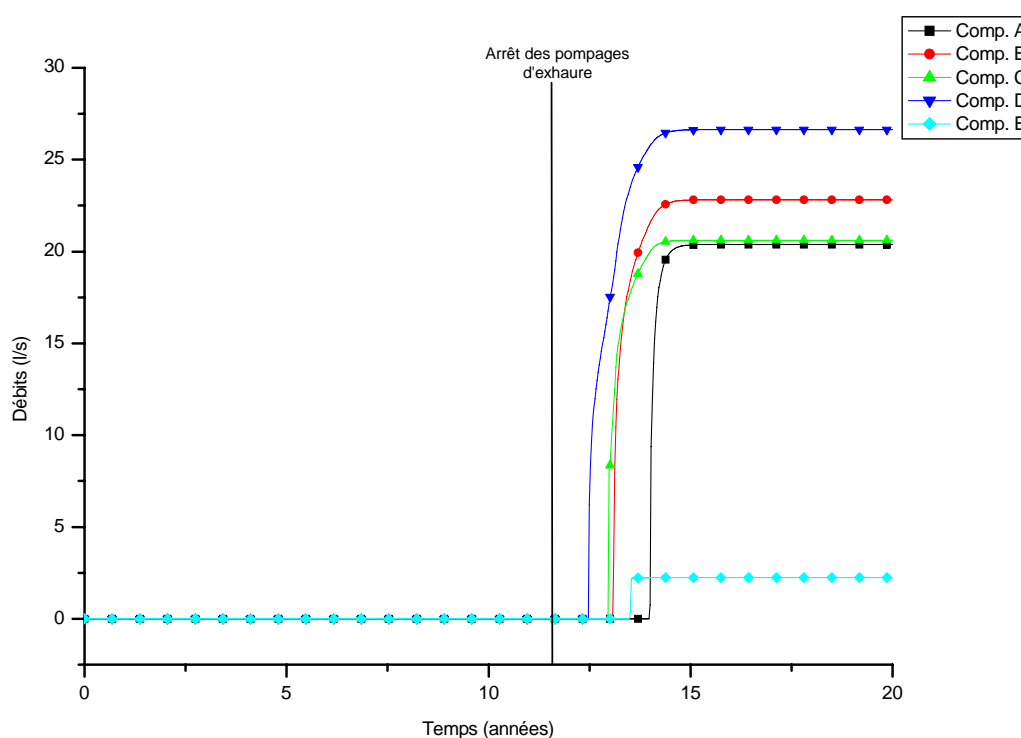


Figure 3 - Evolution des débits transmis aux eaux de surface (l/s) suite à l'arrêt des pompes d'exhaure.

Dès lors, il est possible de dresser un bilan des différents transferts d'eau entre compartiments et des échanges avec l'extérieur en situation stabilisée. Ce bilan est présenté dans le Tableau 6.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Recharge	41,67	15,66	9,26	23,94	2,16
Décharge	-20,31	-24,51	-19,77	-25,86	-2,23
<i>Ecart</i>	21,35	-8,85	-10,51	-1,93	-0,06
Comp. A	-12,04 -6,24 -3,07 0,00	12,04	6,24	3,07	0,00
Comp. B		-2,26 -0,93 0,00	2,26	0,93	0,00
Comp. C			2,01	-2,01	0,00
Comp. D				-0,08	0,08
Comp. E		0,00	0,00		0,02
Total	0,01	-0,01	0,00	-0,02	

Tableau 6 - Bilan des débits échangés entre les différents compartiments et avec l'extérieur à l'équilibre (m³/j).

Le débit est positif si c'est une entrée pour le compartiment cité en tête de colonne, il est négatif si c'est une sortie.

Il montre qu'en l'absence de tout autre échange avec l'extérieur, le volume d'eau entrant dans le modèle (recharge) est bien égal au volume d'eau quittant le modèle via les eaux de surface (décharge). Il montre également que l'alimentation du compartiment A est plus importante que ces exportations vers les eaux de surface. Le solde est en fait transféré aux compartiments B, C et D qui présentent un bilan négatif. L'alimentation du compartiment E est principalement assurée par la recharge pluviométrique. Seule une faible proportion de cette alimentation provient du compartiment D.

Il reste à signaler que la recharge de l'ensemble des compartiments, estimée à la suite de cette simulation représente un volume quotidien de 8000 m³. Si on suppose que les zones exploitées représentées par ces compartiments sont uniquement alimentées par les terrains encaissant situés dans les limites de la zone d'étude, il faudrait que ceux-ci fournissent 112 mm d'eau aux zones exploitées par année. Ce qui paraît assez important. Ceci pourrait en partie expliquer les pertes en eau qui ont été observées sur le réseau d'eau de surface (Julienne, Bolland) et qui pourraient participer à l'alimentation des galeries. Une autre explication pourrait être que la superficie d'alimentation de ces zones d'exploitation minière soient plus importantes que la superficie de la zone d'étude définie initialement ou qu'il y ait des apports d'eau extérieurs provenant par exemple d'autre réseaux de galeries via des connexions non identifiées (site de Herstal par des connexions passant sous la Meuse par exemple).

Le graphique de la Figure 4 illustre la superficie d'infiltration nécessaire pour assurer un alimentation quotidienne des zones d'exploitation de 8000 m³ pour une valeur d'infiltration donnée.

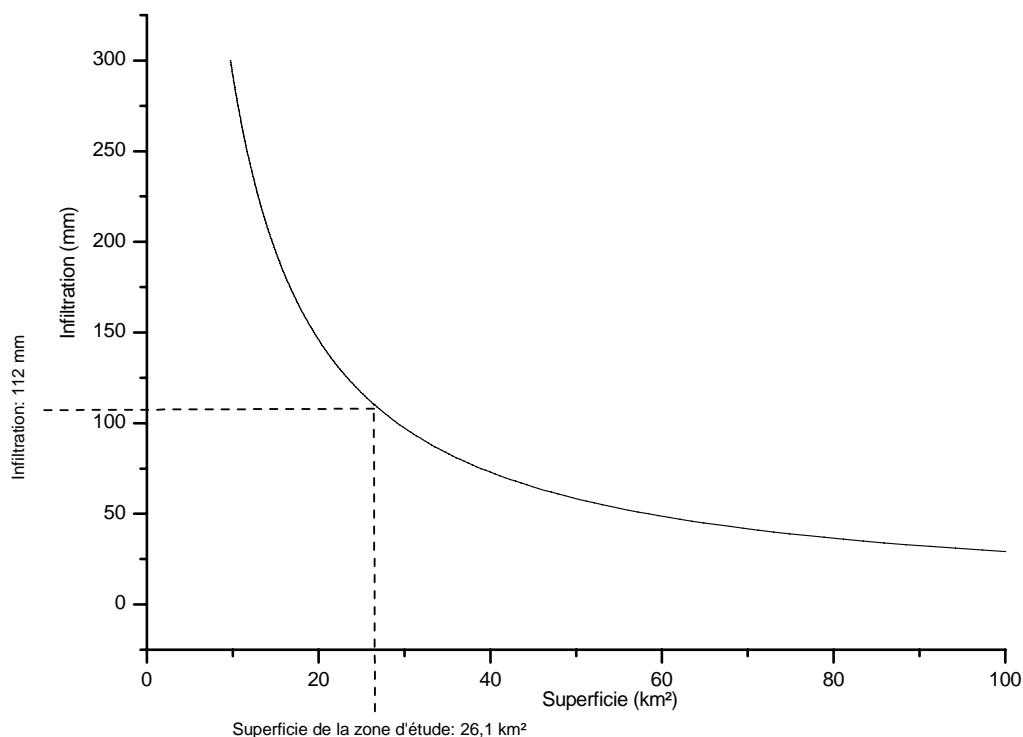


Figure 4 - Relation entre infiltration (mm) et superficie (km²) permettant d'assurer une alimentation de 8000 m³/j des zones d'exploitation.

2.5 Impact du choix des paramètres sur les résultats

Lors de la construction du modèle, certains paramètres ont été choisis de façon plus ou moins arbitraire: volume des compartiments, altitude de la base des compartiments,... La présente section est destinée à illustrer l'impact du choix de ces valeurs sur les résultats fournis par le modèle.

2.5.1 Volume des compartiments

Les résultats présentés précédemment correspondent à l'estimation la plus élevée du volume des vides ($3,85 \times 10^6$ m³). Une simulation a été réalisée en utilisant l'estimation la plus faible du volume des vides ($0,66 \times 10^6$ m³). Les diamètres caractéristiques des compartiments issus de ce changement sont présentés dans le Tableau 7.

