

Université du Québec
INRS-Géoressources

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU RAYON D'INFLUENCE DES PUIITS DE CAPTAGE
DES BIOGAZ DANS LES SITES D'ENFOUISSEMENT SANITAIRES**

Par
Harold Vigneault

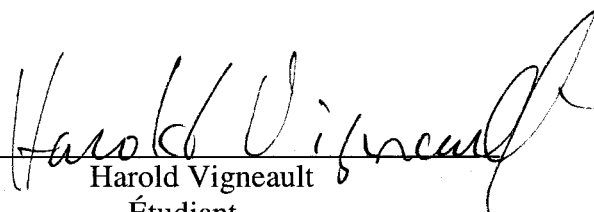
Mémoire présenté pour l'obtention
du grade de Maîtrise ès sciences (M.Sc.)

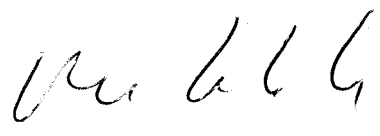
12 novembre 1999

RÉSUMÉ

De 80 à 90 % des déchets produits en Amérique du Nord sont acheminés à des sites d'enfouissement sanitaire. Ces sites génèrent de grandes quantités de lixiviat et des biogaz qui, s'ils ne sont pas contrôlés, peuvent affecter la santé humaine et l'environnement. Les biogaz, qui peuvent contenir jusqu'à 50% de méthane, deviennent explosifs à une certaine concentration dans l'air et ils participent à l'effet de serre. Aujourd'hui, la majorité des sites d'enfouissement ont un programme de récupération des biogaz, soit dans le but de les brûler ou de les valoriser. Cette récupération se fait à l'aide de puits installés à même les déchets. Le contrôle de la récupération comporte plusieurs inconnus, notamment le rayon d'influence des puits de captage qui est estimé dans la plupart des cas de façon empirique.

Cette étude a pour objectif de modéliser des systèmes de récupération pour déterminer le rayon d'influence d'un puits de captage. Le logiciel utilisé pour la modélisation est TOUGH2-LGM conçu spécialement pour représenter la production et l'écoulement des gaz dans les sites d'enfouissement. Le taux de production des biogaz et les propriétés des déchets du CESM (Complexe Environnemental de Saint-Michel) à Montréal ont été utilisés pour fournir des paramètres réalistes de modélisation. Différentes géométries sont modélisées pour le puits et le site et les résultats sont résumés sous forme d'abaques. Ces abaques peuvent servir à concevoir des réseaux de captage qui seront plus sûrs ou pour améliorer les réseaux déjà existants. Les résultats obtenus montrent, entre autres, que certaines géométries de puits sont plus efficaces que d'autres, que le rayon d'influence est proportionnel à la succion appliquée au puits et qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les différentes épaisseurs de sites modélisées et le rayon d'influence.


Harold Vigneault
Étudiant


René Lefebvre
Directeur de recherche

SUMMARY

From 80 to 90 % of the wastes produced in North America end up in sanitary landfills which are thus of primary importance for waste management. However, these sites generate large amounts of leachate and landfill gas that can be harmful to human health or the environment if they are not properly controlled. Landfill gas contains up to 50 % of methane. This gas contributes to global warming and can be explosive above a concentration threshold in air. Today, most sites maintain a landfill gas recovery systems. Gas recovery is achieved using wells installed within the wastes that act either as passive vents or are connected to gas compressors applying suctions to well heads. The control of landfill gas recovery systems involves many unknowns, notably the radius of influence of the recovery wells, which is determined empirically.

The objective of our study is to numerically model landfill gas recovery systems in order to determine the radius of influence of recovery wells. For the modeling, we used the numerical simulator TOUGH2-LGM which was developed to represent landfill gas production and migration in landfills. In order to have realistic modeling parameters, we used the landfill gas production rate and waste properties of the well characterized sanitary landfill of the City of Montreal (the *Complexe Environnemental de Saint-Michel, CESM*). Various well configuration and site geometry are modeled and results are summarized as graphs. These graphs can be used to design efficient new recovery systems or improve existing ones. The results obtained show that, among other things, some well configurations are more efficient, the radius of influence is proportional to the well head suction pressure, and there is no linear relationship between site thickness and the radius of influence of recovery wells.

REMERCIEMENT

En premier lieu, je tiens à remercier René Lefebvre, mon directeur, qui a été un guide et une source de formation intarissable. Miroslave Nastev, qui par sa grande patience et son talent à communiquer son savoir m'a aidé à mieux comprendre les labyrinthes du logiciel TOUGH2-LGM. Je tiens aussi à louer Pierre Therrien dont les interventions m'ont facilité l'utilisation de l'ordinateur Sun Ultra 1 de la salle de modélisation. Il y a aussi tous les pairs (étudiant(e)s) de l'INRS-Géoressources qui, de près ou de loin, m'ont permis de passer au travers des travaux de toutes sortes. Enfin, je tiens tout particulièrement à remercier ma femme Aurélie Delaurière, sans qui je n'aurais pu porter ce projet à terme.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	v
SUMMARY	vi
REMERCIEMENT	vii
TABLE DES MATIERES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
1. INTRODUCTION	1
1.1 PROBLÉMATIQUE DES SITES D'ENFOUISSEMENT	1
1.2 PROBLÉMATIQUE RELIÉE AUX BIOGAZ.....	2
1.3 PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE	5
1.4 OBJECTIFS	5
1.5 MÉTHODOLOGIE.....	6
2. REVUE DE LITTÉRATURE	8
2.1 LES SITES D'ENFOUISSEMENT.....	9
2.1.1 <i>Description d'un site d'enfouissement sanitaire</i>	9
2.1.2 <i>Nature des déchets enfouis</i>	11
2.1.3 <i>Impacts environnementaux</i>	13
2.2 BIOGAZ.....	14
2.2.1 <i>Caractéristiques des gaz composant les biogaz</i>	15
2.2.2 <i>Production des biogaz</i>	16
2.2.3 <i>Taux de production des biogaz</i>	20
2.2.4 <i>Problématique des biogaz</i>	24
2.2.5 <i>Les biogaz en tant que source d'énergie à valoriser</i>	26
2.2.6 <i>Système pour brûler les biogaz</i>	26

2.3	PHYSIQUE DE L'ÉCOULEMENT MULTIPHASE.....	27
2.3.1	<i>Le milieu des déchets en tant que milieu poreux.....</i>	27
2.3.2	<i>Tension de surface et pression capillaire.....</i>	28
2.3.3	<i>Perméabilité effective et relative.....</i>	33
2.3.4	<i>Mouvement des fluides.....</i>	35
2.4	MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES BIOGAZ.....	35
2.5	TOUGH2-LGM.....	39
2.5.1	<i>Structure du logiciel.....</i>	39
2.5.2	<i>Détail sur la loi des gaz.....</i>	40
2.5.3	<i>Le mouvement des fluides dans TOUGH2-LGM.....</i>	41
2.5.4	<i>Transfert de chaleur.....</i>	44
2.6	MÉTHODE NUMÉRIQUE.....	46
2.6.1	<i>Discrétisation par la méthode des différences finies intégrales.....</i>	47
2.6.2	<i>Variable thermodynamique.....</i>	48
2.6.3	<i>Méthode de résolution numérique Newton-Raphson.....</i>	49
2.6.4	<i>Source de production et d'injection.....</i>	50
2.6.5	<i>Conditions aux limites.....</i>	50
2.7	CAPTAGE DES BIOGAZ.....	51
2.7.1	<i>Expérience de Lofy.....</i>	52
2.7.2	<i>Test de l'EPA.....</i>	55
2.7.3	<i>Conception d'un puits et d'un réseau.....</i>	57
3.	MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU RAYON D'INFLUENCE D'UN PUITTS	
	DE CAPTAGE DES BIOGAZ DANS UN SITE D'ENFOUISSEMENT.....	60
3.1	INTRODUCTION.....	60
3.2	DÉCHETS ET PUITTS.....	61
3.2.1	<i>Composition des déchets.....</i>	61
3.2.2	<i>Les biogaz.....</i>	62
3.2.3	<i>Taux de production des biogaz.....</i>	63
3.2.4	<i>Déchets en milieu saturé.....</i>	64

