

R 359

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
INRS-EAU

RAPPORT D'ÉTAPE N°2
Modélisation hydrodynamique

Par
Andrée Moïra Lebrun
et Olivier Banton

Présenté à
Robert Tremblay
et Claude Dufour

Mars 1992
Dans le cadre du contrat 9100355
Ministère de l'Énergie et des Ressources

INTRODUCTION

La modélisation hydrodynamique s'insère comme seconde étape dans le cadre du projet MER-9100355. Cette modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine est réalisée à l'aide du modèle mathématique MODFLOW (McDonald et Harbaugh, 1988)*. Ce logiciel utilise la méthode de calcul des différences-finies, pour des systèmes aquifères tridimensionnels.

Les applications, de ce modèle, reliées au projet sont: (1) de calculer la position de la nappe d'eau souterraine pour différentes périodes correspondant à différentes conditions de recharge appliquée dans le temps, et (2) de calculer la vitesse et les directions d'écoulement de la nappe et d'évaluer les débits d'entrée (recharge) et de sorties (écoulement aux brèches et infiltration à la nappe) pour ces mêmes périodes.

Quelques paramètres d'entrées sont nécessaires au modèle. La plupart ont été évalués lors de la réalisation de la première étape. Ils ne seront cependant pas tous utilisés comme tels comme il sera discuté plus loin. Les premiers paramètres requièrent une connaissance approfondie de la physique du terrain. Ceux-ci comprennent les élévations des différents constituants compris dans le système, les élévations de la nappe d'eau dans ces domaines et la localisation des discontinuités, telles les brèches et rivières. Les autres paramètres sont reliés aux caractéristiques physiques des domaines telles que la porosité efficace et la conductivité hydraulique. Pour tous ces paramètres, le modèle accepte soit une seule valeur représentant de façon homogène chacun des domaines, soit un champ de valeurs pour chaque domaine. Enfin, les conditions météorologiques doivent être connues afin d'évaluer la recharge pour chaque période pour laquelle on veut obtenir les hauteurs d'eau de la nappe.

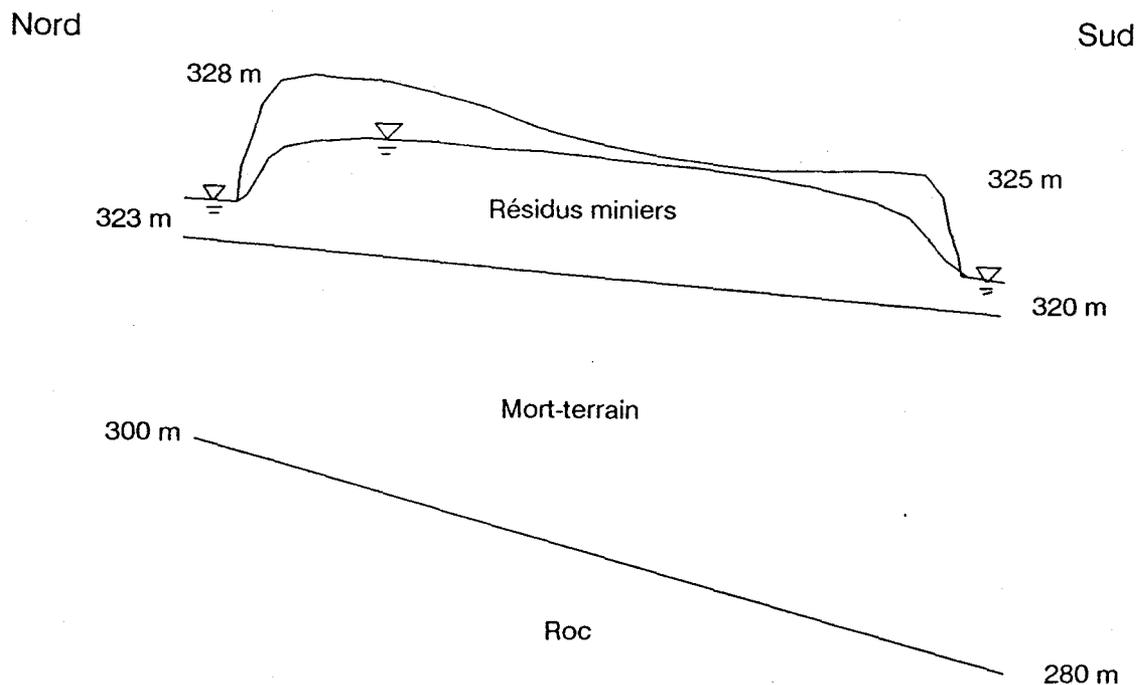
* McDonald, M.G. et Harbaugh, A.W., 1988. MODFLOW - A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Techniques of Water-Resources Investigations of the US Geological Survey. Modelling techniques, book 6.

PARAMETRES D'ENTRÉES

Comme il a été mentionné plus haut, certains paramètres acquis lors de la première partie du projet seront analysés ici. De plus, nous verrons de quelle façon les paramètres manquants peuvent être obtenus.

Il est nécessaire d'abord de définir les paramètres liés à la physique du terrain. Le système est constitué de deux couches: la couche supérieure constituée par les résidus miniers, et la couche sous-jacente représentée par le mort-terrain jusqu'à la zone considérée imperméable qu'est le socle rocheux. On fait donc abstraction des résidus forestiers. Ce système peut être représenté schématiquement par:

Figure 1:



Toutes les élévations sont représentées par un champ de valeurs généré par le logiciel SURFER, à partir des valeurs de paramètres connues.

- Les valeurs de la partie supérieure des résidus miniers, présentées à la Figure 2, proviennent de la carte topographique.

- Le champ de valeurs représentant l'élévation de la nappe d'eau dans les résidus miniers est généré à partir des onzes valeurs découlant de l'interprétation des sondages électriques. La carte de contour présentée à la Figure 3 diffère légèrement de celle présentée dans le premier rapport d'étape, du fait que l'interpolation des valeurs est effectuée ici sans tenir compte des valeurs extérieures en bordure du massif de résidus miniers. Cette interprétation s'approche davantage de la réalité.

- Étant donné le manque de précision au niveau des grandes profondeurs, de l'analyse des sondages électriques, il n'est pas possible d'utiliser les profondeurs du mort-terrain obtenues de la géophysique, pour générer le champ de valeurs représentant la topographie du mort-terrain. Pour réaliser la carte des élévations du mort-terrain, les valeurs de la topographie autour du massif ont été utilisées pour générer les valeurs sous le massif. Évidemment, on ne peut tenir compte ni de la présence d'une dépression naturelle, ni d'un affaissement possible du mort-terrain sous les résidus miniers dû à la compaction de la tourbe. La carte est présentée à la Figure 4. La charge hydraulique de l'eau dans cette couche correspond à celle de la couche supérieure, étant donné que le milieu est saturé et non confiné.

- Le dernier champ d'élévations nécessaire est la surface du roc, correspondant à la base de la deuxième couche. Les valeurs utilisées par SURFER proviennent d'anciens sondages d'exploration. La carte présentée à la Figure 5 montre une dépression importante, de direction nord-sud.

Figure 2: Topographie de surface du site minier East-Sullivan (m)

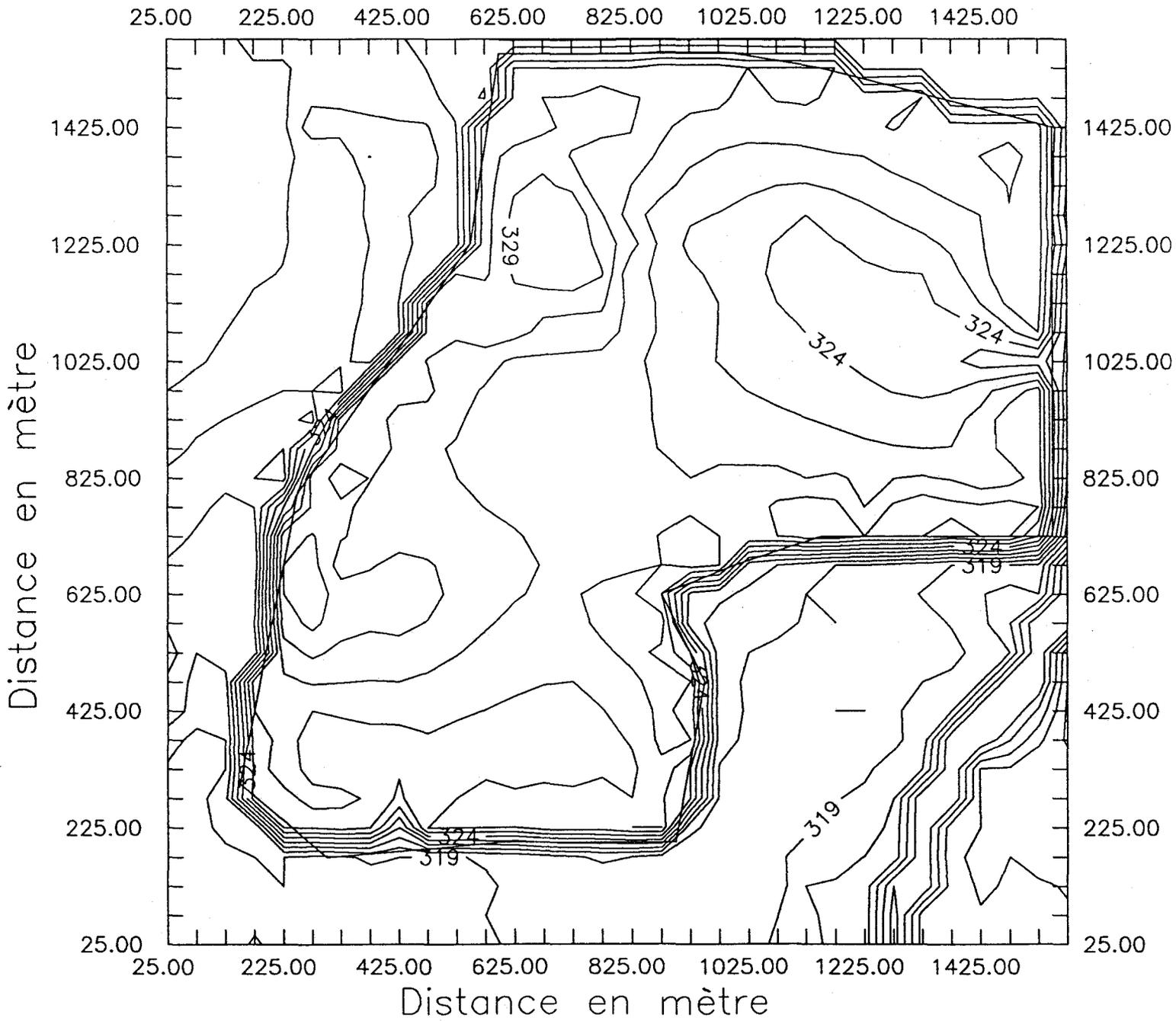


Figure 3: Élévations de la nappe d'eau souterraine (m) sur le site minier East-Sullivan en septembre 1991