Compartiment	Diamètre caractéristique (m) pour un volume de $3,85 \times 10^6 \text{ m}^3$	Diamètre caractéristique (m) pour un volume de $0,66 \times 10^6 \text{ m}^3$
A	168,4	70,7
B	109,0	51,1
C	72,7	33,6
D	134,8	46,6
E	40,6	17,6

Tableau 7 – Diamètres caractéristiques des compartiments pour un volume de vide résiduel de $0,66 \times 10^6 \text{ m}^3$

La principale différence résultant de ce changement de paramètres vient du temps nécessaire pour que les compartiments se remplissent et parviennent à l'équilibre, ils sont plus courts (Figure 5): pour un volume de vide résiduel de $0,66 \times 10^6 \text{ m}^3$ il faut à peu près 180 jours pour que le compartiment A remonte de la cote -64 m jusqu'à sa cote actuelle.

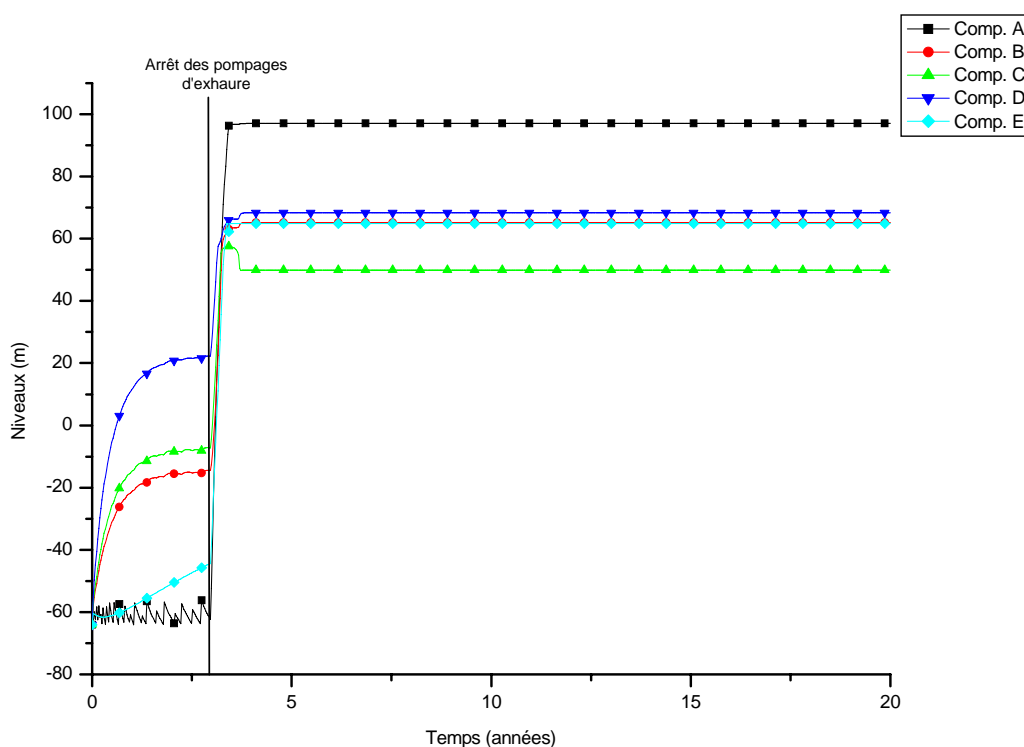


Figure 5 – Evolution des niveaux d'eau (m) dans les différents compartiments pour un volume de vide résiduel de $0,66 \times 10^6 \text{ m}^3$.

De même, la décharge d'eau des compartiments vers le réseau de surface commence beaucoup plus rapidement après le début de la remontée (Figure 6).

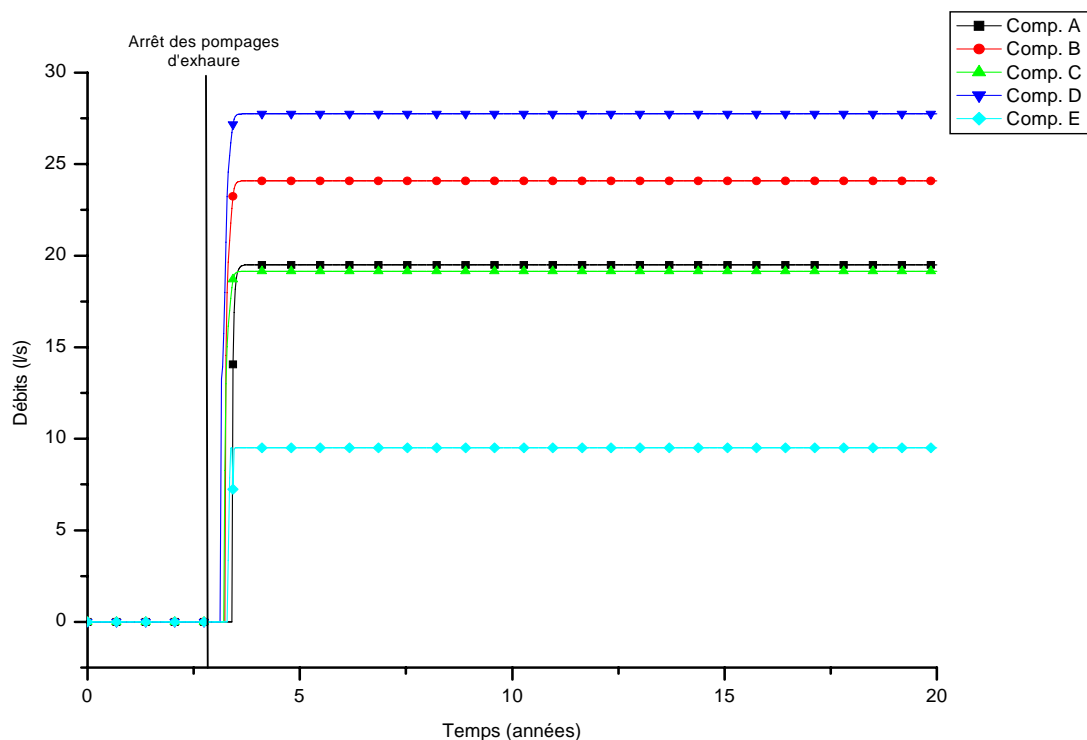


Figure 6 - Evolution des flux (l/s) restitués aux eaux de surface suite à l'arrêt des pompes d'exhaure.

Pour obtenir un modèle calibré, les caractéristiques de certaines liaisons ont du être modifiées. Les nouvelles valeurs de ces paramètres sont présentées dans le Tableau 8.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E	Eaux de surface
Comp. A		75	100	120		0,2
		60	50	47		25
		100	100	100		200
Comp. B			100	100		0,2
			50	50		25
			100	100		200
Comp. C				100		0,2
				50		25
				100		200
Comp. D					100	0,2
					12	25
					100	200
Comp. E						0,5
						20
						200

Tableau 8 – Propriétés des liaisons entre compartiments et entre compartiments et eaux de surface (de haut en bas: longueur, diamètre, rugosité).

Etant donné que les temps de remontée obtenus avec l'hypothèse d'un volume de vide résiduel de $0,66 \times 10^6 \text{ m}^3$ sont extrêmement courts, il semble que ce volume soit trop faible et

que l'hypothèse d'un volume de vide résiduel de $3,85 \times 10^6 \text{ m}^3$ est plus plausible, étant donné les observations faites notamment lors du coup d'eau des aciéries de Cheratte. Un volume de vide résiduel de $3,85 \times 10^6 \text{ m}^3$ sera donc conservée pour les autres modélisations.

2.5.2 Altitude de la base des compartiments

Le modèle a été construit en considérant, de façon arbitraire que la base des compartiments B, C, D et E était située à l'altitude -64 m.

De façon à déterminer l'impact de cette valeur sur les résultats, différentes simulations ont été réalisées en relevant la base de ces compartiment (descendre la base ne changerait pas les résultats étant donné que le niveau d'eau initial a été placé à -64 m). Des simulations ont été réalisées avec la base des compartiments placée successivement aux altitudes -64 m, -20 m et 0 m.

Il en ressort que ces changements ont une influence sur la vitesse de la remontée des niveaux piézométriques: lorsque la base du compartiment est placée à une altitude plus élevée, cette vitesse diminue, lorsque cette base est abaissée, la vitesse augmente. Ceci s'explique par les échanges qui ont lieu entre les compartiments B, C et D et le compartiment A (dont la base est maintenue à -64 m): plus la base des compartiments B, C et D est élevée, plus les exportations de ces compartiments vers le compartiment A sont importantes, ce qui diminue la vitesse de remontée des niveaux piézométriques dans ces compartiments.

L'impact sur les débits se marque durant la phase de transition entre l'arrêt des pompes et l'arrêt de la remontée des niveaux piézométriques. Durant cette période, il peut y avoir de grosses différences dans les débits d'exhaure. Par contre, les valeurs des débit d'exhaure à l'équilibre ne sont pas influencées par le choix de l'altitude de la base du compartiment (Figure 8).