3.2.5	<i>Déchets en milieu non saturé</i>	65
3.2.6	<i>Les puits de captage</i>	65
3.2.7	<i>Mesure du rayon d'influence</i>	66
3.3	TOUGH2-LGM ET LE MODÈLE NUMÉRIQUE.....	69
3.3.1	<i>Équation d'écoulement</i>	69
3.3.2	<i>Condition de production</i>	71
3.3.3	<i>Numérisation des équations d'écoulement</i>	72
3.3.4	<i>Modèle numérique</i>	72
3.4	RÉSULTATS.....	75
3.4.1	<i>Détermination de la configuration du puits la plus efficace</i>	76
3.4.2	<i>Méthodologie utilisée pour l'évaluations du rayon d'influence</i>	78
3.4.3	<i>Détermination du rayon d'influence en fonction du taux de production</i>	80
3.4.4	<i>Détermination de la qualité des biogaz pompés</i>	83
3.5	EXEMPLE D'APPLICATION À LA CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE CAPTAGE	87
3.6	DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS	91
4.	CONCLUSION	94
5.	BIBLIOGRAPHIE	97
ANNEXE A	104
ANNEXE B	112
ANNEXE C	129

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Répartition des matières composant les déchets au Québec (MEF, 1992).....	12
Tableau 2.2 : Composition chimique des différentes composantes des déchets en fraction de masse humide (Nastev, 1998).....	13
Tableau 2.3 : Composition typique des gaz d'un site d'enfouissement (tiré de Ham et Barlaz, 1989; Robinson, 1986).....	15
Tableau 2.4 : Variables thermodynamiques primaires (d'après Nastev, 1998).....	48
Tableau 2.5 : Variables thermodynamiques secondaires (d'après Nastev, 1998).....	49
Tableau 2.6 : Exemple de tests pour évaluer le rayon d'influence (Lofy 1983).....	53
Tableau 3.1 : Matières composant les déchets au Québec (MEF, 1998).....	62
Tableau 3.2 : Propriétés hydrogéologique des déchets en milieu saturé.....	64
Tableau 3.3 : Paramètres hydrogéologique des déchets au CESM (tiré de Nastev 1998).....	65
Tableau 3.4 : Caractéristiques des modèles utilisés.....	73
Tableau 3.5 : Déroulement de l'étude de modélisation.....	76
Tableau 3.6 : Variables du site fictif retenue pour l'exemple d'application.....	87
Tableau 3.7 : Description des différentes étapes pour la conception d'un réseau de captage selon les spécifications du site exploité.....	88

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 :Variation de la composition des gaz dans un site d'enfouissement (Farquhar et Rovers, 1973; modifié par Rees, 1980).....	16
Figure 2.2 : Diagramme des étapes de la décomposition anaérobique (adapté de Nastev, 1998)	18
Figure 2.3 : Potentiels de production initiaux et cumulatifs (adapté de Nastev, 1998).....	22
Figure 2.4 : A) Milieu saturé avec une phase aqueuse - B) Milieu non saturé contenant deux phases aqueuses	27
Figure 2.5: Mouillabilité et angle de contact entre les fluides et les solides	29
Figure 2.6 : Tube capillaire	30
Figure 2.7 : Courbe de pression capillaire en fonction de la saturation	32
Figure 2.8 : Courbes de perméabilité relative vs la saturation des phases	34
Figure 2.9 : Discrétisation du domaine dans l'espace et paramètres géométriques pour la méthode des différences finies intégrales (d'après Pruess, 1991)	47
Figure 2.10 : Vue en plan de la configuration des puits de captage et des puits de mesure pour l'expérience de Lofy (Lofy, 1983)	53
Figure 2.11 : Configuration des puits d'observation autour du puits de captage	56
Figure 2.12 : Trois types de puits de captage répandus (Leach, 1996)	57
Figure 2.13 : Concepts de puits verticaux et horizontaux	58
Figure 3.1 : Taux de production des biogaz dans les déchets pour le CESM (d'après Nastev, 1998).....	71
Figure 3.2 : Modèle conceptuel utilisé	74
Figure 3.3 : Configuration des trois puits testés	74
Figure 3.4 : Comparaison entre les configurations de puits A, B et C étudiés à 5 ans pour une succion de 3 kPa.....	77

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 PROBLÉMATIQUE DES SITES D'ENFOUISSEMENT

Depuis toujours, l'être humain produit des déchets. Ces derniers ont commencé à poser problème lorsque l'homme, sédentarisé, a vu les populations des agglomérations augmenter, entraînant un accroissement des ordures. À l'époque de la Rome antique, il existait déjà des règles sur le nettoyage des rues et le ramassage des ordures, pratiques qui furent reprises au XIII^e siècle à Londres. Les problèmes liés au feu dans les décharges publiques sont déjà notés en Israël entre 900 et 400 ans avant J. C. (El-Fadel, 1991). Vers la fin du XIX^e siècle, 43% des villes les plus importantes aux États-Unis possédaient un système de collecte primaire. Ce taux atteindra 100% vers la fin des années 1930 (Blumberg et Gotlieb, 1989). Cependant, il faut attendre la fin des années 1950 et surtout les années 1970 pour que des études sérieuses soient entreprises sur les sites d'enfouissement afin de comprendre leur comportement. Auparavant, les lieux d'enfouissement étaient, somme toute, considérés comme des dépotoirs.

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, le boum économique et la surconsommation des pays industrialisés ont eu pour effet d'augmenter la production de déchets de tout genre (domestique, industriel, matières dangereuses, etc.). L'urgence de s'en débarrasser a entraîné la création de sites d'enfouissement de plus en plus grands, pour lesquels il n'y avait aucune règle de gestion due au manque de connaissances scientifiques sur les processus de génération et de migration des divers polluants. Cette

situation a engendré des problèmes de pollution trop importants pour ne pas y remédier. De plus, avec la prise de conscience écologiste, la nécessité d'intervenir est devenue une obligation économique mais aussi morale.

Depuis le début des années 1960 et surtout durant les années 1970, les différentes études effectuées sur la décomposition des déchets et les diverses interactions se produisant dans les sites d'enfouissement ont permis de comprendre le comportement des matières résiduelles. Cette étape décisive a permis de passer de l'ère du dépotoir à celle de la gestion contrôlée des déchets dès le début des années 1980.