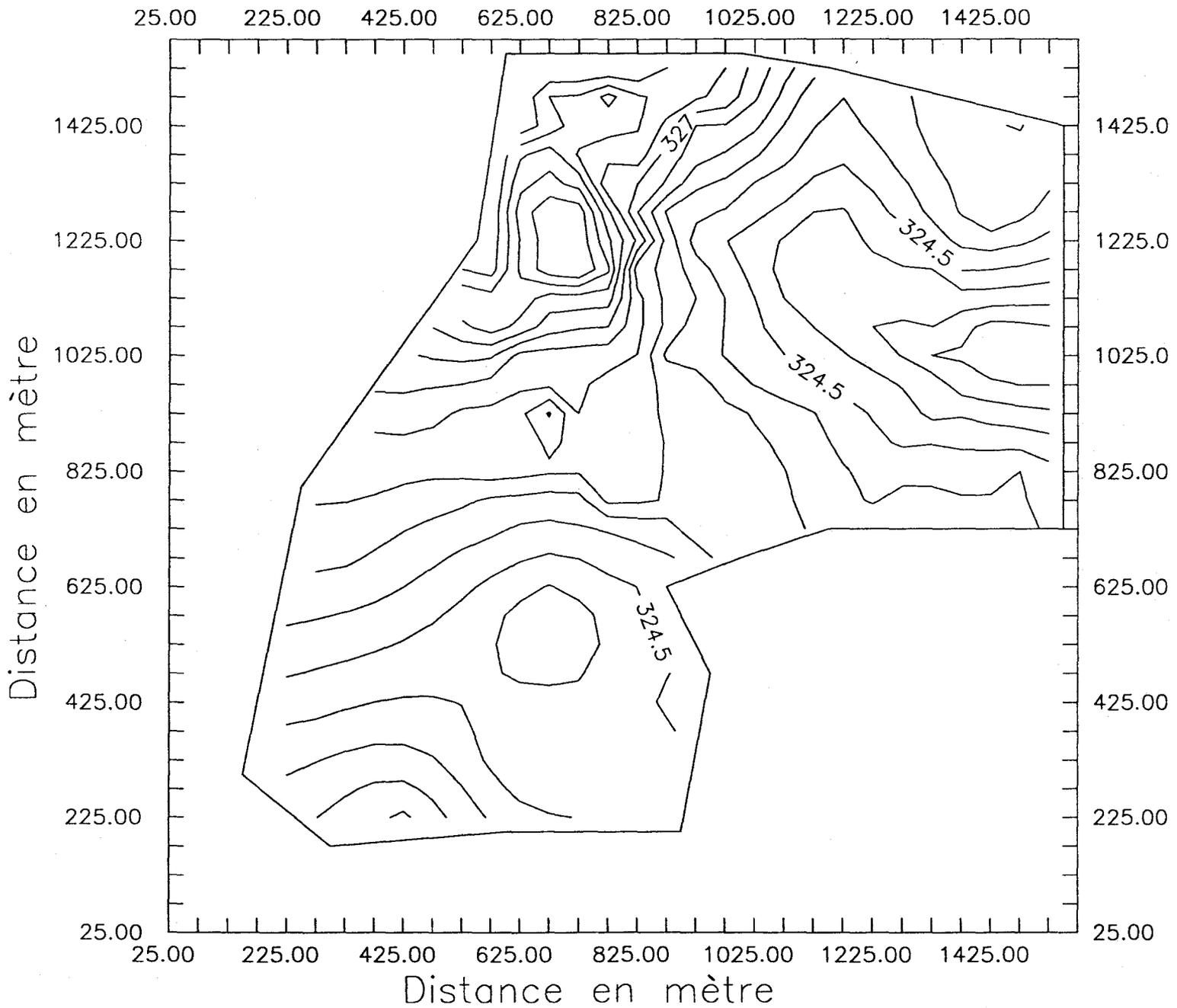


Figure 4: Élévations du mort-terrain (m) pour le site minier East-Sullivan

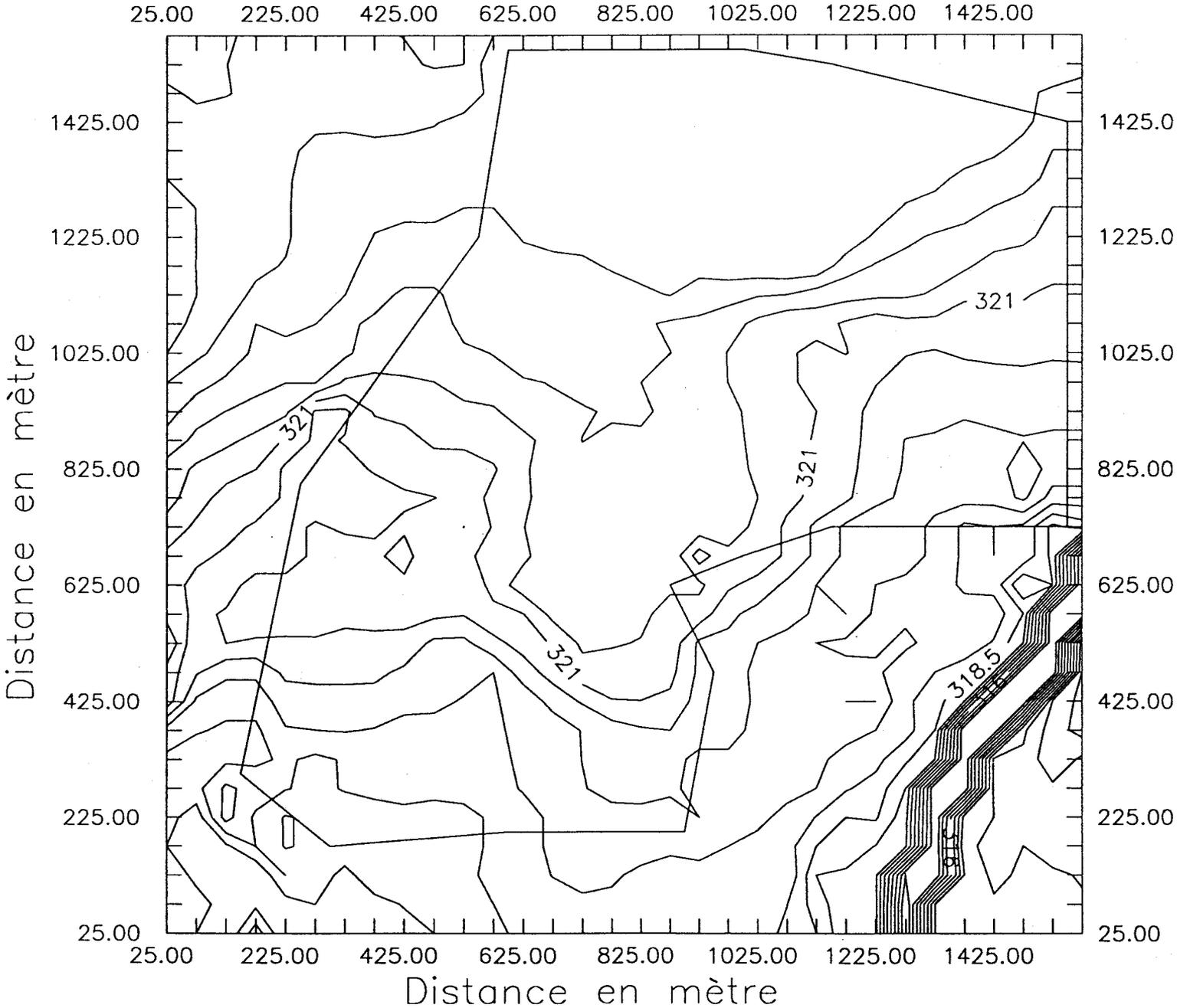
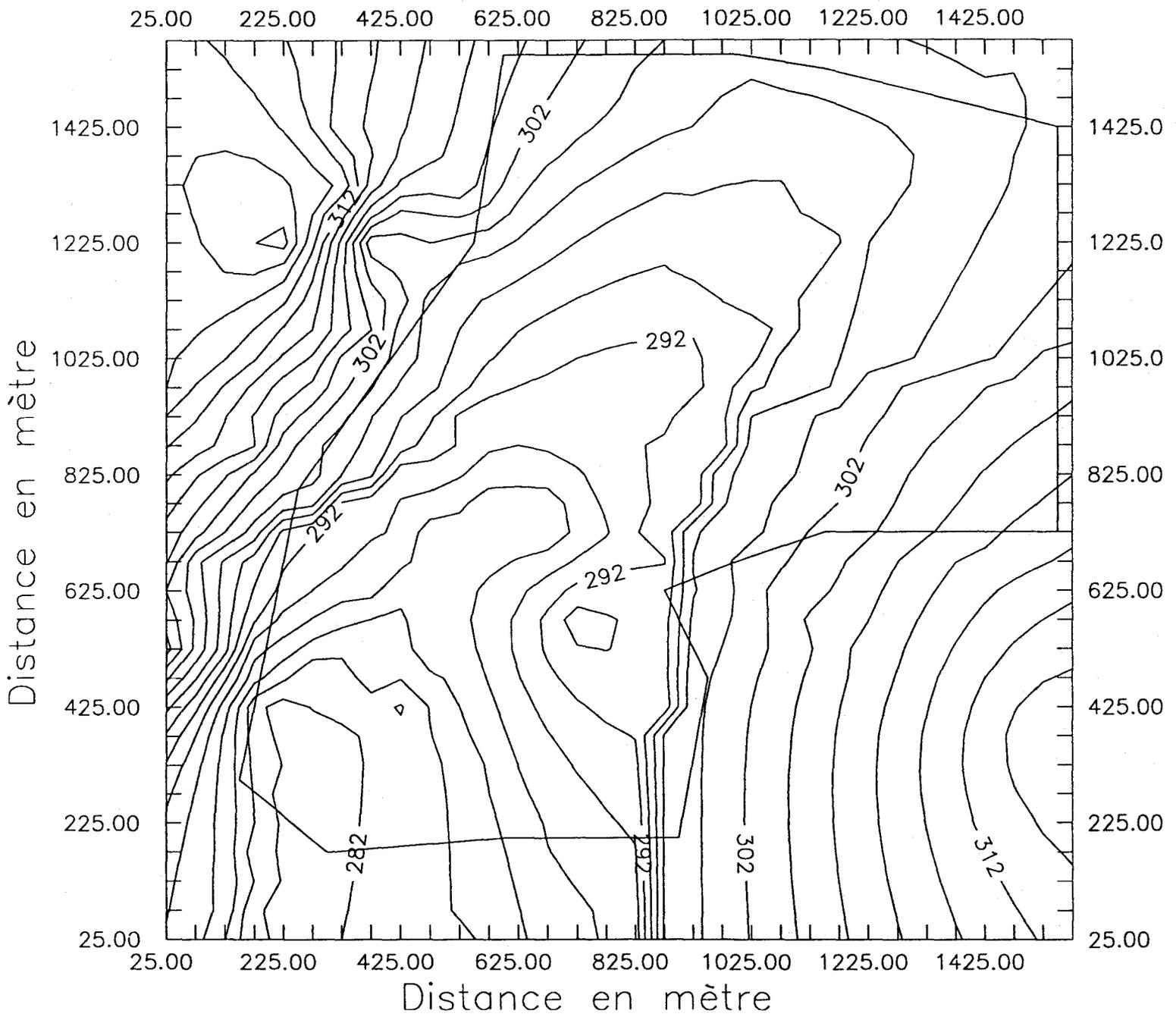