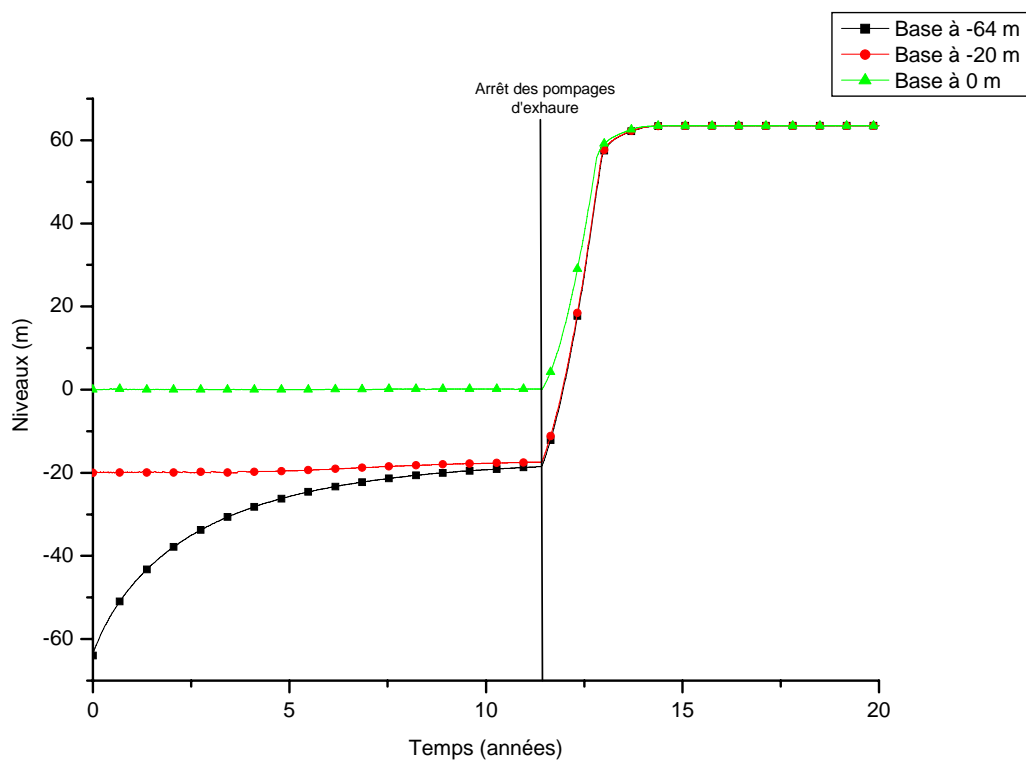


Figure 7 – Evolution des niveaux d'eau dans le compartiment B pour différentes altitudes de la base de ce compartiment.

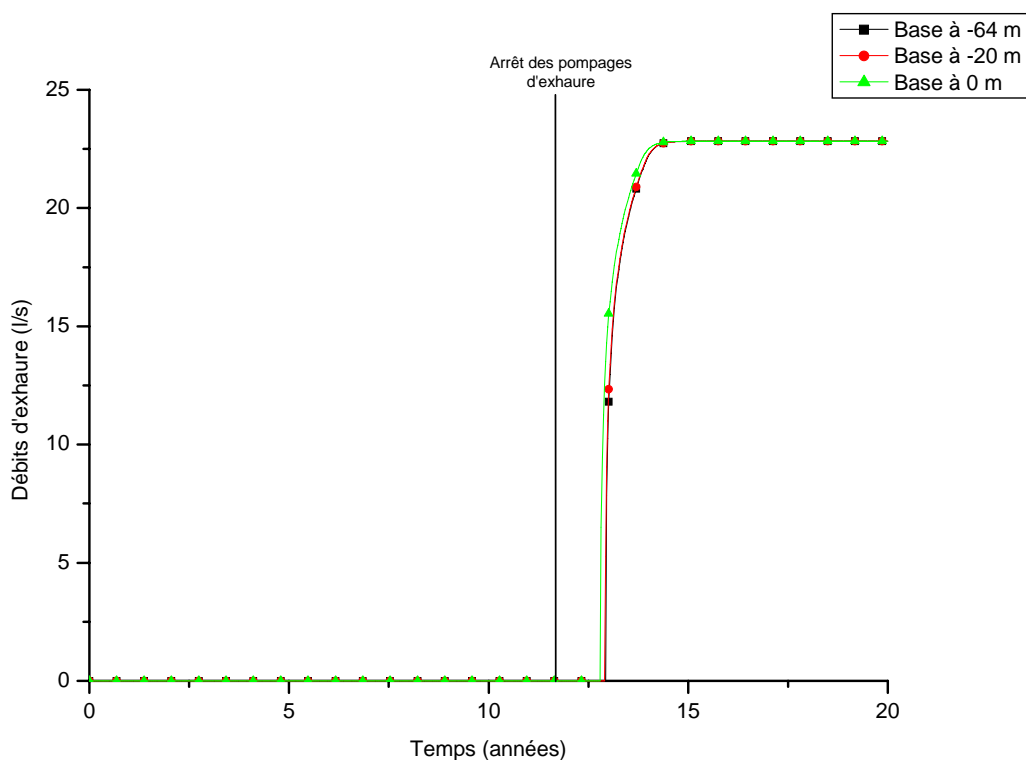


Figure 8 – Evolution des débits d'exhaure dans le compartiment B pour différentes altitudes de la base de ce compartiment.

Ces constations illustrées pour le compartiment B sont également valables pour les compartiments C, D et E.

2.6 *Simulations de divers scenarios*

Afin d'illustrer les potentialités du modèle, diverses situations ont été simulées: modélisation d'une situation complexe où des pompages d'exhaure ont lieu dans un compartiment alors qu'elles ont été arrêtées dans l'autre, modélisation d'un coup d'eau et subdivision du compartiment A.

2.6.1 Arrêts des pompages d'exhaure à des instants différents

Le premier modèle a été établi en considérant que les pompages d'exhaure ont tous été arrêtés simultanément. Or, il est vraisemblable que l'arrêt de ces pompages d'exhaure s'est étalé sur plusieurs années.

Le but de ce scénario est de représenter l'évolution de la situation lorsque les pompages d'exhaure sont arrêtés dans un des compartiments alors qu'ils se poursuivent dans un autre, l'arrêt des pompage d'exhaure dans cet autre compartiment se produisant quelques années après.

Ce scénario est inspiré de la situation qui prévalait avant le coup d'eau des aciéries de la Meuse, les informations sont tirées du procès qui a suivi cet incident.

En 1977, l'exhaure a été définitivement arrêtée dans la concession de Hazard-Cheratte (compartiments C et D), tandis que les pompages se prolongeaient au puits Marie (compartiment A), avec un débit de 6.000 m³/j, de façon à y maintenir le niveau d'eau à la cote -64 m jusqu'en juin 1982. Il semble qu'entre 1977 et 1982 des infiltrations d'eau ont eu lieu de la concession de Hazard-Cheratte vers la concession d'Argenteau-Trembleur. En 1982, après l'arrêt définitif de l'exhaure, ces flux se sont progressivement inversés.

La simulation débute au moment de l'arrêt des pompes dans la concession de Hazard-Cheratte. Quatre ans et demi après l'arrêt des pompes (1650 jours) dans la concession de Hazard-Cheratte, l'exhaure est arrêtée dans la concession d'Argenteau-Trembleur.

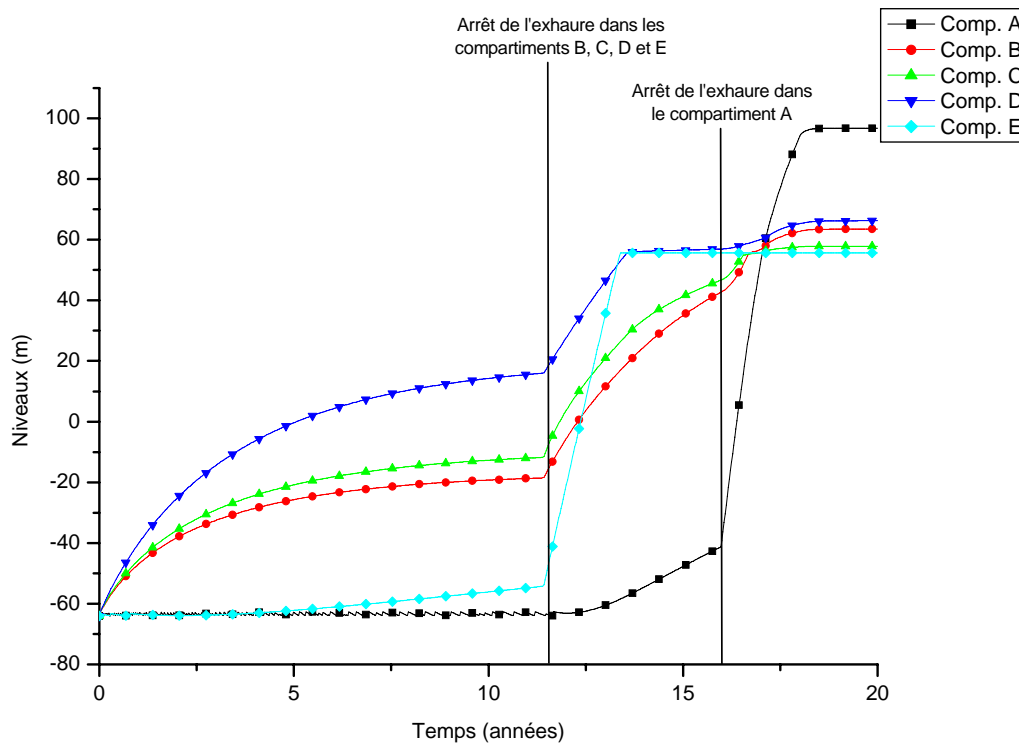


Figure 9 – Evolution des niveaux d'eau dans les compartiments suite à l'arrêt successif des pompes dans la concession de Hazard-Cheratte (1977) et dans la concession d'Argenteau (1982)

La Figure 9 représente l'évolution des niveaux d'eau dans les différents compartiments. Cette figure montre que la remontée dans les compartiments B et C est beaucoup plus lente car initialement, ces compartiments alimentent le compartiment A. Ce phénomène est moins marqué pour le compartiment D car la connexion qui lie ce compartiment au compartiment A offre une plus grande résistance à l'écoulement. Quant au compartiment E, il ne semble pas influencé.