Ainsi, il a été établi que les diverses sources potentielles de pollution qui sont reliées au site d'enfouissement peuvent engendrer de multiples effets néfastes pour l'environnement :

- Génération de lixiviat : les lixiviats résultent du lessivage des déchets produits par l'eau de pluie ou la nappe souterraine qui y percole. Ils peuvent polluer les eaux souterraines et les eaux de surface.
- Production de biogaz : les biogaz sont, avec les lixiviats, les principales sources de pollution. Lors de la décomposition de la matière organique, des gaz sont générés en plus ou moins grande quantité.
- Nuisances par les odeurs, le bruit, les animaux : durant l'exploitation du site, ou pour un site mal conçu, les bruits, la détérioration visuelle et les animaux (ex. : les rongeurs, les goéland) peuvent être des nuisances majeures pour les personnes habitant en sa périphérie.

1.2 PROBLÉMATIQUE RELIÉE AUX BIOGAZ

Nos travaux portent spécifiquement sur les biogaz et leur captage car ils entraînent une pollution importante qui peut être contrôlée. La première phase de

dégradation des déchets que l'on nomme *aérobie*, en raison de la présence d'oxygène, produit du dioxyde de carbone (CO_2) et de la chaleur. Par la suite, l'oxygène étant complètement consommé, commence alors les phases de décomposition *anaérobie*. L'oxygène devient alors un polluant pour les bactéries qui agissent durant cette phase. Après plusieurs stades, s'installe la phase *méthanogène* stable où l'on voit la production de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) se stabiliser. La fraction molaire de chacune des composantes présentes dans les biogaz varie pour le CH_4 de 50~70%, alors que le CO_2 varie de 30~50% (Nastev, 1998). Il y a aussi une grande quantité de constituants présents dans les biogaz qui correspondent à environ 1% de la fraction molaire.

Les biogaz entraînent une série de problèmes (Senior et Balba, 1987) dont :

- Effet de serre : l'émission du méthane et dioxyde de carbone dans l'atmosphère contribue à augmenter l'effet de serre;
- Risque d'explosion : lorsque le méthane se retrouve à une concentration de 5~15% dans l'air, le mélange devient explosif. S'il y a migration de méthane hors d'un site d'enfouissement, des concentrations critiques peuvent être atteintes;
- Odeurs : elles sont provoquées par le H_2S faisant partie des constituants mineurs;
- Acidification de l'eau : elle est causée par le CO_2 . Ce composé étant plus lourd que l'air, il se retrouve en grande quantité au fond des sites d'enfouissement où il se solubilise dans l'eau provoquant son acidification;
- Dangers pour la santé humaine : outre les odeurs, certains composés des constituants mineurs peuvent être très dommageables pour la santé humaine puisqu'ils contiennent du benzène qui est cancérigène;

- Détérioration de la végétation : le méthane et certains constituants mineurs peuvent asphyxier la végétation lorsqu'il y a migration des biogaz dans les sols adjacents au site.

Il est donc primordial de gérer adéquatement les biogaz pour la sécurité et la santé des travailleurs ainsi que de la qualité de vie des populations habitant en périphérie des sites d'enfouissement. Un autre aspect important est que les biogaz peuvent être valorisés pour leur valeur énergétique, et ce grâce à la présence du méthane. Cependant, pour qu'un projet soit réalisable, il faut que les biogaz soient produits en quantité suffisante et qu'ils aient une bonne qualité (% de méthane élevé).

Si les premières études sur les sites d'enfouissement remontent aux années 1950 et 1960, les études sur les biogaz n'ont débuté que vers la fin des années 1960 (Farquhar et Rovers, 1973). La décennie suivante fut consacrée à l'analyse des processus de production des biogaz et à leur composition. La fin des années 1970 a vu naître les premières études de modélisation numérique sur la migration des biogaz. Depuis le début des années 1980, les connaissances acquises sur la production et la migration des biogaz ont permis de créer des sites plus sûrs et d'y implanter des réseaux de captage afin de brûler les biogaz ou de les transformer en énergie. La décennie 1990 est charnière car l'augmentation de la puissance des ordinateurs et le développement de nouveaux logiciels ont permis d'améliorer les outils pour l'étude du comportement des biogaz. En effet, les premiers modèles numériques étaient assez simples (modèles 1D) mais avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs et le perfectionnement des logiciels, de nouveaux modèles beaucoup plus représentatifs de la réalité ont été développés (par exemple, TOUGH2-LGM de Nastev 1998). Ainsi, l'étude de la production et du transport des biogaz est possible à la fois dans les déchets et les sols qui y sont adjacents. De plus, la modélisation d'un puits de captage est réalisable avec ces outils informatiques.

1.3 PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE

Les avancées technologiques en informatique des dernières années ont créé de nouveaux outils pour la science en général. Toutefois, on remarque que les études de terrain ou de modélisation numérique sur le rayon d'influence des puits de captage sont rares. Or, il est toutefois important de le connaître afin de concevoir un réseau de captage efficace.

En effet, il est difficile de connaître la quantité des biogaz qui est générée dans les sites d'enfouissement lors de la décomposition des déchets et, par conséquent, d'établir la quantité qu'il faut pomper. Ainsi, un pompage trop faible des biogaz peut entraîner l'émission d'une grande quantité de gaz dans l'atmosphère ou leur migration dans les sols adjacents au site. Par contre, un surpompage peut se traduire par une intrusion d'air dans le site. Ceci a pour effet d'entraîner de l'oxygène dans les déchets, ce qui est fatal aux bactéries qui produisent les biogaz. Ce phénomène entraîne une diminution de la production des biogaz et de leur qualité.

De plus, il est difficile de prévoir le rayon d'influence d'un puits de captage car notre connaissance des propriétés hydrogéologiques des déchets est à ce jour limitée. Enfin, il n'y a pas actuellement d'approche scientifique sur la conception des réseaux de captage et, par le fait même, des puits qui y sont associés. Il conviendrait de remédier à cette situation pour augmenter notre connaissance.

1.4 OBJECTIFS

Face à la complexité que représente la gestion d'un site d'enfouissement, cette étude a pour but, d'une part, de modéliser le rayon d'influence d'un puits de captage de biogaz pour différentes configurations de puits et de site, et d'autre part, de mettre sous forme d'abaques les résultats obtenus. Ces abaques pourraient être utilisés pour la conception de futurs réseaux de captage ou l'amélioration d'un réseau déjà existant. En effet, ayant une idée des dimensions du site et du type de déchets (pour les propriétés

hydrogéologiques et le taux de production), il serait possible de concevoir un réseau de captage adapté à la spécificité de la situation afin d'exploiter au mieux les biogaz. Ces abaques permettraient une généralisation pour la majorité des cas de puits et de site d'enfouissement, sans nécessiter le recours à la modélisation dans chaque cas. La modélisation pourrait par contre être requise pour tenir compte de conditions spécifiques.

1.5 MÉTHODOLOGIE

Afin d'étudier le rayon d'influence des puits de captage, le logiciel TOUGH2-LGM développé pour simuler la production et la migration des gaz dans un milieu non saturé a été utilisé.

Dans un premier temps, l'apprentissage du logiciel TOUGH2-LGM et des notions hydrogéologiques qui y sont rattachées, sont primordiales. Par la suite, une série de modèles conceptuels ont été mis au point afin de tester les différents paramètres géométriques et physiques qui contrôlent le rayon d'influence d'un puits de captage :

- Les premiers modèles ont servi à tester le comportement de trois puits de captage dont la position et la hauteur de crépine étaient différentes. Ces simulations nous ont permis de choisir le type de puits le plus performant selon le pourcentage de méthane récupéré en fonction du volume total produit par ces modèles pour un rayon identique et constant.
- Ensuite, différents rayons de modèle ont été simulés afin de connaître le pourcentage de biogaz recueilli par le puits de captage en fonction du total produit par ce modèle. Les rayons correspondant à 90 % de la production captée par le puits sont pris comme rayon d'influence.
- Enfin, deux séries de graphiques ont été dessinées. La première série porte sur le rayon d'influence en fonction de la production pour différentes succions et épaisseurs de site, alors que la deuxième définit

la qualité des biogaz à partir de la fraction molaire de méthane au puits ainsi que son flux et le flux total des gaz.