Figure 5: Élévations du roc (m) pour le site minier East-Sullivan



Le rapport précédant a fourni les cartes de conductivités hydrauliques obtenues en laboratoire pour trois profondeurs (1-7cm, 24-30cm et 52-58cm) et sur le terrain (en surface). Étant données les grandes différences entre les cartes obtenues, le choix d'un champ de valeurs représentatif du terril n'est pas concevable. Cette variabilité peut être expliquée par les matériaux plus grossiers déplacés sous l'effet du vent, ainsi que par les fentes de dessiccation observables. La moyenne a donc été calculée pour l'ensemble des valeurs d'une même profondeur. Le Tableau 1 présente les moyennes des conductivités hydrauliques obtenues.

Tableau 1:

Profondeur	1 - 7 cm	24 - 30 cm	52 - 58 cm
Laboratoire	$.25 \times 10^{-2}$ m/h	$.41 \times 10^{-2}$ m/h	$.49 \times 10^{-2}$ m/h
Terrain	1.17×10^{-2} m/h	----	-----

La moyenne des valeurs des deux types de mesures pour la surface est de $.71 \times 10^{-2}$ m/h. Elle est représentative de l'infiltrabilité de l'eau de pluie dans la couche supérieure. Les deux autres profondeurs ont des moyennes d'environ $.45 \times 10^{-2}$ m/h qui peuvent être considérées comme plus représentatives des résidus miniers en place, donc devant être utilisées pour la modélisation. Cette moyenne peut cependant surévaluer la conductivité hydraulique réelle du résidu non-oxydé situé plus profondément.

La même approche a été effectuée pour évaluer la porosité efficace. La moyenne a été effectuée pour chacune des profondeurs. Ces moyennes sont présentées au Tableau 2.

Tableau 2:

Profondeur	1 -7 cm	24 - 30 cm	52 - 58 cm
Porosité efficace	.39	.41	.38

Considérant les deux profondeurs inférieures comme étant représentatives de l'ensemble du milieu, la moyenne entre ces deux valeurs (.40) est retenue pour être utilisée dans le modèle.

Les dernières informations nécessaires au modèle sont les données météorologiques. Ces valeurs sont la précipitation et l'évapotranspiration utilisées pour les calculs du bilan annuel ainsi que pour l'évaluation de la recharge appliquée pour des périodes données.

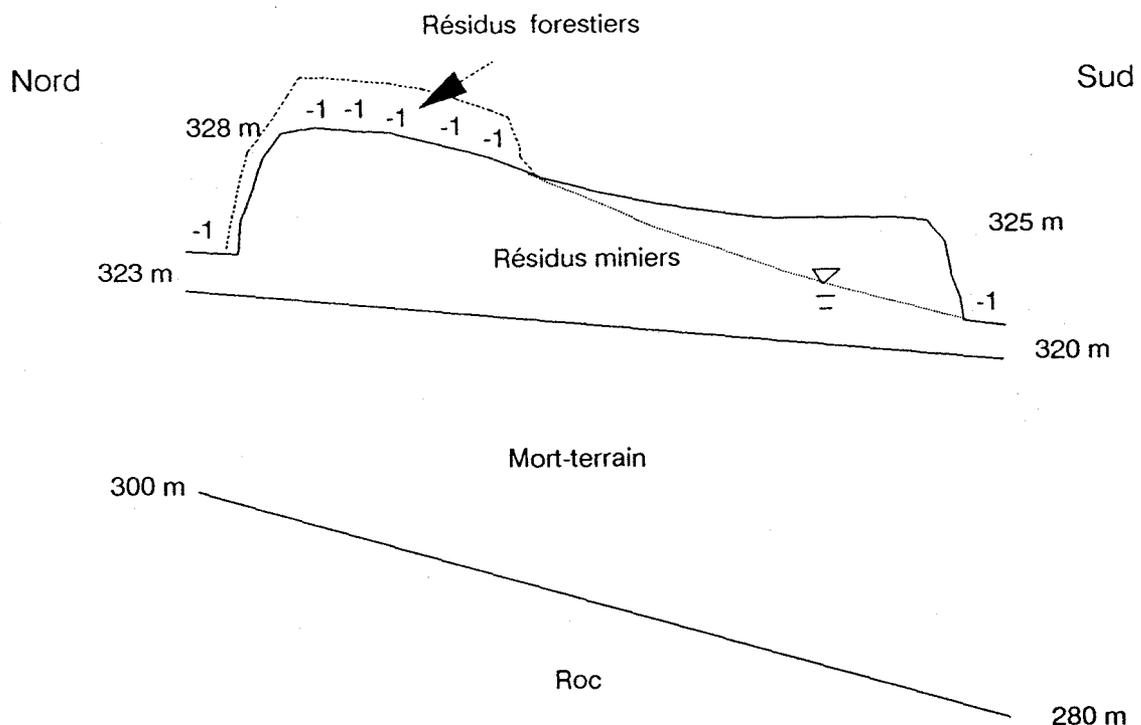
- Deux périodes seront analysées. Premièrement, la période estivale où la précipitation efficace est considérée nulle étant donné que l'évapotranspiration potentielle est plus grande que les précipitations réelles durant cette saison. L'alimentation des résidus miniers en eau pendant l'été est due à l'essuyage des résidus forestiers recouvrant le terril. La seconde période est celle où les conditions sont maximales c'est-à-dire où le massif de résidus miniers est totalement saturé. Les périodes hivernale et printanière ne peuvent être simulées car l'eau disponible pour l'infiltration ne peut être connue du fait du rôle du gel, de la neige et de son balayage par le vent.

- La précipitation annuelle moyenne sur dix ans (pluie + neige) est de 0,932 mètre et l'évapotranspiration moyenne annuelle sur 15 ans est de 0,503 mètre.

MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE

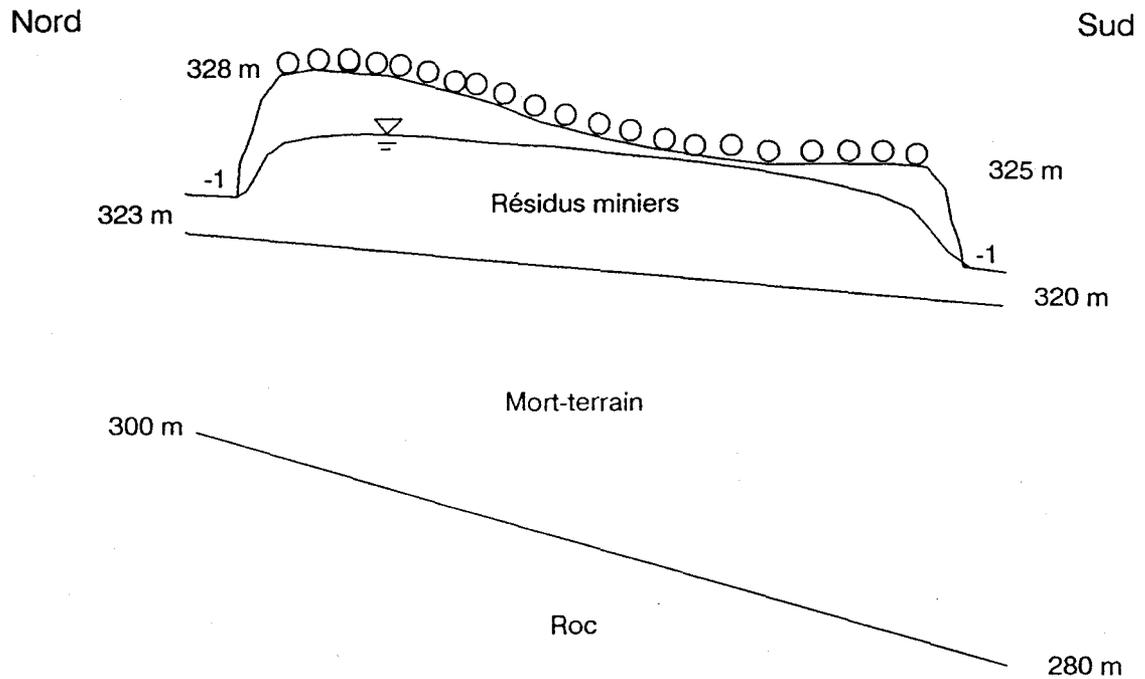
Les paramètres d'entrée, décrits plus haut, sont utilisés dans les diverses étapes de la simulation. Deux systèmes seront utilisés: un premier système servant lors des simulations en période estivale et un deuxième système pour les autres simulations.

Figure 6: Schéma (A) utilisé pour les simulations en période estivale



Les valeurs de (-1) représentent l'imposition d'une charge constante. Les valeurs imposées placées autour du massif correspondent au rabattement de la nappe au pourtour de celui-ci, et à la présence permanente des zones inondées entourant le massif. Les charges imposées disposées sur le massif représentent l'alimentation continue résultant du ressuyage des résidus forestiers.

Figure 7: Schéma (B) utilisé pour les simulations avec recharge



Les valeurs de (-1) sont toujours présentes au pourtour du massif de résidus miniers. On retrouve de plus des drains sur toute de la surface des résidus, destinés à représenter le drainage de surface correspondant au ruissellement engendré par la saturation du milieu. Les simulations utilisant cette représentation du système, ne tiennent pas compte de la présence des résidus forestiers.