Ces constatations sont confirmées par les flux entre compartiments (Figure 10). Initialement les flux entre le compartiment A et les compartiments B, C et D sont négatifs (ce qui indique que les flux se font vers le compartiment A). Cinq ans et demi après l'arrêt des pompages dans la concession de Hasard-Cheratte, ces flux s'inversent. Il convient également de noter une inversion des flux entre les compartiments B et C, suite à l'arrêt des pompages dans la concession d'Argenteau-Trembleur.

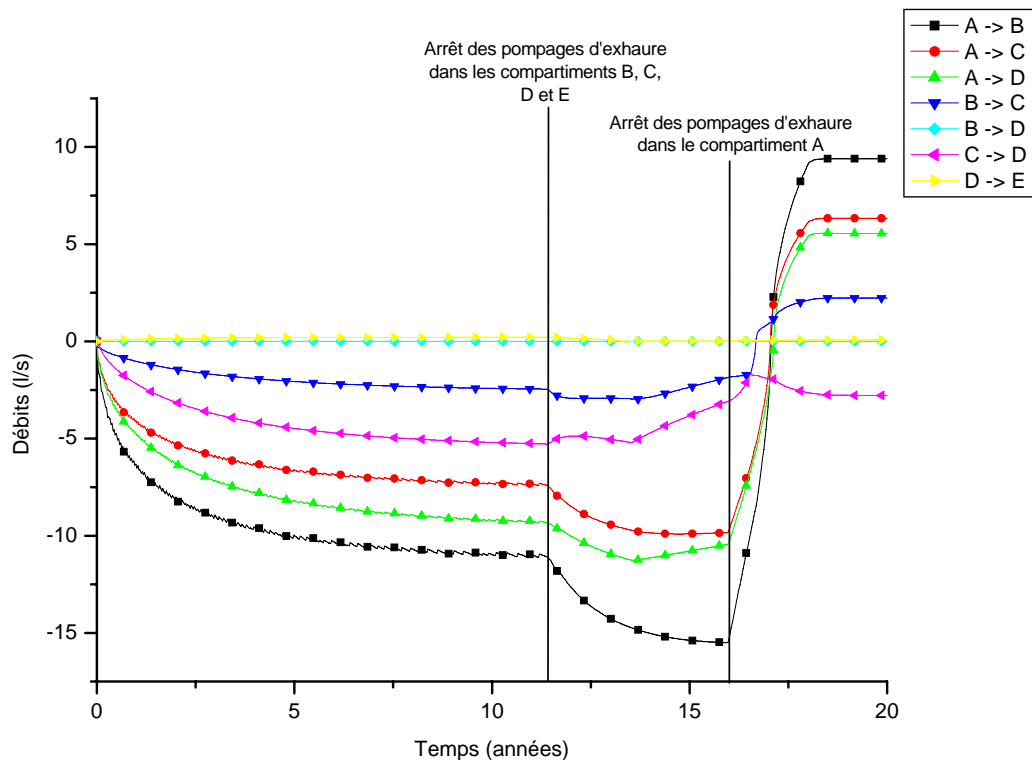


Figure 10 – Flux entre les différents compartiments suite à l'arrêt successif des pompages dans la concession de Hasard-Cheratte (1977) et dans la concession d'Argenteau (1982)

L'impact sur les flux d'eau en direction des eaux de surface se marque principalement sur le temps nécessaire pour qu'apparaissent les premières exhaures. Par contre, les débits d'exhaure en situation stabilisée ne sont pas influencés.

2.6.2 Coup d'eau

Le but de ce scénario était de tester la possibilité offerte par le logiciel de simuler un coup d'eau dans l'un des réseaux de galeries.

Ce scénario est inspiré des faits consignés dans le procès relatif au coup d'eau des aciéries de la Meuse.

De façon à simuler un coup d'eau se produisant dans le compartiment D, on considère que celui-ci est relié au eaux de surface par deux conduites différentes. Le coup d'eau est simulé en fermant l'une de ces deux conduites après un certains temps. Cette obstruction engendre une augmentation du niveau d'eau dans le compartiment. Lorsque le niveau atteint une certaine altitude (par exemple 80 m), la conduite est brutalement ouverte de façon à représenter le déboufrage de la galerie (Figure 12).

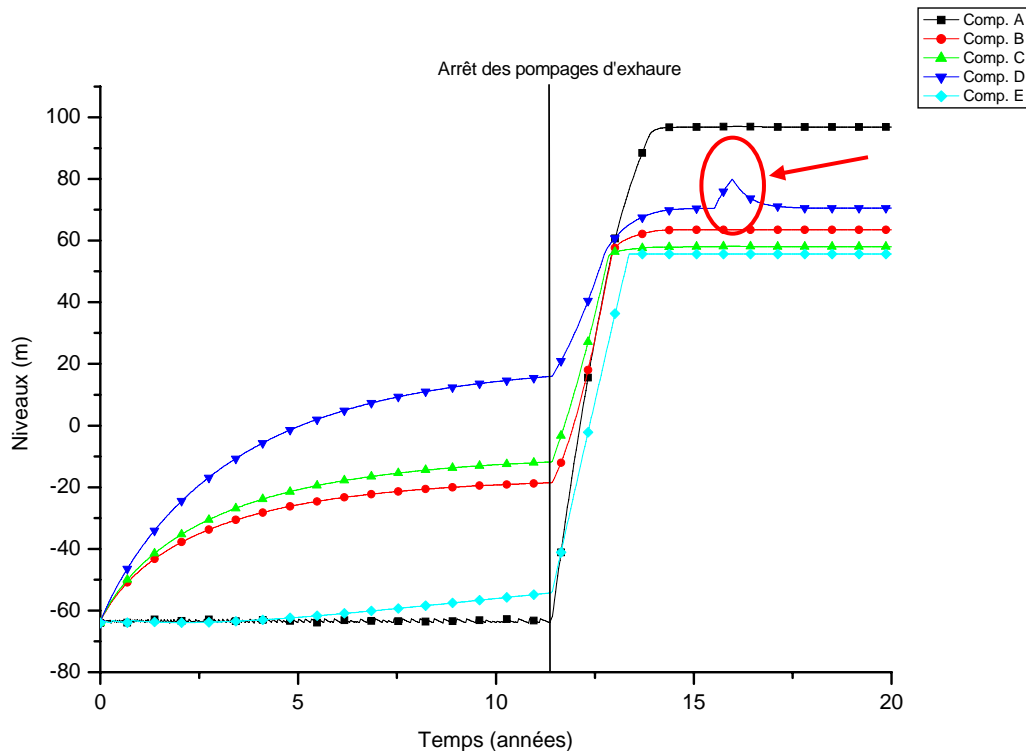


Figure 12 – Simulation d'un coup d'eau se produisant dans le compartiment D. Evolution des niveaux d'eau dans les différents compartiments

Cette figure montre que l'élévation de niveau de 15 mètres dans le compartiment D, suite à l'obstruction de la galerie d'exhaure, n'a pas d'impact sur les niveaux dans les autres compartiments.

Concernant les débits, la formation d'un bouchon provoque une interruption du débit d'exhaure de la galerie bouchée. Cette interruption engendre l'augmentation du débit d'exhaure de la deuxième galerie drainant le compartiment D ainsi qu'une augmentation des débits d'exhaure des compartiments A et C. Lorsque la galerie débouffe, le débit dans la galerie obstruée augmente brutalement. Le coup d'eau est suivi d'une courbe de "décrue"

correspondant à la vidange des terrains dans lesquels l'eau s'est accumulée lors de la formation du bouchon (Figure 13).