Une station Unix (SUN Ultra 1) a été utilisée pour effectuer les modélisations retenues. La visualisation des modélisations en 2D a été faite avec le logiciel Tecplot (référence aux manuels de AMTEC Engineering). Ceci implique une modification des tableaux de sortie de TOUGH2-LGM afin que la conversion de ce dernier puisse être faite par le logiciel EXT développé par le Lawrence Berkeley National Laboratory. Ce logiciel transforme les tableaux de sortie de TOUGH2-LGM en format lisible pour Tecplot.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Les sites d'enfouissement sont une nécessité pour la société car ils représentent l'un des moyens les plus sûrs et économiques de disposer des déchets engendrés par l'activité humaine. Ils sont la conséquence de la sédentarisation de l'homme, de l'augmentation de la population urbaine et, pour ces dernières décennies, de l'accroissement de la consommation, surtout dans les pays industrialisés. À preuve, chaque américain jette par année l'équivalent en poids de la Statue de la liberté si l'on compte l'ensemble des déchets — domestiques, commerciaux et industriels — produits aux États, soit 225 tonnes métriques. Au Québec, c'est une tonne par année par personne qui est produite. Ceci démontre la quantité énorme de déchets qui peut être générée par l'activité humaine moderne. Bien que la récupération soit de plus en plus systématisée dans bon nombre de pays, la masse des déchets non recyclés reste importante et rend incontournable l'utilisation de sites d'enfouissement. En effet, au Québec, 90 % des matières résiduelles sont dirigées vers les sites d'enfouissement (MEF, 1998). Il reste donc beaucoup d'efforts à fournir afin de limiter le recours à l'enfouissement des déchets qui demeure aujourd'hui le moyen le plus efficace et le plus sûr pour les éliminer malgré les problèmes environnementaux qui y sont associés (génération de lixiviats et des biogaz).

2.1 LES SITES D'ENFOUISSEMENT

L'évolution de la science de l'enfouissement a été très notable durant les années 1970 et 1980 : du simple dépotoir, nous sommes passés à la notion de site d'enfouissement, un lieu qui est beaucoup plus sûr pour les humains et l'environnement. Il existe plusieurs types de sites en fonction des différents types de déchets qui y sont enfouis. Ainsi, certains sont utilisés pour enfouir des matériaux de construction dits matériaux secs, d'autres conçus pour les matières dangereuses (sols contaminés, matières radioactives, etc.), tandis que les sites d'enfouissement sanitaire regroupent les déchets domestiques, commerciaux et industriels. La section suivante y est consacrée.

2.1.1 Description d'un site d'enfouissement sanitaire

Un site d'enfouissement correspond à un espace physique où l'on enterre des déchets de toutes sortes, mais un site d'enfouissement sanitaire est un lieu où les différentes sources de pollution sont contrôlées le plus étroitement possible au cours des différentes étapes de la vie du site (Nastev, 1998). Il y a trois étapes principales :

- 1) la préparation du terrain;
- 2) l'enfouissement et le recouvrement quotidien des déchets;
- 3) la fermeture du site.

Chaque pays possède ses propres réglementations sur ces trois étapes. En la matière, il n'existe pas à ce jour de normes internationales. Ici, au Québec, le règlement qui s'applique est la « loi sur la qualité de l'environnement (C.Q-2, R.14); Règlement sur les déchets solides », du Ministère de l'environnement du Québec, publiée en 1981. En ce qui concerne l'enfouissement des déchets, la réglementation date de 1978 (MEF, 1998). Une loi de 1993 soumet les projets d'enfouissement à des procédures d'évaluation environnementale, ce qui permet au gouvernement d'exiger des exploitants qu'ils se conforment à des normes plus sévères que celles prévues par la réglementation. Cependant, un moratoire a été émis sur la construction des sites en 1995, ce qui suspend temporairement toute construction, et ce tant que la nouvelle réglementation ne sera pas

en vigueur. Enfin, un plan d'action sur la gestion des matières résiduelles pour les années 1998 à 2008 a été déposé par le gouvernement du Québec et il remplace la politique gouvernementale de gestion intégrée des déchets solides de 1989. Ce plan contient les principales actions que le gouvernement entend prendre sur la récupération et l'enfouissement des matières résiduelles.

En résumé, ce plan d'action stipule que la construction des sites est soumise à un certain nombre d'exigences. Ainsi, le choix de l'emplacement est d'une grande importance car les populations qui demeurent près d'un site ne doivent pas être gênées par son exploitation. De plus, des mesures de sécurité doivent être prises en ce qui concerne les cours d'eau, l'eau souterraine et la qualité de l'air.

Dorénavant, comme l'exige le nouveau projet de loi, les sites doivent être imperméabilisés afin de prévenir toute infiltration de lixiviats ou migration des biogaz dans les sols. À partir d'une certaine taille de site, les biogaz doivent être récupérés pour être ensuite brûlés ou valorisés. Le règlement prévoit aussi la hauteur maximale d'un site. Ainsi, la hauteur au-dessus du sol naturel ne doit pas dépasser 4 m. Toutefois, dans certains cas, il est permis d'aller jusqu'à 6 m.

La loi définit les déchets comme tout matériel inutilisable, solide à 20 °C, dont l'origine est soit domestique, industrielle, commerciale ou agricole. Dès qu'un site d'enfouissement dessert une population de 50 000 habitants et plus, les responsables de sa gestion doivent effectuer des opérations de compactage afin de réduire le volume des déchets et, par le fait même, les coûts d'enfouissement. Dès que le compactage des déchets atteint deux mètres d'épaisseur, ils doivent être recouverts avec un sol, afin qu'ils ne soient pas emportés par le vent et afin d'éloigner les animaux nuisibles.

La fermeture finale est d'une grande importance car un site d'enfouissement a une vie active qui dépasse de beaucoup le temps d'exploitation. Après la fermeture, des biogaz et du lixiviat seront encore produits, et ce pour plusieurs années. De plus, les déchets sont soumis au tassement sur de longues périodes, il faut donc une couverture de qualité qui pourra résister au temps. Celle-ci doit, entre autres, diminuer l'infiltration en

eau, sans toutefois la stopper afin de réduire la production de lixiviat et ainsi les coûts de traitement, tout en maintenant une dégradation de la masse biodégradable. L'épaisseur de la couverture ne doit pas être inférieure à 0,6 mètre. Au cas où l'épaisseur des déchets serait de 6 m au-dessus du sol naturel, l'épaisseur de la couverture pourra atteindre 1,2 mètre. Les marges de manœuvre pour décider de l'épaisseur d'une couverture sont délicates car, si elle est trop épaisse, donc plus lourde, elle peut entraîner une augmentation du tassement. Enfin, il y a souvent du gazon qui est planté sur les couvertures mais aussi des arbres et autres végétaux pour l'esthétisme. Il faut donc que la couverture ne soit pas trop mince pour qu'elle ne soit pas défoncée par les racines des végétaux.