1 - CALIBRATION DU MODELE

Un ensemble de simulations a été réalisé, afin de vérifier le comportement du modèle pour chaque étape de complexification du système. Les étapes de cette calibration sont détaillées ci-après.

1.1 - Modélisation réalisée avec une recharge nulle et aucune charge imposée sur le massif. Le mort-terrain est intégré aux résidus miniers. Le rabattement de la nappe est conditionné par les charges imposées dues à l'eau entourant le massif. Le résultat est présenté à la Figure 8. Les valeurs des isocontours doivent être majorées de 300 mètres pour obtenir les élévations réelles. On peut y observer la tendance de l'écoulement régional de direction sud-est. De cette simulation, on peut déduire l'importance de l'écoulement horizontal au travers des résidus et du mort-terrain correspondant à une situation d'assèchement. Celui-ci est de $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$ pour des valeurs de conductivité hydraulique et de porosité efficace du mort-terrain équivalentes à celles des résidus.

1.2 - Modélisation effectuée avec une variation de la recharge sur la couche des résidus miniers. Pour les simulations suivantes on n'utilise que la couche supérieure du schéma B . On considère que le mort-terrain est imperméable et on simule l'écoulement au travers des résidus miniers pour une section d'écoulement en périphérie de 10 cm ou 50 cm, tel que représenté sur le schéma suivant.

Figure 9:

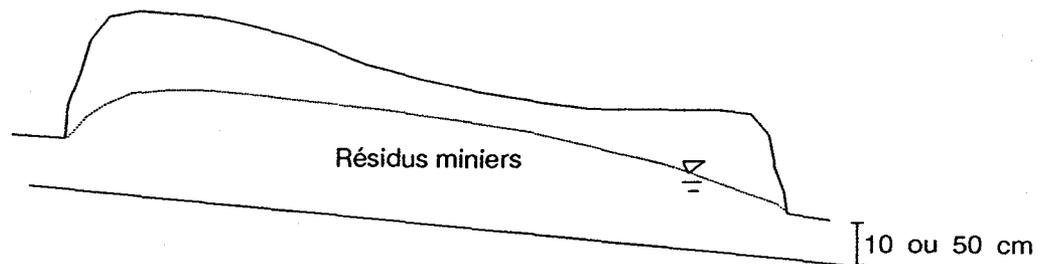
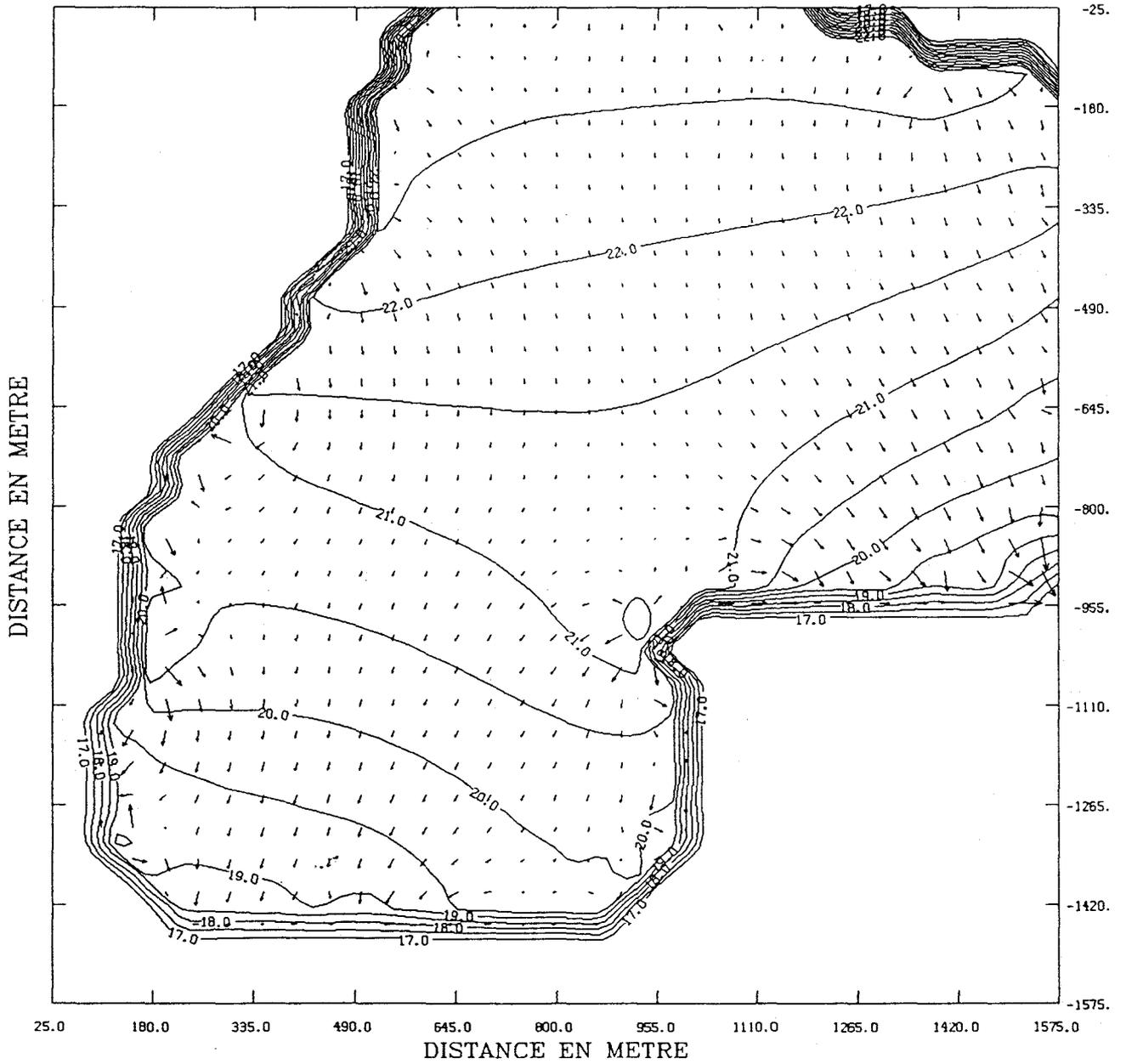
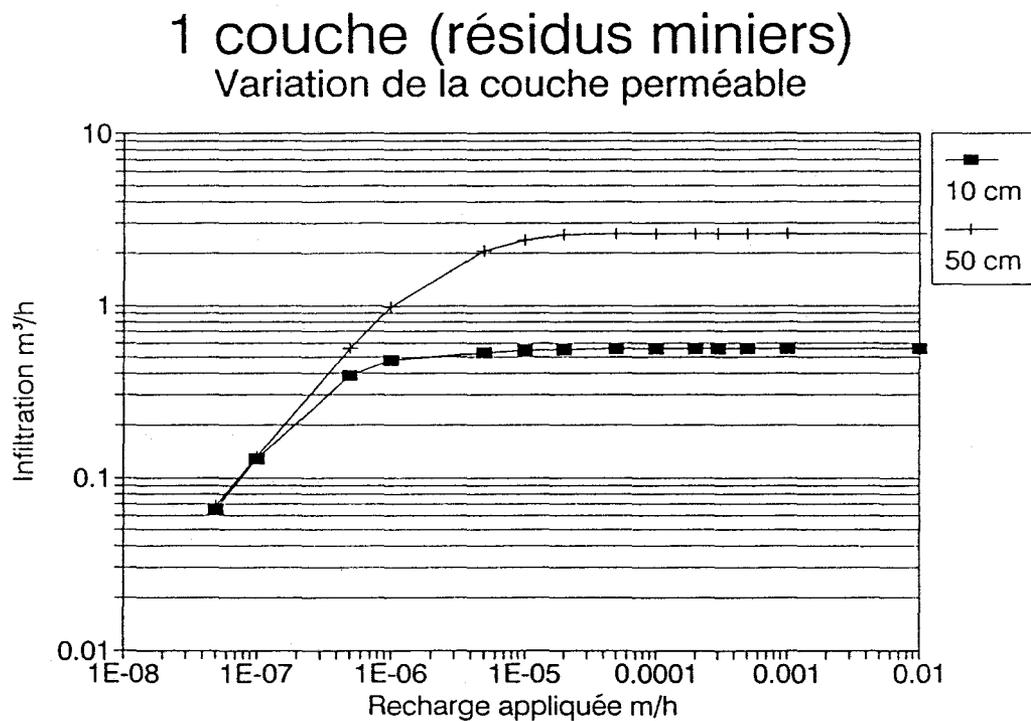


Figure 8: Charges hydrauliques (m) en situation d'assèchement du massif de résidus miniers East-Sullivan



On augmente progressivement la recharge appliquée jusqu'à saturation du milieu, de 10^{-8} à 10^{-1} m/h. La recharge appliquée est l'appellation technique de la précipitation efficace. Tout comme la précipitation efficace, elle se subdivise en deux parties: l'infiltration dans le massif et le ruissellement de surface qui est contrôlé par les drains dans le modèle. Les résultats présentés à la Figure 10 montrent pour une augmentation de la recharge appliquée, une augmentation de l'infiltration jusqu'à un maximum de $.56 \text{ m}^3/\text{h}$ pour une sortie d'eau par 10 cm et de $2.61 \text{ m}^3/\text{h}$ pour une sortie d'eau par 50 cm. L'infiltration est donc directement reliée à l'épaisseur de la zone à travers de laquelle l'écoulement vers l'extérieur du massif a lieu, avec un rapport de proportionnalité de 0.94. Le Tableau (A1) des valeurs est placé à l'annexe A.

Figure 10:



1.3 - Simulation en condition d'enneigement, et mort-terrain intégré à la première couche. On considère donc une seule couche; les paramètres du mort-terrain sont les mêmes que pour les résidus. On utilise le schéma B et la recharge appliquée est suffisamment grande pour obtenir une saturation. L'infiltration obtenue est de 72.15 m³/h.

1.4 - Modélisations pour la situation estivale. Les simulations pour cette étape reproduisent ce qui a été fait en 1.2 et 1.3, mais pour la situation estivale; on utilise donc le schéma A.

La première série de simulation est effectuée avec une couche, et on fait varier l'épaisseur des résidus au pourtour du massif par où l'eau s'écoule. Lorsque cette épaisseur est de 10 cm l'infiltration est de .25 m³/h et pour une épaisseur de 50 cm l'infiltration est de .35 m³/h. Le rapport de proportionnalité est de .28 dans ce cas ci.