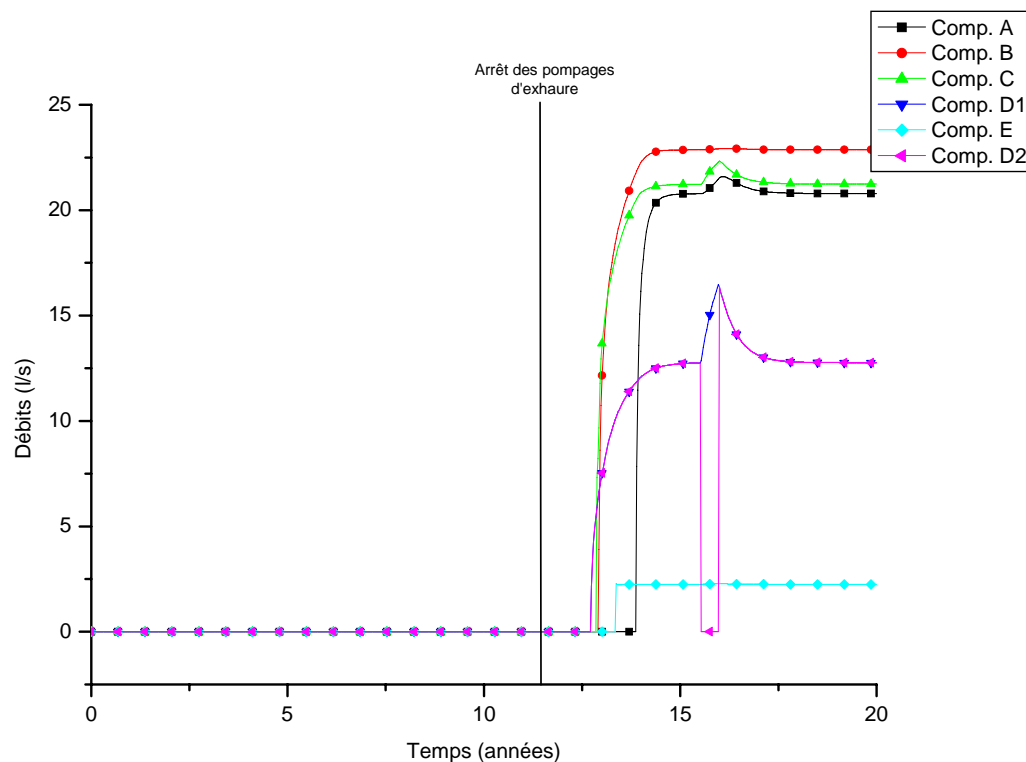


Figure 13 – Simulation d'un coup d'eau dans le compartiment D – Evolution des débits (l/s).

Afin de tester les paramètres influençant l'importance du coup d'eau, quatre scénarios ont été testés (Tableau 9). Deux paramètres ont été étudiés: l'importance de la section obstruée par rapport à la section totale des galeries drainant le compartiment et un paramètre caractéristique de la résistance du bouchon et qui est représenté par la hauteur d'eau maximum dans le compartiment provoquant le débordement de la galerie.

		Rapport: $\frac{\text{section des galeries obstruées}}{\text{section totale des galeries}}$	
		25 %	75 %
"Résistance" du bouchon	80 m	Scénario 1	Scénario 3
	90 m	Scénario 2	Scénario 4

Tableau 9 – Différents scénarios destinés à simuler le coup d'eau

Ces scénarios montrent que deux situations peuvent se produire: lorsque la section obstruée représente une petite fraction de la section totale des galeries drainantes, la formation du bouchon engendre une augmentation de niveau d'eau dans le compartiment mais celle-ci n'est pas suffisante pour donner lieu, ultérieurement, à une rupture du bouchon, car le compartiment reste suffisamment drainé. Lorsque la conduite s'obstrue, il n'y a plus d'eau qui sort par cette galeries et le débit augmente dans la galerie non obstruée. De même, le niveau d'eau augmente dans le compartiment et ce de façon non réversible (Figures 14 et 15 – Scénarios 1 et 2).

Par contre, si la section obstruée représente une partie importante de la section totale des galeries drainantes, cela donne lieu à un coup d'eau: lorsque le bouchon se forme, le débit augmente dans la conduite non obstruée, mais son diamètre n'est pas suffisant pour évacuer toute l'eau. Celle-ci s'accumule dans le compartiment jusqu'à la rupture du bouchon provoquant le coup d'eau: le débit augmente brutalement dans la conduite précédemment obstruée, et ce pic est suivi d'une courbe de décrue jusqu'à ce que le débit dans la conduite obstruée atteigne sa valeur d'avant l'obstruction. De même, le débit dans la conduite libre diminue progressivement (Figures 14 et 15 – Scénarios 3 et 4).

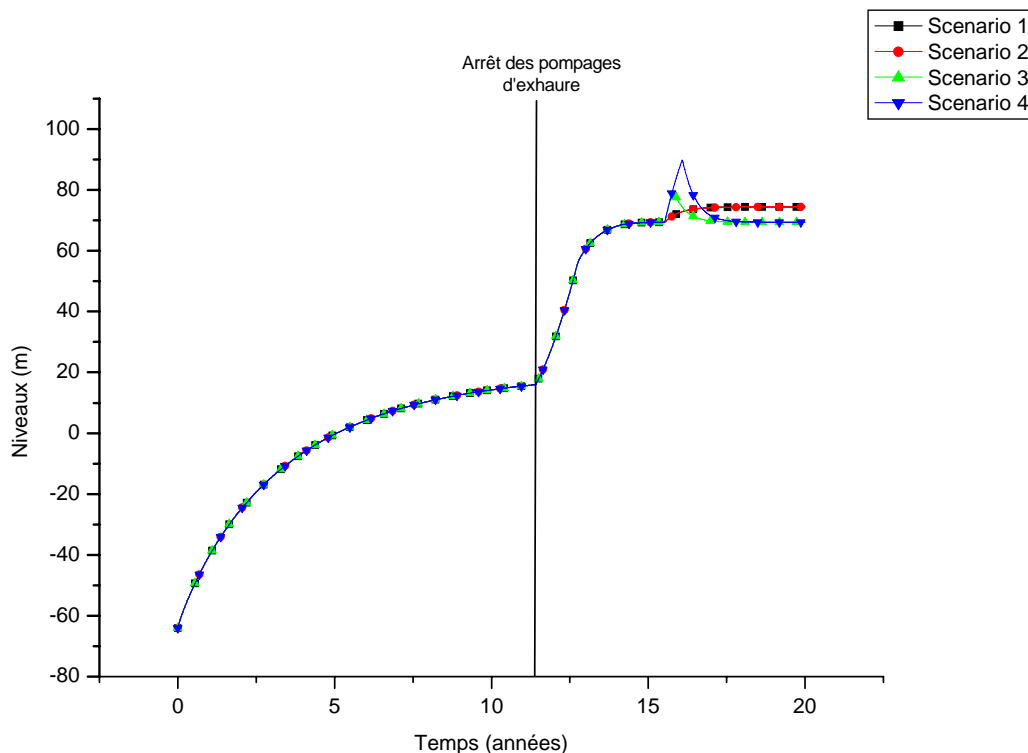


Figure 14 – Evolution des niveaux d'eau dans le compartiment D selon différents scénarios.

Par ailleurs, il apparaît (Figures 14 et 15) que la résistance du bouchon a un impact déterminant sur les niveaux atteints dans le compartiment et sur les débits de pointe obtenus lors du débouffrage de la galerie obstruée.