2.1.2 Nature des déchets enfouis

Les déchets domestiques qui sont jetés par les foyers au Québec représentent 35 % de la masse totale des matières résiduelles produites, les autres 65 % proviennent des secteurs industriel, commercial et institutionnel (gouvernement, etc.)

Le tableau 2.1 de la page suivante montre la composition hétérogène des déchets au Québec. De plus, il illustre que les matières responsables de la production des biogaz — matière organique, papier, carton et bois —, sont issues surtout des déchets domestiques. D'autres sources mentionnent les quantités suivantes pour les déchets domestiques : déchets de table (8 à 12 % du poids humide), de jardin (± 18 %), produit du papier (35 % à 40 %), plastique, caoutchouc et textile (5 % à 10 %), bois (2 % à 6 %), métal (8 % à 10 %), verre et céramique (8 % à 10 %), cendre, débris de construction et autres (2 %-6 %) (EMCON, 1982; Oweis et Khera, 1990; et McBean, 1993). Il y a une bonne concordance entre cette série de données et celle présentée dans le tableau 2.1. Notons, cependant, que ces pourcentages peuvent varier d'un site à l'autre au Québec comme dans les autres pays industrialisés et d'une année à l'autre. Cette différence se retrouve aussi lorsque l'on fait la comparaison avec la composition des déchets dans les pays en voie de développement (El-Fadel, 1991).

Le tableau 2.1 résume la composition et l'origine des déchets au Québec :

Tableau 2.1 : Répartition des matières composant les déchets au Québec (MEF, 1992)

Matière	Domestique (%)	Industriel Commercial et Institutionnel (CIC) (%)	Matériaux secs (%)	Total (%)
Papier/carton	33,1	30,5	2,8	24,7
Verre	8,1	1,3	*	3,4
Plastique	6,9	5,6	*	4,7
Métaux	5,9	37,4	3,0	18,1
Bois	2,1	7	14,6	7,1
Matières organiques (putrescibles)	30,6	6,5	Ne s'applique pas	13,3
Résidus domestiques Dangereux	1	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas	0,3
Asphalte et béton	*	Ne s'applique pas	70,8	17,1
Gypse	*	Ne s'applique pas	3,2	0,8
Pneus	*	2,8	Ne s'applique pas	1,1
Autres (appareils électroménagers)	12,2	8,9	5,7	9,3
Tonnage	2 452 600	2 864 000	1 691 000	7 007 600
% du total générale	35	40,9	24,1	100

*Compris dans la catégorie « Autres »

Source : Ministère de l'environnement, 1992

Le tableau 2.2 de la page suivante nous montre la composition chimique de chaque type de déchets. Ce tableau nous aidera à mieux comprendre les interactions physico-chimiques qui interviennent lors de la décomposition des déchets.

Tableau 2.2 : Composition chimique des différentes composantes des déchets en fraction de masse humide (Nastev, 1998)

Type de déchets	Composantes	Carbone	Hydrogène	Oxygène	Azote	Sulfure	Cendre
Organique	Nourritures	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
	Produits du jardin	48.0	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
	Produits du papier	44.0	6.0	44.3	0.3	0.2	5.5
	Plastique	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
	Textiles	55.0	6.6	31.2	4.6	0.1	2.5
	Caoutchouc	78.0	10.0	-	2.0	2.0	10.0
	Cuire	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
	Bois	50.0	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
Inorganique	Verre	0.5	0.1	0.4	< 0.1	-	98.9
	Métal	4.5	0.6	4.3	< 0.1	-	90.5
	Cendre, roche, etc.	26.0	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0

2.1.3 Impacts environnementaux

Le mode de dégradation des déchets enfouis est très différent des processus existant dans les sols adjacents au site. Cette différence entraîne un contraste qui devient un inconvénient environnemental majeur puisque la nature des sols et du site est différente. Ainsi, si un site est mal conçu, il provoquera un déséquilibre majeur dans l'environnement, d'où l'apparition de problèmes de pollution durables.

Il existe deux sources principales de pollution provenant d'un site d'enfouissement : les lixiviats et les biogaz. L'eau de pluie et/ou la nappe souterraine qui percole au travers des déchets produisent les lixiviats par lessivage. Ces derniers peuvent polluer les eaux souterraines et celles de surface. Les biogaz, pour leur part, participent à l'effet de serre, sont explosifs lorsqu'ils se retrouvent mélangés à l'air à partir d'un certain pourcentage et peuvent être toxiques pour l'être humain et la végétation. Le chapitre suivant explique plus en détail la composition, le comportement et les problèmes reliés aux biogaz. D'autres sources de pollution sont aussi présentes. Durant la période d'exploitation, il y a les bruits, les odeurs dégagées par les biogaz, la présence de

rongeurs, d'insectes et d'oiseaux ainsi que la dégradation visuelle. Ces nuisances ne sont pas à négliger car elles sont proportionnelles à la taille des sites qui, lui, résulte de la densité de la population et de l'activité humaine. Plus il y a d'activité humaine, plus il y a de déchets, moins il y a de place pour les sites et plus la gestion des nuisances est cruciale.

2.2 BIOGAZ

Les biogaz sont le résultat de réactions biochimiques de dégradation qui se produisent au sein des sites d'enfouissement. Cependant, plusieurs facteurs doivent être réunis afin que le processus de dégradation ait lieu. Cette combinaison adéquate tient à la présence de :

- matière organique, surtout pour les nutriments (carbone, hydrogène, oxygène, azote et phosphore);
- eau, importante pour le processus d'hydrolyse;
- température, essentielle lors de la décomposition anaérobie;
- pH, la production de méthane est maximale pour un pH de 7 à 7,2 et bonne pour un pH de 6,8 à 8.

La combinaison de ces facteurs est indispensable à la production des biogaz tout comme les micro-organismes qui sont introduits dans les sites par le biais des déchets organiques ou qui sont présents dans les sols environnants. Ces micro-organismes sont des bactéries dites *méthanogènes* (EMCON, 1980).

La production des biogaz peut se résumer en cinq phases : une phase de digestion aérobie suivie de 4 phases de digestion anaérobie. La digestion aérobie est une phase où l'oxygène est consommé pour produire du gaz carbonique. Ensuite, commencent les phases de digestion anaérobie et la méthanogénèse. Nous y reviendrons ultérieurement.

Les biogaz sont composés en grande majorité de méthane, de dioxyde de carbone, d'azote et de vapeur d'eau. Il y a aussi présence de plusieurs composés à l'état de trace. Le tableau 2.3 indique les pourcentages par volume des biogaz que l'on retrouve généralement dans un site d'enfouissement :

Tableau 2.3 : Composition typique des gaz d'un site d'enfouissement (tiré de Ham et Barlaz, 1989; Robinson, 1986)

Composantes	Formule chimique	% volume
Méthane	CH ₄	47.4
Dioxyde de carbone	CO ₂	47.0
Azote (gaz atmosphérique)	N ₂	3.7
Oxygène (gaz atmosphérique)	O ₂	0.8
Vapeur d'eau à 25°C	-	3.0
Paraffine	-	0.1
Hydrocarbure aromatique cyclique	-	0.2
Hydrogène	H ₂	0.1
Sulfate d'hydrogène	H ₂ S	0.01
Monoxyde de carbone	CO	0.1
Composés trace	-	0.5

Ici, le méthane et le dioxyde de carbone sont en quantité égale. Des études montrent des taux de méthane plus élevés selon le type de matière qui se décompose. La décomposition de la cellulose donne 50 % de méthane (CH₄) et 50 % de dioxyde de carbone (CO₂), celle des protéines donne 51,5 % de CH₄ et 48,5 % de CO₂, alors que celle de lipide donne 71,4 % de CH₄ et 28,6 % de CO₂ (Ham et Balzard, 1989). Ainsi, la présence en plus ou moins grande quantité de l'un de ces trois composés dans les déchets peut faire varier le pourcentage de méthane dans les biogaz.