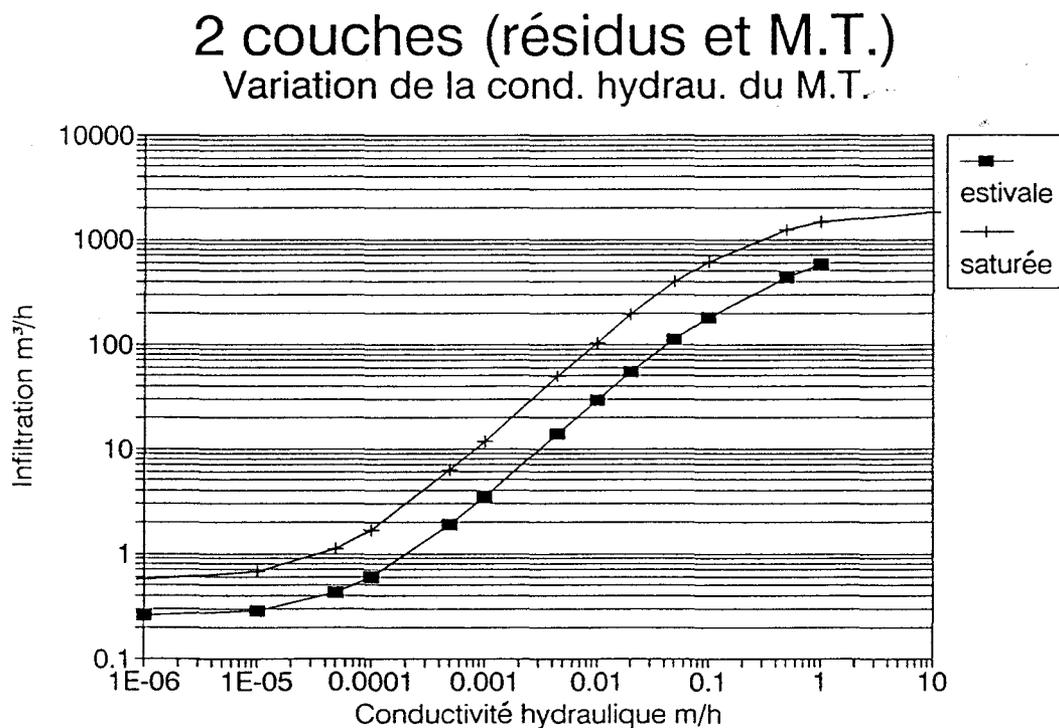
Une autre simulation est effectuée en intégrant la seconde couche à la première, avec des paramètres caractérisant le mort-terrain équivalents à ceux des résidus miniers. L'infiltration obtenue est de 4.44 m³/h.

2 - SIMULATION

Les simulations suivantes reproduisent le plus fidèlement possible l'état du système. Les simulations portent sur la période estivale ainsi que sur les situations de recharge allant jusqu'à l'enneigement du site, selon la variation de différents paramètres.

2.1 - Simulation portant sur les effets de la variation de la conductivité hydraulique du mort-terrain sur l'infiltration. Cette étape est divisée en 2 parties. Premièrement, les simulations sont effectuées selon les conditions de recharge imposées pour la situation estivale avec différentes conductivités hydrauliques du mort-terrain. Deuxièmement, on utilise le schéma B avec une recharge suffisante pour l'enneigement du massif, quelque soit la valeur de la conductivité hydraulique du mort-terrain. La Figure 11 présente les courbes obtenues. Le Tableau (A2) des résultats est placé à l'annexe A.

Figure 11:



Les infiltrations obtenues pour des caractéristiques de mort-terrain équivalentes à celles des résidus sont de 48.9 m³/h pour la situation de saturation et de 13.9 m³/h pour la situation estivale. Ces valeurs diffèrent de façon significative des valeurs obtenues lorsque le mort-terrain est intégré à la première couche comme vu dans la partie calibration. On peut expliquer ceci soit par l'introduction d'un processus de transfert des eaux de la couche résidus à la couche mort-terrain, soit par l'état de confinement différent de chacune des couches .

Les Figures 12 à 17 représentent les cartes de contours des charges hydrauliques dans les résidus et le mort-terrain pour la situation estivale, celle d'enneigement et pour celle du mois de septembre. Les valeurs d'isocontours doivent être majorées de 300 mètres pour représenter les élévations réelles.

Figure 12: Charges hydrauliques (m) dans les résidus miniers pour la période estivale

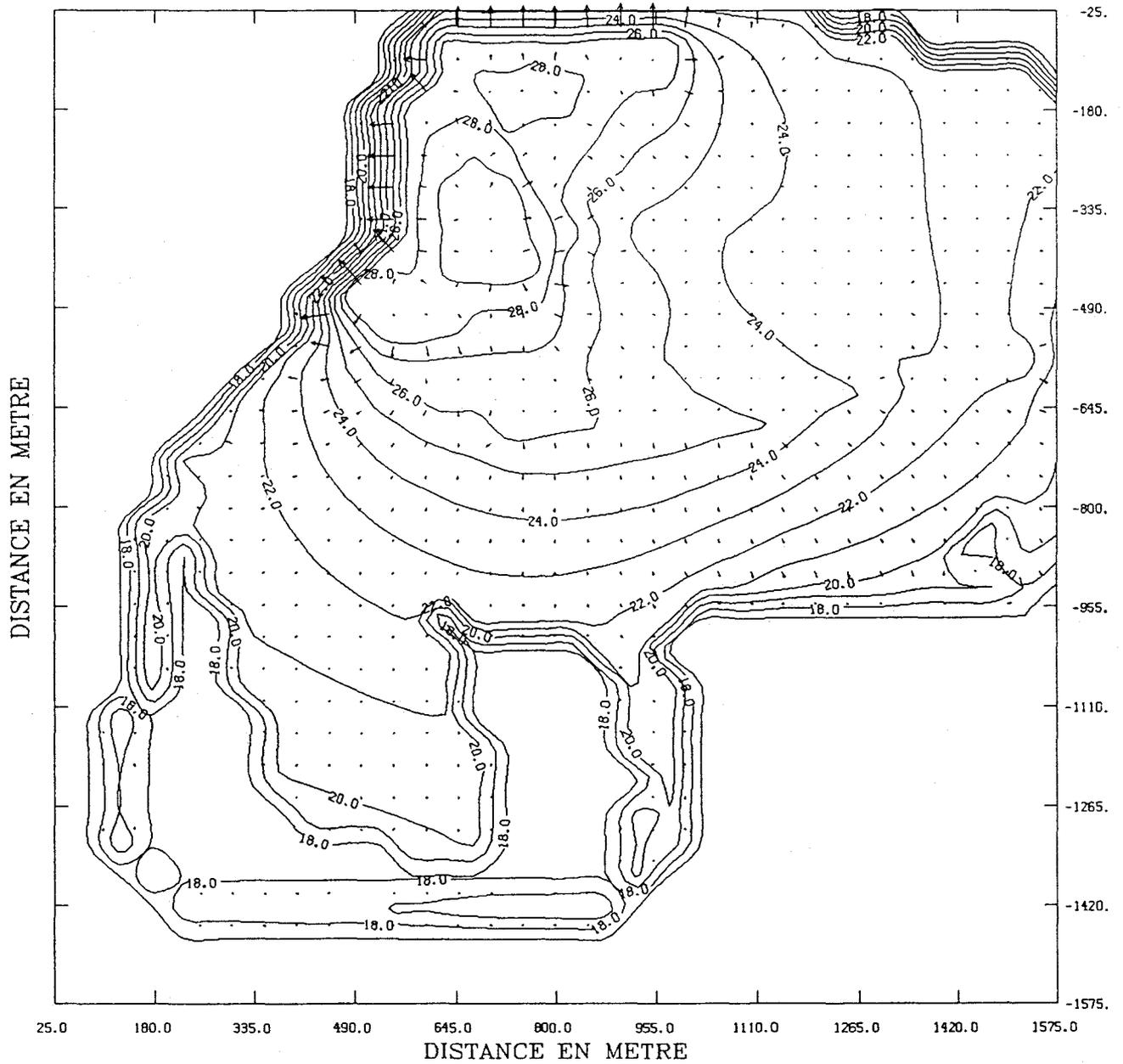


Figure 13: Charges hydrauliques (m) dans le mort-terrain pour la période estivale