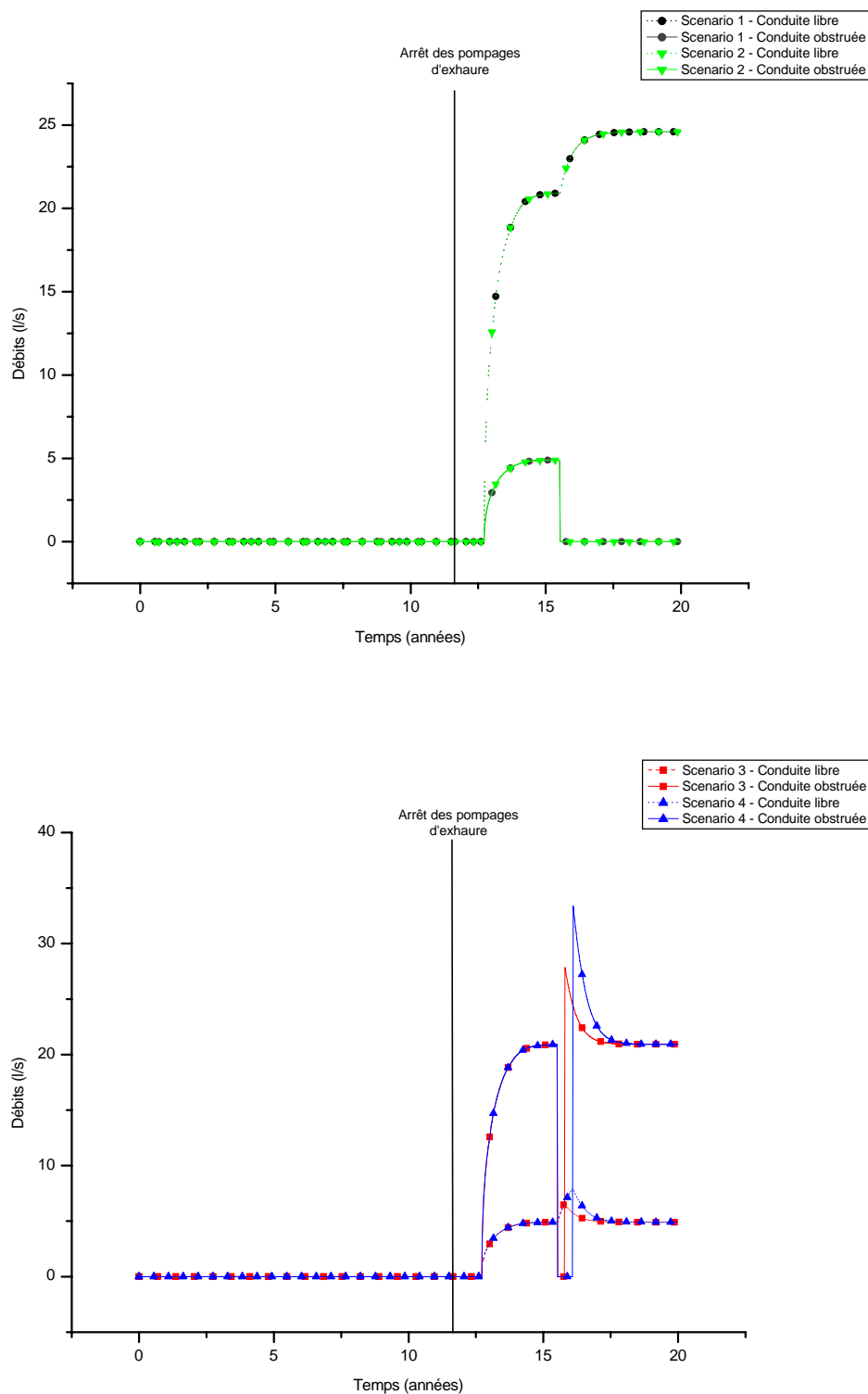


Figure 15 – Evolution des débits d'exhaure dans le compartiment D selon différents scénarios.

2.6.3 Partage du compartiment A en deux "sous-compartiments".

Lors de la construction du modèle, la concession d'Argenteau-Trembleur a été représentée par deux compartiments: les compartiments A et B. Dans le compartiment A, certaines mesures piézométriques sont plus basses que le niveau de la galerie d'exhaure (galerie Paradis, à ± 94 m d'altitude). Par ailleurs, la galerie Paradis donne un débit d'exhaure relativement élevé. Ces deux constations sembleraient indiquer que le compartiment A pourrait être représenté par deux compartiments différents caractérisés par des exutoires différents.

Le problème est qu'il n'est pas possible de connaître les caractéristiques individuelles de ces différents compartiments: leur volume et leur niveau de drainage respectif (un des compartiments est drainé par l'exhaure Paradis, mais pour l'autre, les exhaures n'ont pas été retrouvées). La seule grandeur pouvant être évaluée est le niveau d'eau caractéristique dans chacun des compartiments ainsi que le niveau de drainage et les débits d'exhaure du premier compartiment (drainé par l'exhaure Paradis). Ces grandeurs sont reprises dans le Tableau 10.

Paramètres	Compartiment A1	Compartiment A2
Niveau d'eau	97 m	88 m
Niveau de drainage	92 m	?
Débit d'exhaure	23 l/s	?

Tableau 10 – Caractéristiques des "sous-compartiments" A1 et A2.

Dans la région couverte par les compartiments A1 et A2, le niveau minimum des eaux de surface se situe à 92 m (exhaure Paradis) ce qui correspond au niveau de drainage du compartiment A1. Il n'est donc pas possible que le compartiment A2 se déverse directement dans les eaux de surface étant donné que son niveau d'eau caractéristique est inférieur au niveau minimum des eaux de surface dans la région. La simulation se fera donc en supposant que le compartiment A2 n'est pas connecté aux eaux de surface et qu'il se déverse dans les compartiments adjacents (B, C et D).

Etant donné l'absence de données qui permettent d'individualiser et de caractériser précisément les compartiments A1 et A2, il existe un nombre énorme de combinaisons de paramètres qui permettent de reproduire les résultats observés: connections entre A1, A2 et les autres compartiments, caractéristiques de ces connections, volume de A2 par rapport au volume total du compartiment A, recharge attribuée à chacun de ces compartiments,...

C'est donc une situation tout à fait arbitraire qui a été choisie mais qui présente l'avantage d'être la plus simple à modéliser:

- A1 n'est connecté qu'aux eaux de surface et à A2;
- A2 est connecté à A1 et aux compartiments B, C, D;
- A2 représente 25 % du volume total du compartiment A;
- A2 reçoit 25 % de la recharge pluviométrique qui était précédemment affecté au compartiment A;
- les pompages d'exhaure précédemment attribués au compartiment A se font désormais dans le compartiment A2 au niveau du Puits Marie.

Ceci revient à considérer que toute l'eau qui était précédemment échangée entre le compartiment A et les autres compartiments est fournie par le compartiment A2 qui la reçoit soit directement de la recharge pluviométrique, soit du compartiment A1. Par ailleurs, l'eau d'exhaure fournie par le compartiment A1 aux eaux de surface n'a qu'une seule origine: la recharge pluviométrique (le niveau des autres compartiment est trop bas pour permettre d'alimenter le compartiment A1), il faut donc que celui-ci ait une bonne alimentation. Il doit donc représenter une partie importante du volume total de l'ancien compartiment A (si l'on suppose que l'alimentation d'un compartiment est proportionnel à son volume).

La Figure 16 montre l'évolution des niveaux d'eau dans les différents compartiments suite à un arrêt des pompages simultanés dans tous les compartiments (excepté dans le compartiment A1 où il n'y a pas de pompages d'exhaure). Elle montre que le modèle peut expliquer les niveaux observés actuellement. De même, la Figure 17 représente l'évolution des débits échangés entre le compartiment A2 et les compartiments A1, B, C et D. Elle permet de constater que avant l'arrêt des pompages d'exhaure, les flux se font essentiellement vers le compartiment A2. L'arrêt des pompages d'exhaure est suivi d'une période au cours de laquelle les débits entre compartiments sont très variables. Après stabilisation, on peut constater que le compartiment A2 participe à l'alimentation des compartiments B, C et D alors qu'il reçoit de l'eau du compartiment A1.

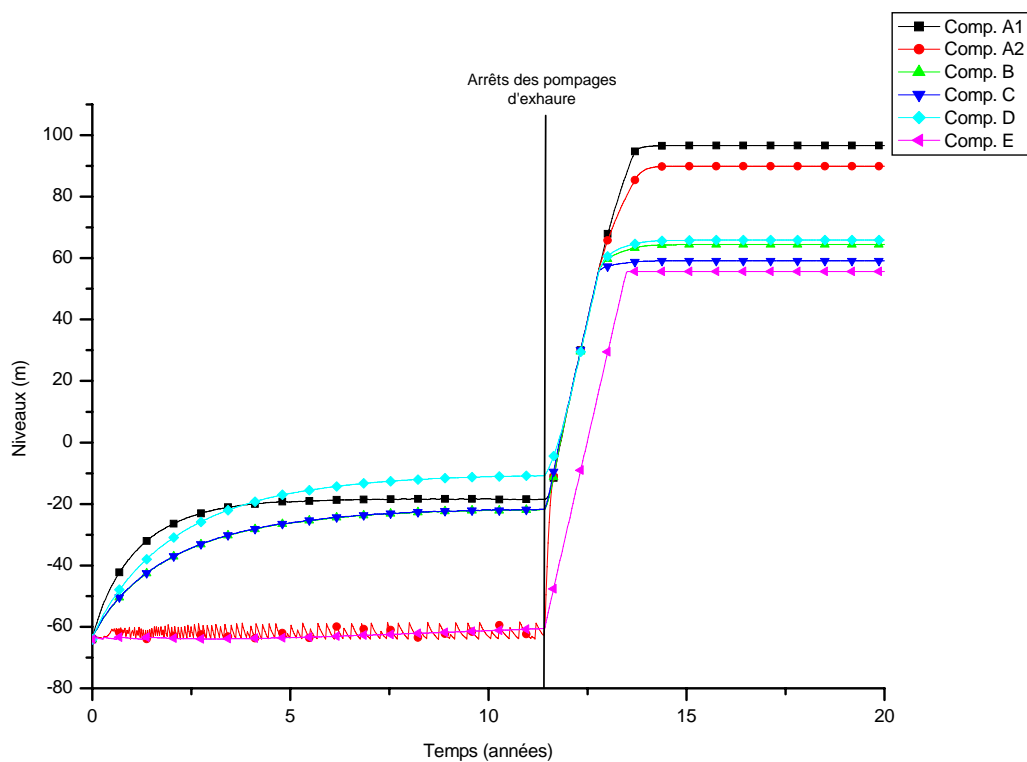


Figure 16 – Evolution des niveaux d'eau dans les différents compartiments lorsque le compartiment A est divisé en deux "sous-compartiments"