2.2.1 Caractéristiques des gaz composant les biogaz

Voici quelques caractéristiques des deux principaux gaz — méthane et dioxyde de carbone — qui composent les biogaz.

- Le méthane (CH_4) : ce gaz inodore et incolore a une densité de 0,6 à 0,7 kg/m^3 pour la plage de température que l'on retrouve dans les sites d'enfouissement. Étant plus léger que l'air, le méthane migre verticalement vers le haut du site.
- Le dioxyde de carbone (CO_2) : la densité de ce gaz est de 1,8 kg/m^3 , donc plus lourde que l'air. Ceci implique que le CO_2 peut avoir tendance à descendre dans le bas des sites d'enfouissement où il se retrouve en grande concentration. Étant très soluble dans l'eau, le CO_2 entraîne une baisse de son pH.

2.2.2 Production des biogaz

La production des biogaz peut être représentée en cinq phases selon la dynamique suivante (figure 2.1) :

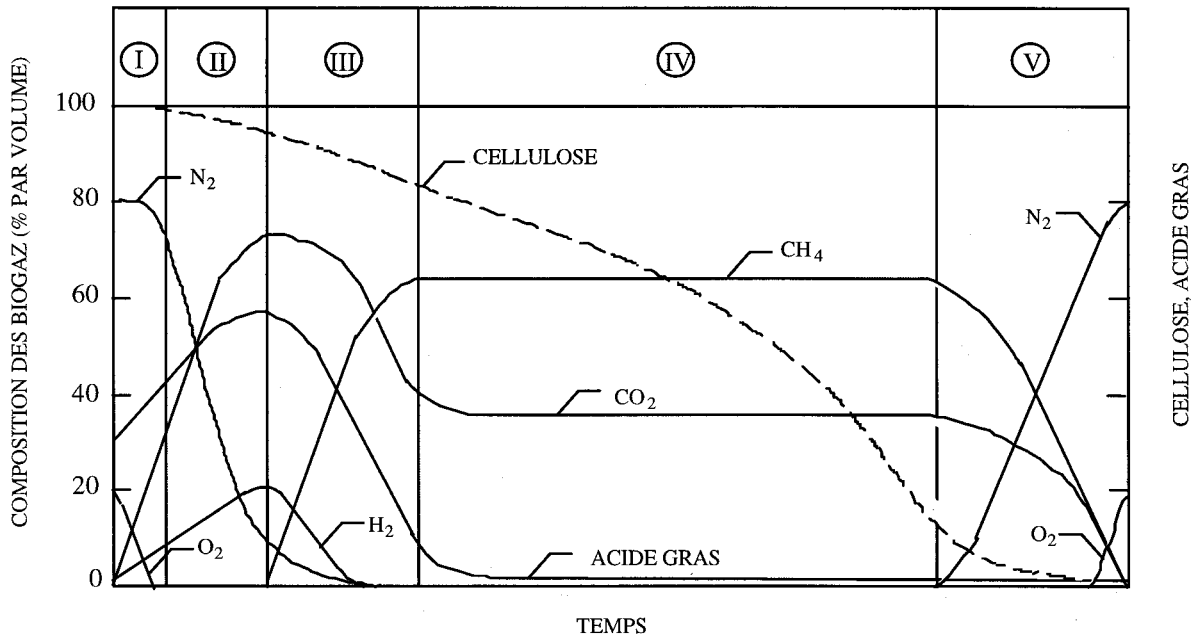


Figure 2.1 : Variation de la composition des gaz dans un site d'enfouissement (Farquhar et Rovers, 1973; modifié par Rees, 1980)

Cette figure illustre chacune des 5 phases. Précisons que les pourcentages et le temps de chaque phase sont variables puisqu'ils sont indexés à la quantité et le type de matière organique. Or, nous l'avons vue précédemment, la quantité de matière organique dans les déchets est variable selon les sites d'enfouissement et selon les pays. On peut s'attendre à une proportion plus importante de déchets organiques dans les pays en voie

de développement puisqu'ils ont une infrastructure industrielle moins développée. De plus, le climat affecte aussi la production des biogaz. Ainsi, dans un climat sec, la production sera moins importante que dans un climat humide car le mouvement de l'eau est un des phénomènes qui aide la production de biogaz (Hartz et Ham, 1982). D'un autre côté, les températures froides ralentissent les processus de dégradation et, donc, la production des biogaz.

Voici en détail les 5 phases de décomposition :

Phase I La phase I est la phase de *digestion aérobie*. Suite à l'enfouissement des déchets et leur compactage par des moyens mécaniques, le processus de décomposition de la matière organique est entamé. Après l'enfouissement, une quantité importante d'air est mélangée aux déchets, c'est la présence de l'oxygène qui entraîne la phase aérobie. Durant cette phase, cet oxygène est consommé par des micro-organismes. On assiste au début à la production de dioxyde de carbone (CO_2) et à la production de chaleur. La concentration d'azote est peu affectée durant cette phase. L'azote ne sera pas décomposé chimiquement de façon importante, il sera donc déplacé hors du site lorsque la pression interne augmentera en raison de la production des biogaz. Remarquons que la durée de cette phase est très courte, environ 10 jours.

Phase II C'est à la phase II que la *digestion anaérobie* commence. La concentration de CO_2 continue d'augmenter. Il y a également une production d'hydrogène. Les processus responsables de ces phénomènes seront discutés plus loin. Notons que, pendant cette phase, l'azote est déplacé par les gaz produits. Cette phase a une durée de 10 à 50 jours.

Phase III La phase II a mis en place des quantités importantes de CO_2 et d'hydrogène. Ce sont ces gaz qui seront utilisés par les bactéries méthanogènes pour former le méthane (CH_4). Donc, dans la phase III, la production de méthane commence en transformant l'hydrogène et le CO_2 . L'hydrogène sera totalement consommé et le niveau de CO_2 diminuera

significativement. Cette phase s'appelle la phase *méthanogène instable*. Elle couvre une période pouvant aller de 200 à 500 jours.

Phase IV Durant cette phase, les niveaux de CO_2 et de CH_4 restent stables. C'est la phase *méthanogène stable*. Cette phase est la plus longue, elle peut durer de 2 à 10 ans et voire plus. Elle est évidemment très importante pour la récupération du méthane car c'est à ce stade que le niveau de méthane est le plus élevé.

Phase V Dans cette phase finale, les taux de CH_4 et de CO_2 chutent, l'azote reprend place dans le site, suivi par l'oxygène.