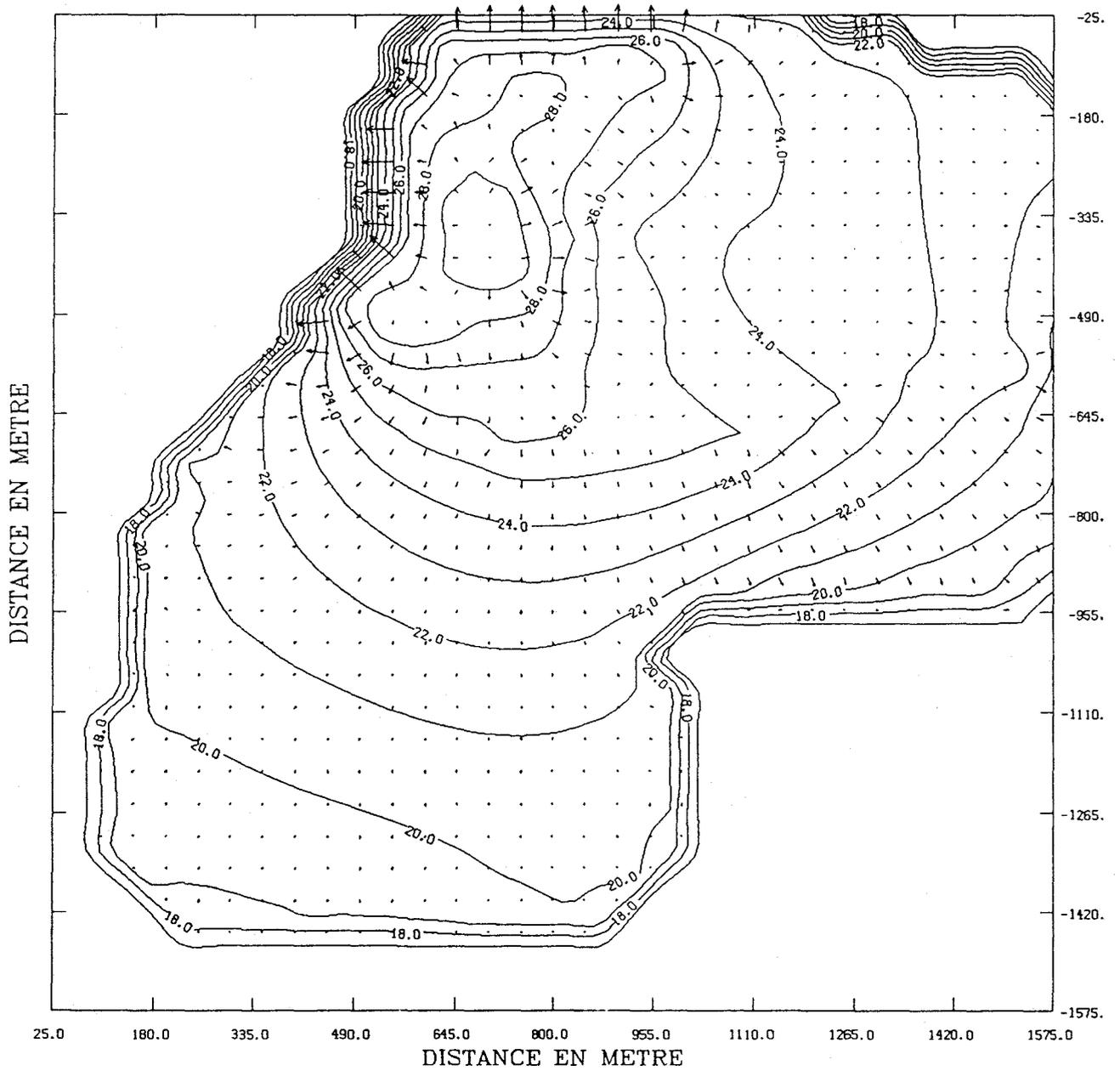


Figure 14: Charges hydrauliques (m) dans les résidus miniers, dans le cas d'une saturation du terril

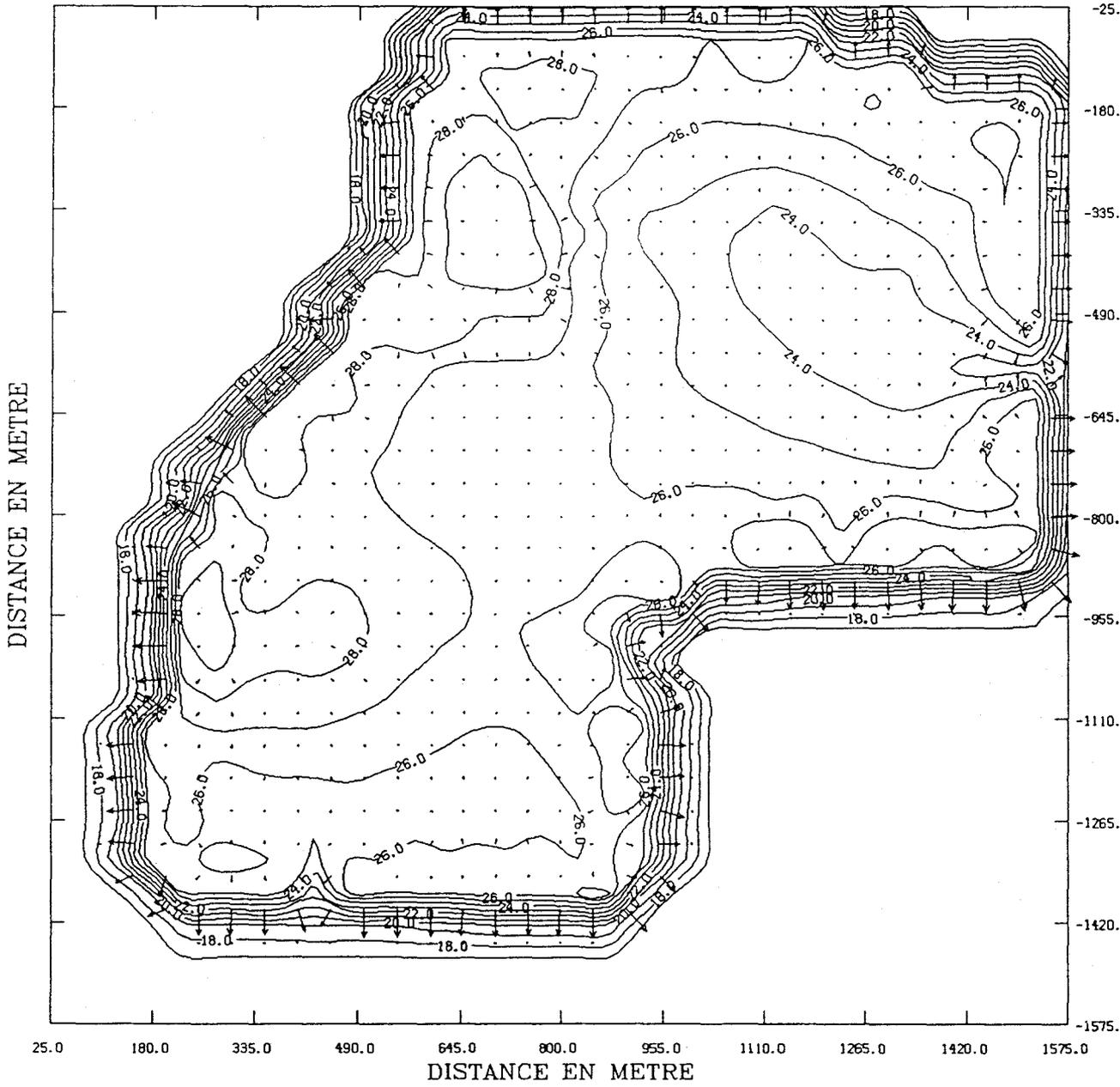


Figure 15: Charges hydrauliques (m) dans le mort-terrain, dans le cas d'une saturation du terril

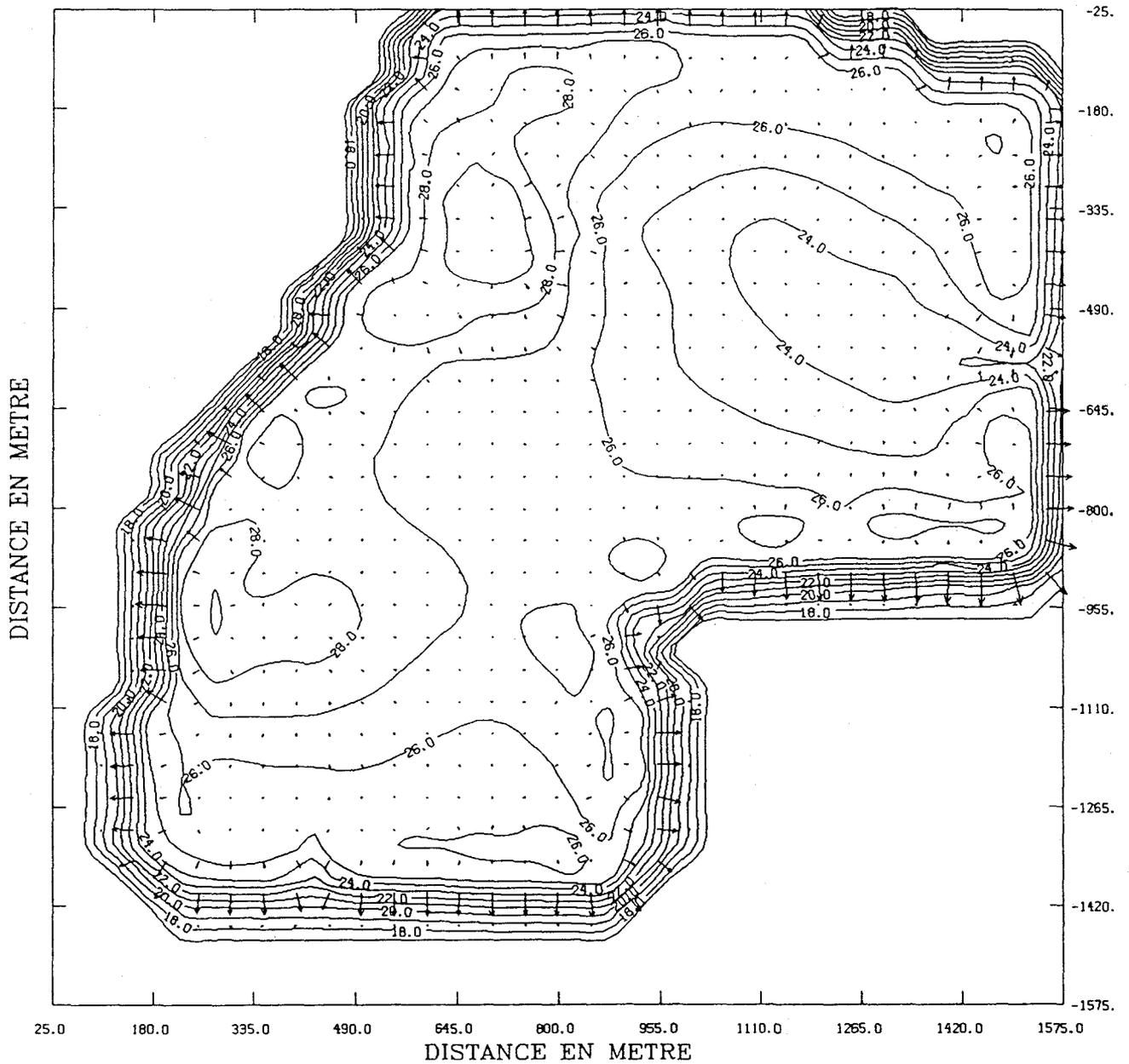


Figure 16: Charges hydrauliques (m) dans les résidus miniers calculées pour septembre 1991