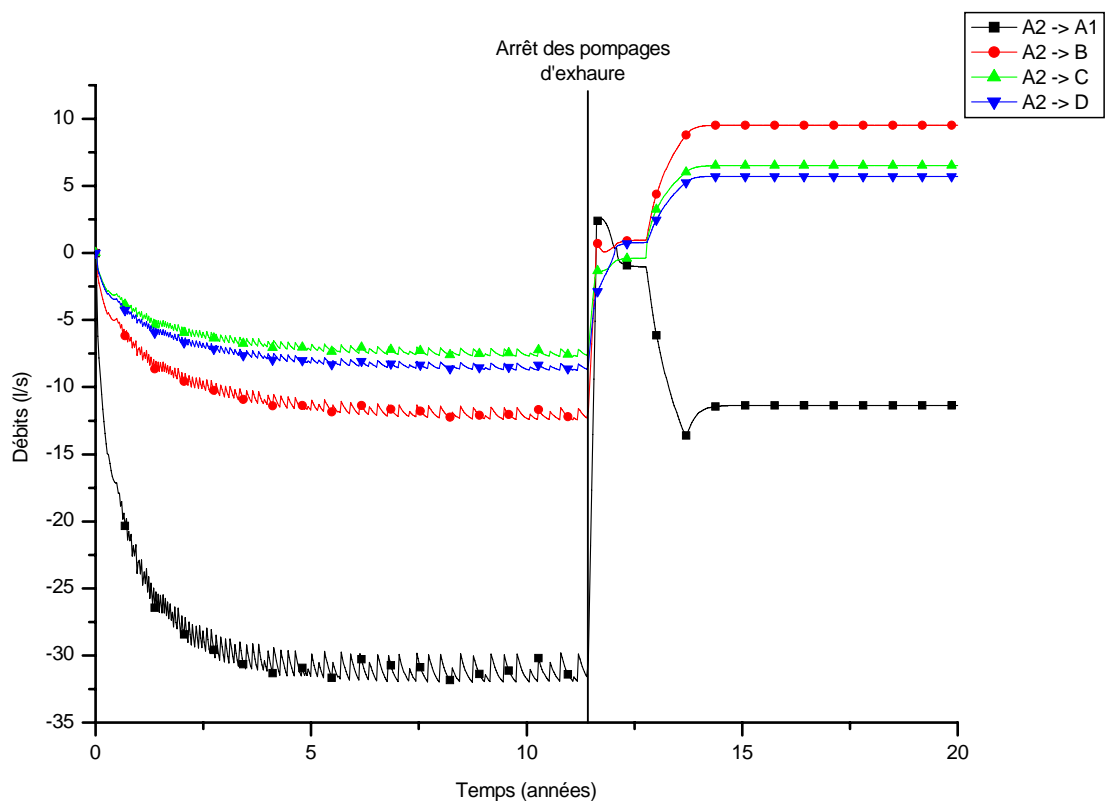


Figure 17 – Evolution des échanges d'eau entre le compartiment A2 et les compartiments A, B, C et D

3 Conclusions

La zone pilote de Cheratte a été modélisée par une approche "Box-Model". Dans ce but, le réseau de galeries a été divisé en 5 compartiments: les 4 compartiments représentant les concessions d'Argenteau-Trembleur (compartiments A et B) et de Hasard-Cheratte (compartiments C et D) sont tous interconnectés, par contre le compartiment de la concession de Espérance-Violette (compartiment E) n'est connecté qu'au compartiment D. Le volume de vide résiduel estimé globalement pour la zone d'étude a été réparti entre ces différents compartiments de façon très simplifiée sur base de la répartition des surfaces exploitées entre compartiments.

Après calibration, il apparaît que la représentation de la zone investiguée par une approche "Box Model", même très simplifiée, permet de reproduire les niveaux d'eau caractéristiques observés actuellement (donc stabilisés) dans les différents compartiments ainsi que les débits d'exhaure et les débits échangés entre les différents compartiments. De même, ce modèle indique que l'alimentation en eau du réseau de galeries est assez importante, ce qui semblerait indiquer que la zone d'alimentation de celui-ci est plus étendue que celle envisagée initialement, qu'il existe des apports d'eau à partir de zones d'exploitation voisines ou qu'il est alimenté par les pertes en eau du réseau d'eaux de surface. Par contre, la représentation de la remontée des niveaux piézométriques telle qu'elle s'est déroulée lors de l'arrêt des pompages d'exhaure nécessite plus d'informations: débits d'exhaure lors des pompages, niveau de l'eau avant l'arrêt des pompages, date de l'arrêt des pompages,...

Par ailleurs différentes simulations ont été réalisées de façon à déterminer l'impact du choix de certaines valeurs de paramètres sur les résultats du modèle. Il apparaît que l'un des paramètres qui a le plus d'importance est le volume des compartiments, celui-ci conditionne la vitesse de remontée des niveaux piézométriques. Par contre, le choix d'un niveau de référence pour les compartiments B, C, D et E semble avoir moins d'importance sur les résultats: l'impact des variations de ce niveau est minimisé par la modification des échanges entre ces compartiments et le compartiment A durant la remontée.

Il apparaît que ce modèle est capable de simuler des situations complexes telles que l'évolution des niveaux d'eau lorsque l'exhaure se poursuit dans une concession alors qu'elle a été arrêtée dans une autre. Pour cela, il faut connaître de façon plus précise le détail de ces pompages (débit d'exhaure, niveaux rabattus, date de l'arrêt de l'exhaure,...). Il semble

également possible de modéliser des coups d'eau, mais cela nécessite de connaître le contexte dans lequel cet incident a lieu (section obstruée, résistance du bouchon,...).

Le développement d'un premier modèle selon l'approche "Box Model" a permis de mettre en évidence les données nécessaires pour une telle modélisation.

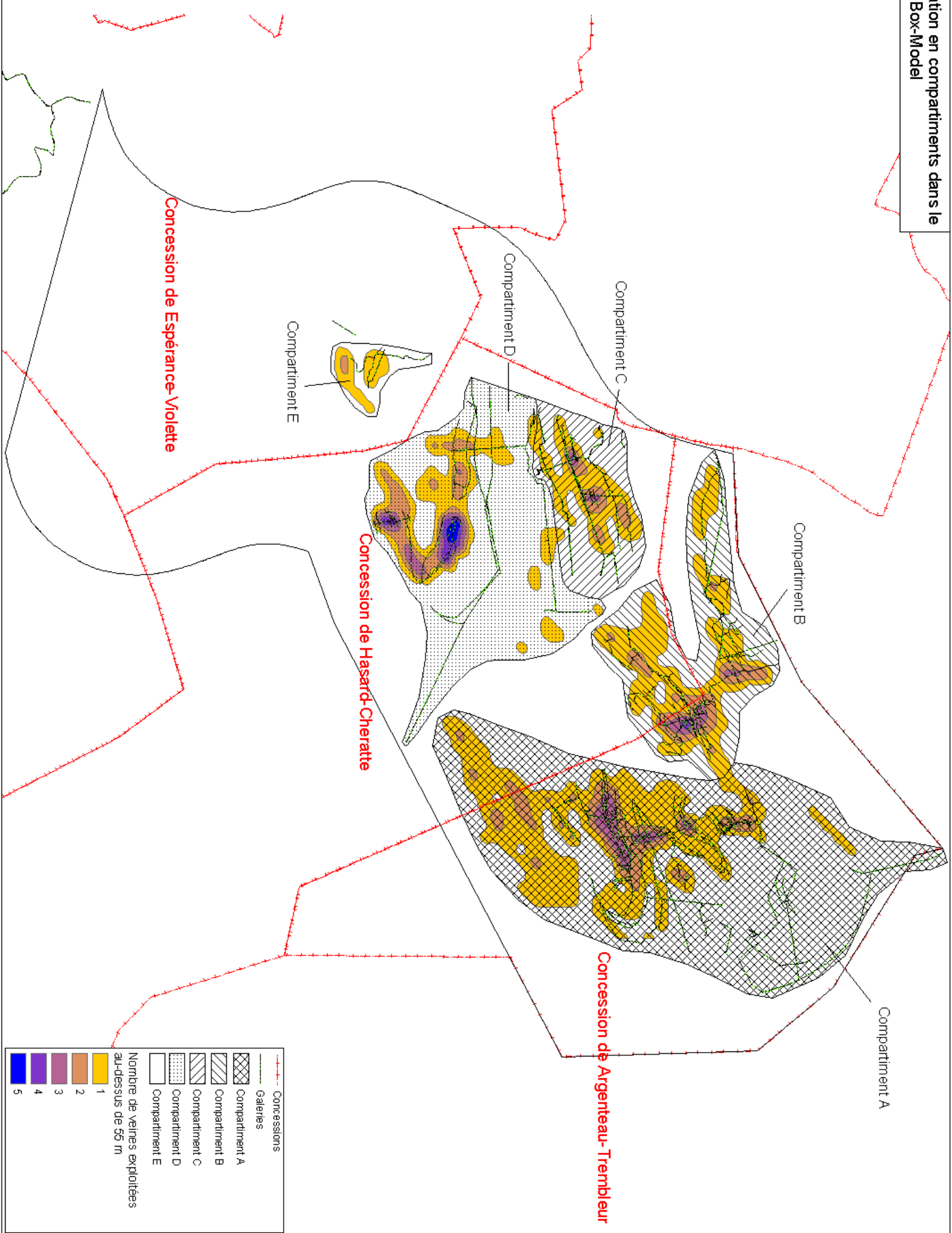
Il faut pouvoir identifier et caractériser au mieux les différents compartiments. L'identification et l'individualisation des compartiments se fait sur base des relevés des niveaux piézométriques dans les zones exploitées, des débits d'exhaure, des niveaux de drainage et du tracé des galeries sur plan minier. Pour le site de Cheratte, les données récoltées à ce sujet sont satisfaisantes. La caractérisation de ces compartiments demande une estimation précise du volume de vides représentés par chacun d'eux. La répartition de ces vides selon la verticale au sein de chaque compartiment permettrait de préciser (notamment au point de vue de la vitesse) le phénomène de remontée des niveaux piézométriques. Dans le cas présent, nous ne disposons que d'une estimation globale pour l'ensemble de la zone investiguée du volume de vides résiduels, celui-ci a été réparti de façon très grossière entre les différents compartiments.