Regardons maintenant les 4 processus qui sont responsables des 5 phases que nous venons de décrire. Ces 4 phénomènes sont résumés à la figure 2.2 :

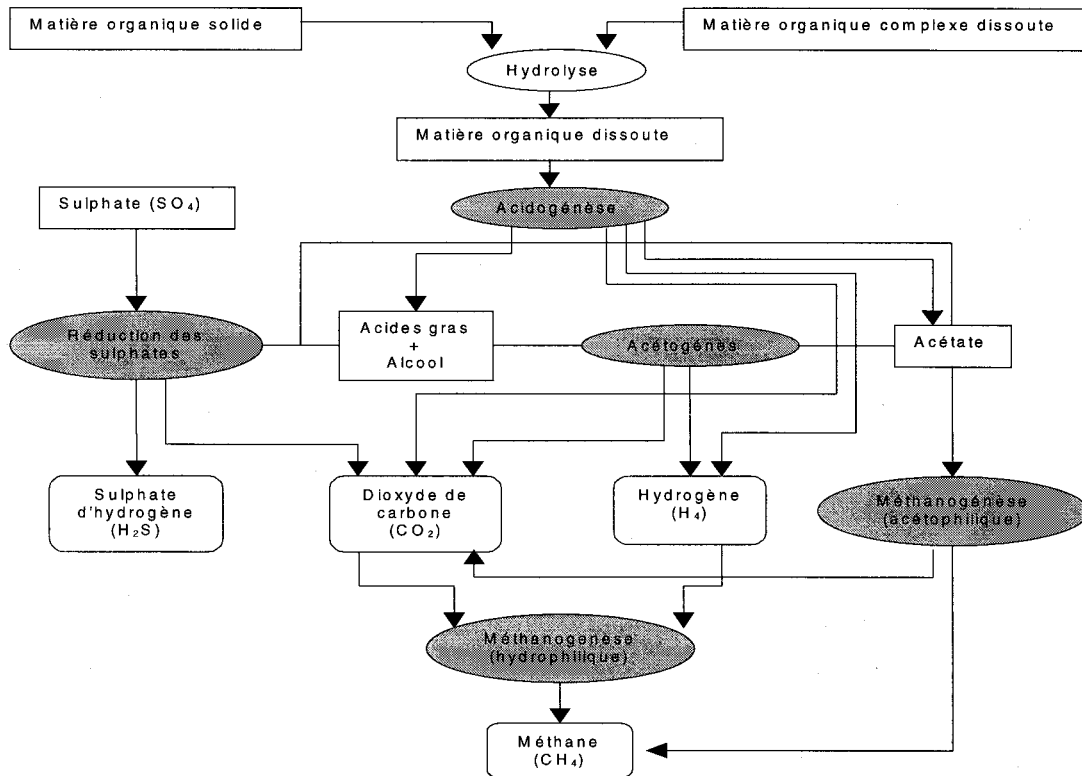


Figure 2.2 : Diagramme des étapes de la décomposition anaérobie (adapté de Nastev, 1998)

Il s'agit de :

- *L'hydrolyse* : une fois la digestion aérobie complète, les constituants organiques sont dans une forme qui n'est pas comestible pour les micro-organismes. L'hydrolyse permet de mettre ces composantes organiques en forme dissoute. Ainsi, les bactéries peuvent accéder à ces composantes;
- *L'acidogénèse et l'acétogénèse* : la production de dioxyde de carbone et d'hydrogène est causée par l'acidogénèse et l'acétogénèse. L'acidogénèse reprend les produits de l'hydrolyse pour donner des acides gras, de l'alcool et des gaz (H_2 et CO_2). C'est un processus de fermentation, donc il est généré par des bactéries (non-méthanogènes). De plus, il fournit les réactifs pour l'acétogénèse. L'acétogénèse utilise donc les acides gras et l'alcool pour produire d'autres gaz (H_2 et CO_2) et de l'acide acétique. Il s'agit encore d'une fermentation mais ce ne sont pas les mêmes bactéries qui sont en cause. Les gaz et l'acide acétique seront les réactifs de la méthanogénèse. Ces procédés s'enclenchent au début de la phase II et se maintiennent jusqu'au début de la phase V où ils commencent à décliner;
- *La réduction des sulfates* : la réduction des sulfates ne contribue pas directement à la méthanogénèse, mais c'est un processus essentiel puisqu'il aide à contrôler le pH. Sans cette réduction, il y aurait une chute du pH et les bactéries méthanogènes ne pourraient survivre. En effet, pour un pH inférieur à 6,8 et supérieur à 8, il y a une forte diminution de la production du méthane;
- *La méthanogénèse* : maintenant que les éléments nutritifs sont présents et que le pH est sous contrôle, la méthanogénèse peut commencer. En fait, on distingue deux processus méthanogènes: la méthanogénèse acétophile et la méthanogénèse hydrogénophile. La méthanogénèse acétophile consomme de l'acétate de la manière suivante : $CH_3COO + H_2O + H^+ \Rightarrow CH_4 + HCO_3^- + H^+$. Les produits de cette réaction se transformeront en dioxyde de carbone. La

méthanogénèse hydrogénéophile utilise de l'hydrogène selon la réaction suivante : $4H_2 + HCO_3^- + H^+ \Rightarrow CH_4 + 3H_2O$.

Une fois que ces processus sont amorcés, ils se stabilisent et donnent lieu à une phase de production stable, la phase IV. La température joue aussi un rôle car différentes espèces de bactéries nécessitent des températures spécifiques pour vivre. On distingue trois gammes de températures : la gamme thermophile ($t > 44$ °C), la gamme mésophile ($20 < T < 44$ °C) et la gamme psychrophyle ($T < 20$ °C). Aux températures thermophiles, la production de méthane est maximale mais la plupart des sites fonctionnent à des températures mésophiles. Pour des températures supérieures à 60°C, il y a diminution de la production de méthane (EMCON, 1986). Le pourcentage d'eau contenu dans les déchets est un facteur déterminant pour la production des biogaz. En effet, l'hydrolyse est primordiale pour leur production mais aussi pour le transport des bactéries qui est facilité par un pourcentage élevé en eau. Ainsi, le maximum de production serait atteint dans la plage de 60 % à 80 % en poids d'eau (Farquahr et Rovers, 1973; EMCON Associates, 1980). Au-delà de ces taux, il peut y avoir une diminution de la production.

En résumé, les éléments organiques sont dissous, fermentés et ensuite transformés en méthane. Il est important de relever que la phase IV se produit lorsque le système a atteint un état d'équilibre où toutes les composantes sont actives.

2.2.3 Taux de production des biogaz

La production des biogaz n'est pas constante dans le temps. De plus, il est difficile de déterminer la production dans un site en raison, d'une part, de l'impossibilité de capter tous les gaz produits et, d'autre part, de la durée de la production qui est très grande et peut s'étendre sur plusieurs dizaines d'années. Toutefois, la littérature fait état de plusieurs modèles mathématiques qui permettent de représenter cette production. On citera, entre autres, Hilborn et al. (1979), Clancy et al. (1980), Kunz et Lu (1980) ainsi qu'Halvadakis (1983).

Plus particulièrement, le modèle de production utilisé par Nastev (1998) lors de l'élaboration du logiciel TOUGH2-LGM est basé sur l'équation cinétique générale de type Monod du processus de biodégradation. Cette équation permet d'établir le taux d'utilisation du substrat — matière organique — en fonction de la concentration des micro-organismes dans le système et de la concentration du substrat dissout entourant les micro-organismes (EMCON, 1980) :

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{KxC}{K_c + C} \quad (2.1)$$

où C est la concentration du substrat restant au temps t (concentration de substrat entourant les micro-organisme masse par volume), x est la concentration de micro-organisme (masse de micro-organisme par volume de déchets), K est le taux maximum de substrat utilisé par masse de micro-organisme (masse par volume), K_c est la concentration des déchets (masse par volume) au taux d'utilisation équivalent à une demie du taux maximum d'utilisation. Pour un C très petit, cette équation peut être réduite à une réaction du premier ordre :

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{KC}{K_c} x \quad C \ll K_c \quad (2.2)$$

Il est possible de remplacer le taux d'utilisation dC/dt par le taux de production (Nastev, 1998) $\Omega = d\zeta_c/dt = -d\zeta_p/dt$ ($m^3/tonne \cdot an$).