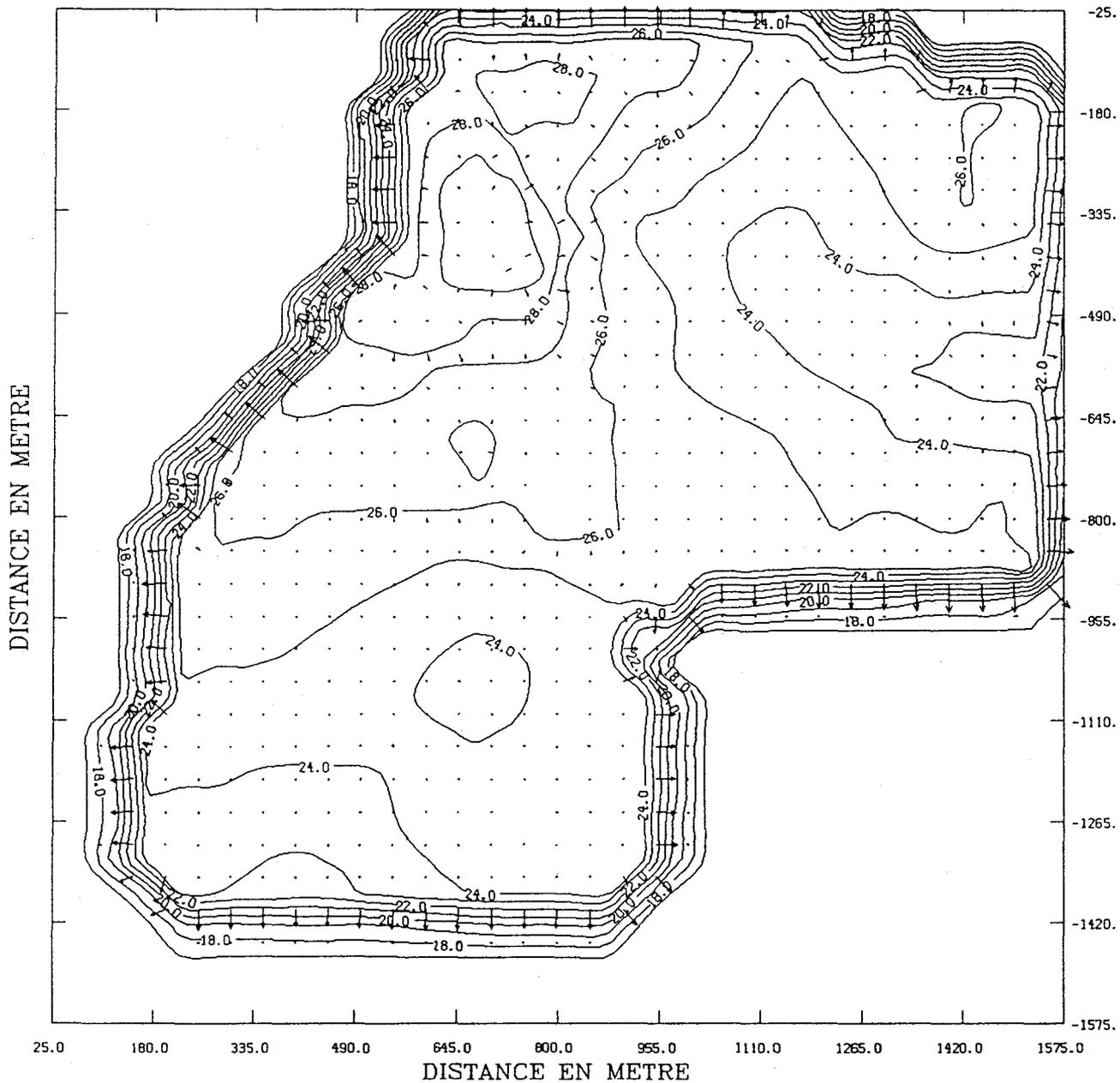
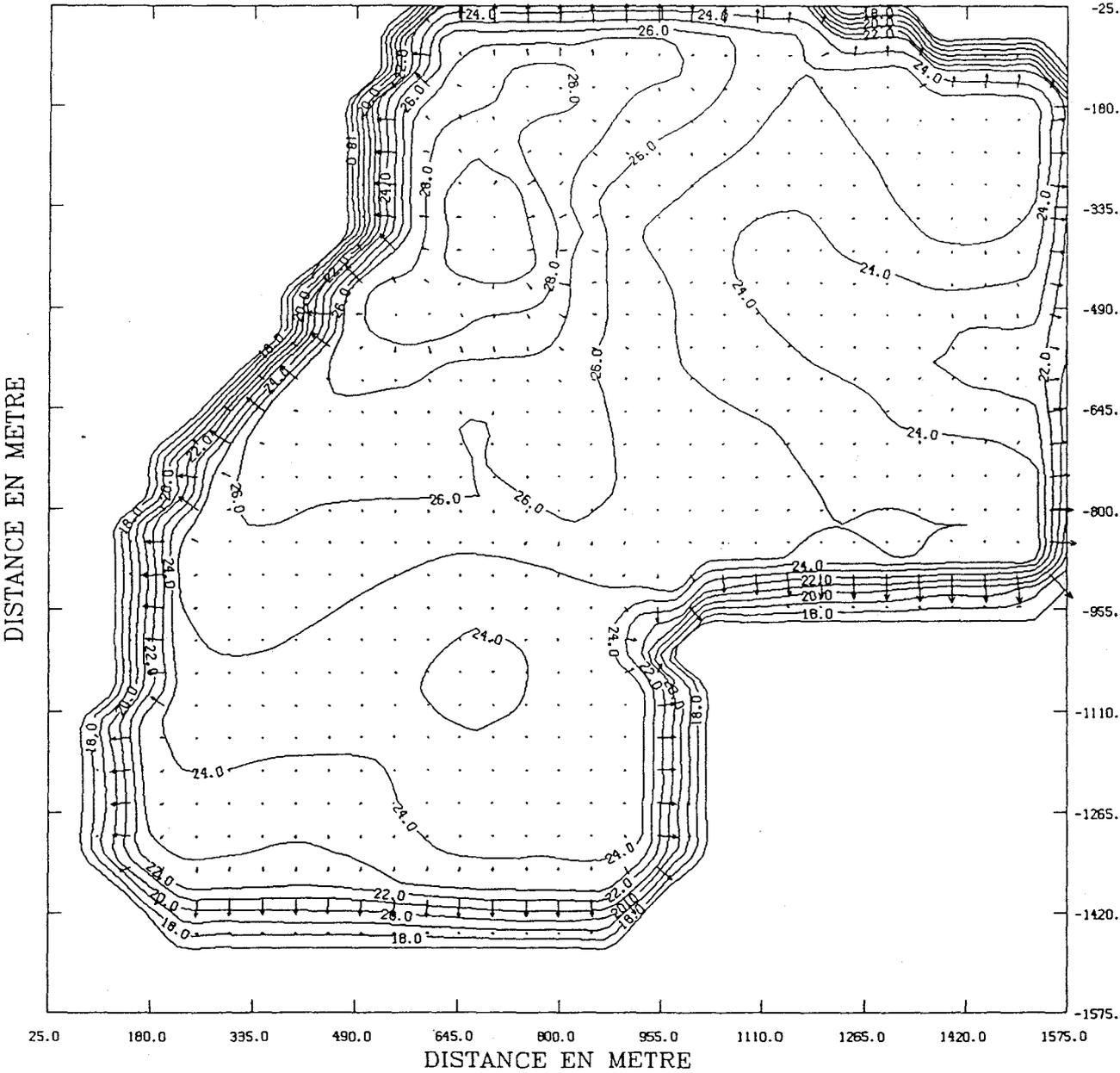
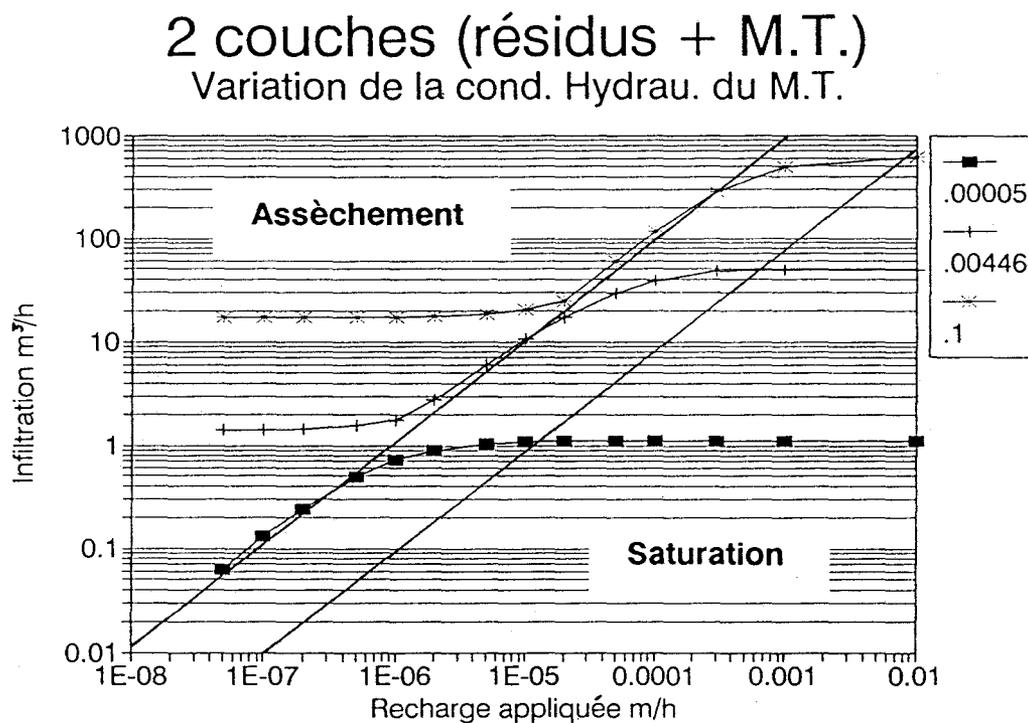


Figure 17: Charges hydrauliques (m) dans le mort-terrain calculées pour septembre 1991



2.2 - Simulations de l'infiltration obtenue pour différentes conditions de recharges appliquées. Trois valeurs de conductivité hydraulique du mort-terrain sont utilisées, et les recharges appliquées vont de 1×10^{-8} jusqu'à 1×10^{-2} m/h. Les résultats sont présentés à la Figure 18, et le Tableau (A3) des valeurs à l'annexe A.