La quantification des échanges entre compartiments nécessitent de connaître au mieux les connections existantes entre ces compartiments. Dans le cas présent, celles-ci ont été déduites lors de la calibration du modèle. Elles pourraient être précisées par des essais de terrain tels que des essais de traçage.

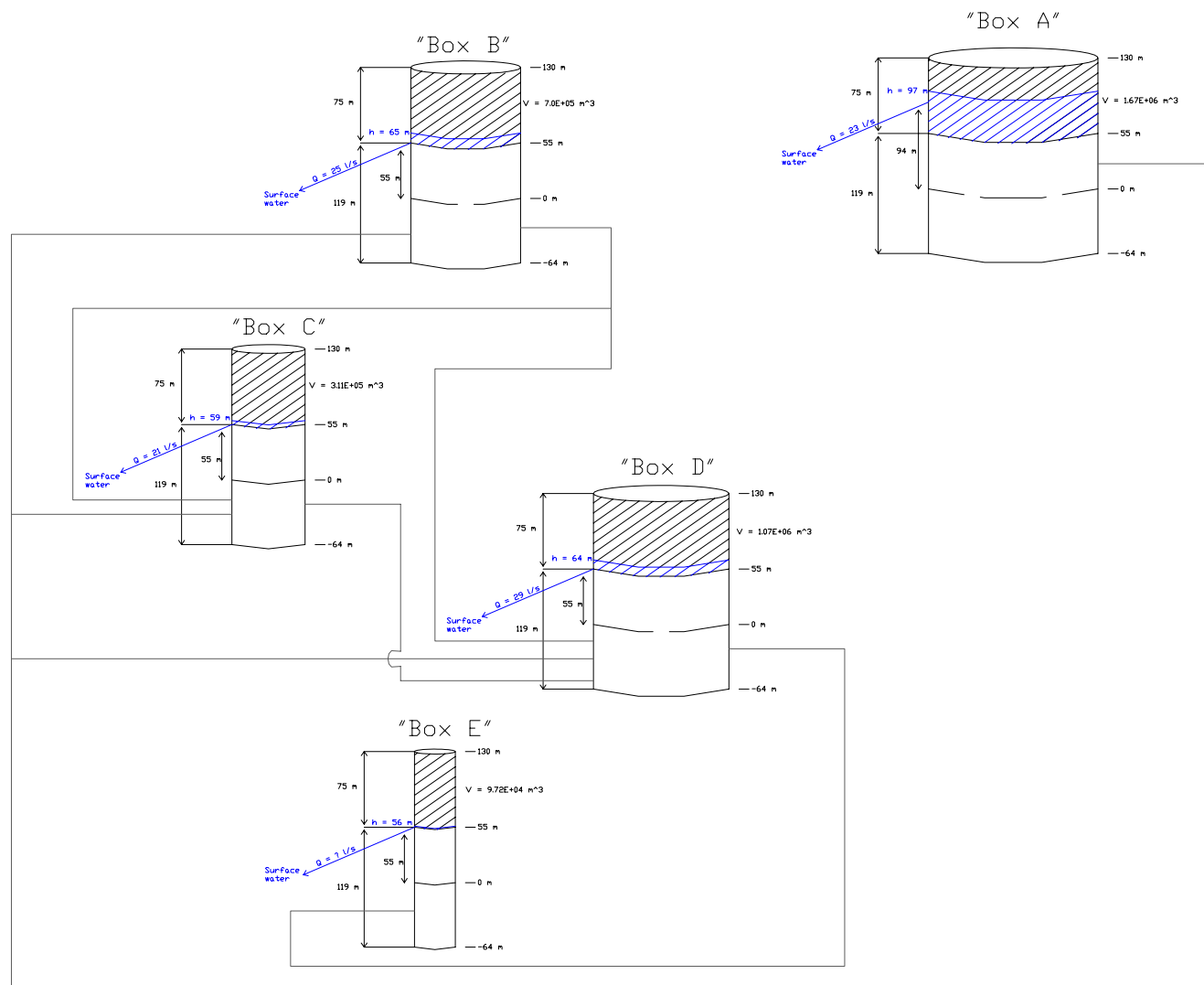
L'alimentation des différents compartiments a été déterminée par calibration. Il serait possible d'obtenir une estimation plus précise à partir des débits d'eau qui étaient extraits de ceux-ci avant l'arrêt des pompes d'exhaure.

Les résultats obtenus au cours de cette première phase de modélisation seront utiles pour la suite du travail qui consiste à développer un modèle selon une approche mixte: les zones exploitées sont représentées selon la méthode "Box Model", alors que les zones non exploitées sont représentées par une méthode classique de modélisation des écoulements d'eaux souterraines. Celui-ci permettra une modélisation plus précise des écoulements dans la zone d'étude. L'approche "Box Model" a en effet permis de préciser les connections qui étaient actives entre les différents compartiments et de quantifier les flux qui sont échangés entre ces compartiments, d'évaluer l'alimentation des différents compartiments et de mettre en évidence l'existence d'éventuels apports depuis des zones voisines ou des eaux de surface,... Ces résultats faciliteront la construction du modèle conceptuel de l'approche mixte.

Annexe 1 : Discretisation en compartiments dans le cadre de l'approche Box-Model



Annexe 2 – Conceptualisation du site de Cheratte selon une approche "Box Model"



Erratum

Page 32 – dernière ligne du dernier paragraphe

A la place de: *"Par contre, lorsque l'exhaure débute, les débits d'eau augmentent et se stabilisent très rapidement"*

Lire *"Par contre, lorsque le niveau de drainage des compartiments est atteint, les débits d'eau restitués aux réseaux d'eaux de surface augmentent et se stabilisent très rapidement"*

Page 34 – dernier paragraphe

A la place de: *"La Figure 4 illustre la superficie d'infiltration nécessaire pour assurer un alimentation..."*

Lire *"La Figure 4 illustre la superficie d'infiltration nécessaire pour assurer une alimentation..."*.

Page 43 – paragraphe sous le Tableau 15

A la place de: *"Etant donné que les temps de remontée obtenus avec l'hypothèse d'un volume de vide résiduel de $0,66 \times 10^6 \text{ m}^3$ sont extrêmement courts. Sur base des observations faites lors du coup d'eau des aciéries de Cheratte, il semble que ce volume soit trop faible et que l'hypothèse d'un volume de vide résiduel de $3,85 \times 10^6 \text{ m}^3$ est plus plausible,. Un volume de vide résiduel de $3,85 \times 10^6 \text{ m}^3$ sera donc conservé pour les autres modélisations."*

Lire *" Etant donné que les temps de remontée obtenus avec l'hypothèse d'un volume de vide résiduel de $0,66 \times 10^6 \text{ m}^3$ sont extrêmement courts comparativement aux observations faites lors du coup d'eau des aciéries de Cheratte, il semble que ce volume soit trop faible et que l'hypothèse d'un volume de vide résiduel de $3,85 \times 10^6 \text{ m}^3$ est plus plausible. Cette dernière hypothèse sera donc conservé pour les autres modélisations."*