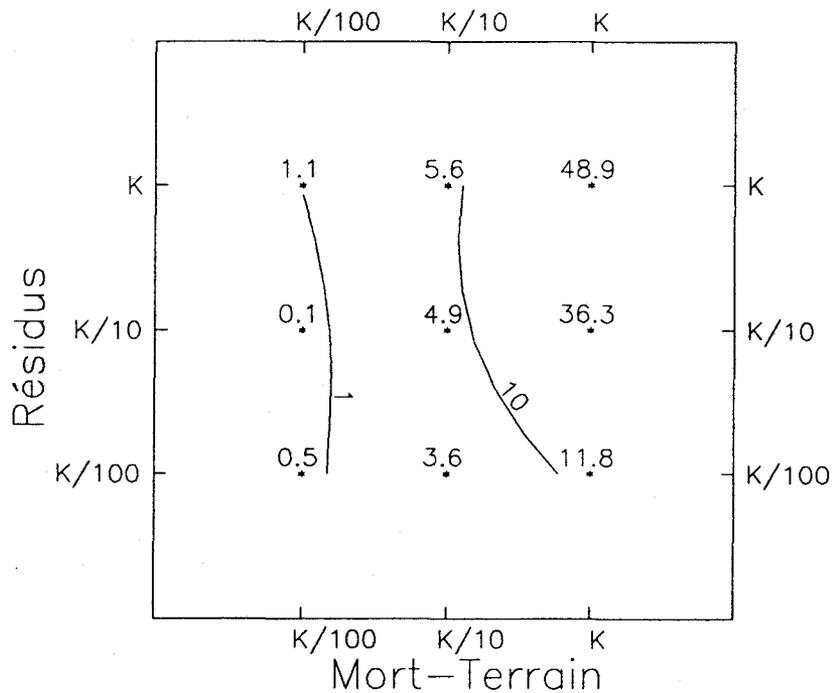
Figure 18:



On peut différencier trois zones. A l'extrême gauche, la recharge appliquée est insuffisante pour éviter l'assèchement, et seul l'essuyage des résidus forestiers maintient une nappe dans le terri. La partie située à droite présente une situation d'ennoiement permanente pour toutes ces conditions de recharge. La partie centrale présente une variation de l'infiltration, avec augmentation des hauteurs d'eau dans le terri, générée par l'augmentation de la précipitation efficace.

2.3 - Simulations évaluant l'influence relative des conductivités hydrauliques des résidus et du mort-terrain sur l'infiltration. La conductivité hydraulique (K) utilisée comme référence est de $0,446 \times 10^{-2}$ m/h. Les valeurs fournies dans le graphique sont celles d'infiltration en m^3/h .

Figure 19:



La précipitation efficace est la différence entre la précipitation (pluie et neige) moyenne annuelle ($0,932$ m/an) et l'évapotranspiration moyenne réelle ($0,503$ m/an). Une hauteur d'eau de $0,43$ m est donc disponible annuellement à l'infiltration et au ruissellement sur le massif de résidus miniers. Le débit d'eau correspondant à cette hauteur et susceptible de s'infiltrer est de $561\ 000$ m^3 /an. Cette valeur est surestimée, étant donné que l'on ne tient pas compte du balayage de la neige, vers l'extérieur du terri.

L'infiltration, comme il a été montré plus haut, varie de façon importante en fonction des valeurs de conductivité hydraulique du massif de résidus et du mort-terrain. Le volume d'eau infiltré lorsque le mort-terrain a la même conductivité hydraulique que les résidus, c'est-à-dire $.45 \times 10^{-2}$ m/h, est de 428 000 m³/an. Il est dix fois moindre lorsque les conductivités hydrauliques des deux matériaux sont dix fois plus petites. Le Tableau 3 présente les volumes d'eau infiltrés annuellement et le rapport de cette infiltration sur les précipitations efficaces, pour certaines situations présentées à la Figure 19.

Tableau 3:

Situation	Débit d'eau infiltrée	Hauteur d'eau infiltrée	Pourcentage d'eau infiltrée
Résidus → K Mort-terrain → K	428 000 m ³ /an	0.328 m/an	76.4 %
Résidus → K/10 Mort-terrain → K/10	43 000 m ³ /an	0.033 m/an	7.7 %
Résidus → K/10 Mort-terrain → K/100	4 900 m ³ /an	0.004 m/an	0.9 %

DISCUSSION - CONCLUSION

Les simulations effectuées reproduisent le plus fidèlement possible les conditions réelles prévalant sur le site. Cependant, la méconnaissance des conductivités hydrauliques des résidus non oxydés et du mort terrain affecte grandement l'obtention de résultats fiables. Par ailleurs, la précipitation efficace réellement disponible à l'infiltration n'est pas connue. Cette incertitude est principalement relative au devenir de la neige sur le massif, dont une partie doit être balayée par le vent. Le volume d'eau résultant de la fonte de la neige au printemps n'est donc pas quantifiable.

Pour cela, les abaques réalisés à partir des simulations effectuées avec le modèle MODFLOW permettront d'estimer la valeur de l'infiltration réelle au travers des résidus lorsque les paramètres impliqués seront mieux connus.

Il est vraisemblable de considérer que les résidus non oxydés présentent une conductivité hydraulique plus faible que celle mesurée pour les résidus oxydés. D'autre part, le mort terrain sous-jacent devrait lui aussi présenter une conductivité hydraulique faible. Dans une telle situation, les abaques nous indiquent que l'infiltration pourrait ne représenter alors que quelques pourcents de la précipitation efficace. La majeure partie des eaux précipitées serait alors évacuée du site par ruissellement par les brèches.

Du fait de la méconnaissance des paramètres conditionnant l'infiltration dans le massif de résidus, les écoulements souterrains ne peuvent être quantifiés. Il n'est donc pas possible ni réaliste d'effectuer une simulation du transport des solutés dans le massif. Si les conductivités hydrauliques des résidus non oxydés et du mort terrain sont plus faibles que celles mesurées, alors l'infiltration sera faible et lente. L'effet tampon du résidu non oxydé devrait alors jouer un rôle prépondérant sur l'atténuation de la contamination potentielle.

Une mesure de la conductivité hydraulique du mort-terrain, principalement constitué de till argileux, permettra d'évaluer le sens des écoulements des infiltrations provenant des résidus. Si la conductivité hydraulique du mort terrain est nettement plus faible que celle des résidus non oxydés, les écoulements seront principalement horizontaux et situés dans le massif de résidus. Si la conductivité hydraulique du mort terrain est du même ordre ou supérieure à celle des résidus non oxydés, les écoulements auront une composante verticale importante, et la contamination de la nappe sera possible.

En conclusion, il apparaît que l'infiltration des précipitations est fortement liée à la valeur des conductivités hydrauliques respectives des résidus miniers et du mort terrain. Dans le cas du scénario vraisemblable où ces conductivités hydrauliques sont plus faibles que celle évaluée pour le résidu oxydé, quatre types d'écoulement de l'eau de précipitation peuvent être différenciés. La part des précipitations ne pouvant s'infiltrer à cause de la saturation du milieu engendrera un ruissellement de surface qui sera évacué par les brèches.

Considérant que la zone oxydée des résidus miniers est la plus perméable, un écoulement hypodermique aura lieu dans cette couche. Cet écoulement peut ne pas être important en débit, mais il sera vraisemblablement celui le plus chargé en contaminant, du fait du séjour plus long des eaux dans les résidus oxydés. D'un point de vue technique, cet écoulement sera cependant facilement contrôlable par un drainage. Il est à noter qu'une grande partie de cet écoulement doit engendré du ruissellement principalement au niveau des brèches.

Si le résidu non oxydé est plus perméable que le mort terrain sous-jacent, les écoulements souterrains seront alors principalement horizontaux. Ils devraient par ailleurs débouchés en périphérie du massif, vers le sud et l'est. Leur contrôle pourrait être réalisé par un drainage de pourtour au niveau de la base des résidus.

Finalement, si le mort terrain est suffisamment perméable, les écoulements auront lieu au travers de celui-ci, et une contamination pourrait être engendrée. Dans un tel scénario, l'effet tampon des résidus non oxydés et du mort terrain (tourbe) jouerait un rôle important sur l'importance de la contamination potentielle des eaux souterraines et sur l'exportation de contaminants à l'extérieur du site. Le contrôle technique de cette contamination serait plus complexe ou importante.

Dans l'immédiat, il nous semble donc important de caractériser les propriétés hydrodynamiques des matériaux du site (résidus non oxydés, mort terrain). La connaissance de leurs conductivités hydrauliques respectives permettra une évaluation préliminaire de l'importance potentielle de l'infiltration de l'eau dans le massif. Cependant, il faudra ensuite différencier plus précisément l'importance de chacune des formes d'écoulement (surface, hypodermique, souterrain, profond) afin de définir les techniques de contrôle adéquates. Dans cette étape, une simulation plus précise intégrant les paramètres réels apporterait une aide précieuse par des réponses au niveau de la quantification des débits respectifs de ces écoulements.

ANNEXE A

Tableau A1: Infiltration fonction de la recharge appliquée pour une zone perméable sous les résidus de 10 et 50 cm

Recharge appliquée m/h	Infiltration (10 cm) m ³ /h	Infiltration (50 cm) m ³ /h
0	0	0
5E-08	0.065	0.068
1E-07	0.128	0.133
5E-07	0.388	0.557
1E-06	0.478	0.978
5E-06	0.526	2.07
1E-05	0.544	2.39
2E-05	0.554	2.56
5E-05	0.557	2.61
1E-04	0.557	2.61
2E-04	0.557	2.61
3E-04	0.557	2.61
5E-04	0.557	2.61
1E-03	0.557	2.61
1E-02	0.557	2.61

* Les lignes doubles indiquent la limite où le terrain est saturé jusqu'à la surface

Tableau A2: Infiltration fonction de la conductivité hydraulique du mort-terrain pour les conditions estivale et à saturation

Conductivité hydraulique m/h	Infiltration (estivale) m ³ /h	Infiltration (saturée) m ³ /h
1.00E-06	0.255	0.567
1.00E-05	0.287	0.670
5.00E-05	0.425	1.120
1.00E-04	0.596	1.670
5.00E-04	1.887	6.190
1.00E-03	3.460	11.770
4.46E-03	13.920	48.880
1.00E-02	29.340	103.800
2.00E-02	53.920	191.200
5.00E-02	111.450	392.600
1.00E-01	179.600	617.500
5.00E-01	433.100	1221.500
1.00E+00	579.500	1434.000
1.00E+01	-----	1803.200

Tableau A3: Infiltration fonction de la recharge appliquée pour trois valeurs de conductivité hydraulique du mort-terrain

Recharge appliquée m/h	Infiltration (M.T.=.00005) m ³ /h	Infiltration (M.T.=.00446) m ³ /h	Infiltration (M.T.=.1) m ³ /h
5E-08	0.063	1.400	16.990
1E-07	0.131	1.410	17.010
2E-07	0.240	1.440	17.030
5E-07	0.497	1.540	17.120
1E-06	0.731	1.750	17.260
2E-06	0.901	2.770	17.540
5E-06	1.030	6.030	18.440
1E-05	1.090	10.610	20.280
2E-05	1.110	17.290	24.820
5E-05	1.120	28.810	59.330
1E-04	1.120	38.560	116.300
3E-04	1.120	48.450	284.200
1E-03	1.120	48.860	495.100
1E-02	1.120	48.880	617.500

* Les doubles lignes indiquent la limite où la recharge appliquée devient suffisante pour maintenir les conditions voulues