Le taux de production Ω ($m^3/tonne \cdot an$) est le volume de gaz généré pour une certaine masse de déchets dans un intervalle de temps donné. ζ_c ($m^3/tonne$) est la production cumulative qui représente le volume de gaz qui a été dégagé à un temps t pour une certaine masse de déchets. ζ_p ($m^3/tonne$) est le potentiel de production qui est défini comme le volume de gaz qui sera obtenu pour une masse de déchets donnée après un temps t . Il est important de définir aussi le potentiel initial, ζ_o ($m^3/tonne$), qui est le volume de gaz qui devrait être produit pour une certaine quantité de déchets. Voici une représentation graphique de ces potentiels :

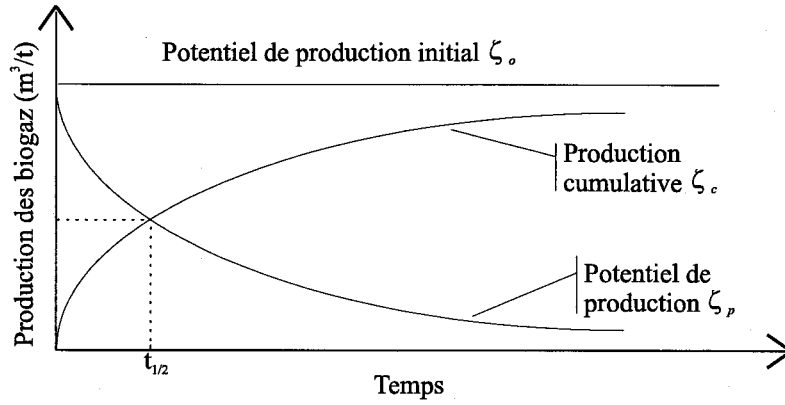


Figure 2.3 : Potentiels de production initiaux et cumulatifs (adapté de Nastev, 1998)

Il est possible de dériver un modèle de production ayant une cinétique de premier ordre à partir de l'équation 2.2 (Nastev, 1998). Ainsi, le taux de production pour un temps donné t devient une fonction linéaire du potentiel de production des gaz :

$$\Omega = \vartheta \zeta_p \quad (2.3)$$

où ϑ ($1/an$) est un paramètre d'ajustement.

Cette équation implique une décroissance exponentielle de la production de gaz par rapport au temps. Il est maintenant possible de mettre en relation le potentiel de production $\zeta_p(t)$, la production cumulative $\zeta_c(t)$ et le potentiel initial $\zeta_o(t)$, en intégrant l'équation 2.3 selon les intervalles de temps de t $[0; t]$ et du potentiel de production ζ_p $[\zeta_c; \zeta_o]$ (Nastev, 1998). L'équation devient :

$$-\int_{\zeta_o}^{\zeta_p} \frac{d\zeta_p}{\zeta_p} = \int_0^t \vartheta dt \quad (2.4)$$

après intégration :

$$\ln \zeta_p \Big|_{\zeta_o}^{\zeta_p} = -\vartheta t \quad (2.5)$$

Ce qui donne :

$$\zeta_p = \zeta_o e^{-\vartheta t} \quad (2.6)$$

où ϑ ($1/an$) est la constante pour la production des gaz. Cette équation définit le potentiel de production ζ_p comme étant une fonction exponentielle décroissante du potentiel de production initial ζ_o . Il est possible d'obtenir le taux de production en substituant l'équation 2.6 dans l'équation 2.3 :

$$\Omega = \vartheta \zeta_o e^{-\vartheta t} \quad (2.7)$$

Ce qui définit le taux de production comme étant une fonction exponentielle décroissante du potentiel de production initial ζ_o . Enfin, la production cumulative ζ_c sera la différence entre le potentiel initial de production et le potentiel de production au temps t :

$$\zeta_c = \zeta_o (1 - e^{-\vartheta t}) \quad (2.8)$$

Ainsi, pour pouvoir résoudre ces trois équations, le potentiel initial de production doit être connu. Ce potentiel est différent pour chaque site d'enfouissement. Il est lié à la composition des déchets ainsi qu'à leur âge. De plus, la constante cinétique ϑ doit être déterminée selon la définition de la demi-vie, qui est le temps pour lequel la moitié de la matière organique est dégradée. Enfin, il existe plusieurs types de déchets qui se dégradent selon des taux très différents.

Trois types de déchets sont définis en fonction de leur capacité de dégradation : très biodégradables, moyennement biodégradables et peu biodégradables. Chaque catégorie possède une constante de production des gaz ϑ_i . Ainsi, lorsque l'on introduit plusieurs types de déchets dans le même site, l'équation 2.8 devient (Nastev, 1998) :

$$\zeta_c = \zeta_o \sum_{i=1}^3 w_i (1 - e^{-\vartheta_i t}) \quad (2.9)$$

où w_i est la fraction de masse de la i^{eme} catégorie de biodégradation, ϑ_i est la constante de production de la i^{eme} catégorie biodégradable. Il est possible de faire le même exercice avec le taux de production :

$$\Omega = \zeta_o \sum w_i \vartheta_i e^{-\vartheta_i t} \quad (2.10)$$

2.2.4 Problématique des biogaz

Les biogaz constituent, avec les lixiviats, les principales sources potentielles de pollution pour les sites d'enfouissement sanitaire. Le méthane (CH_4) et le dioxyde de carbone (CO_2) sont les deux gaz produits en plus grande quantité (voir tableau 2.3). Les autres gaz, qui sont beaucoup moins abondants, demeurent une source de pollution importante ainsi qu'un danger pour la santé humaine et la végétation tout en étant responsables des mauvaises odeurs.

Les sites d'enfouissement ne sont pas les seules sources de méthane. En effet, les processus de fermentation de la matière organique dans des conditions anaérobies sont présents dans les marais, dans les rizières, dans le pétrole comme dans la digestion des êtres vivants. De la même façon, les feux de forêt produisent aussi du méthane (Nastev, 1998). Pour ce qui est des sites d'enfouissement, les estimations font état d'une production allant de 8 à 20 % du total des émissions dans l'atmosphère (IPCC, 1992). Ces émissions en méthane peuvent devenir problématiques pour deux raisons :

- À une concentration molaire de 5 à 15%, le méthane devient un gaz explosif. Ainsi, les sites d'enfouissement étant souvent situés près des agglomérations urbaines, le méthane devient dangereux pour la sécurité des gens. Plusieurs cas d'explosions et de morts sont décrits dans la littérature (Gendebien et al., 1992). Bien que la grande majorité du méthane s'échappe par la partie supérieure des sites, il y a toujours une certaine quantité qui migre dans le sol adjacent. Ce phénomène devient plus important lorsqu'il y a une couverture imperméable

aux biogaz qui recouvre les sites. Si le méthane s'accumule dans un lieu clos, le plus souvent les bâtiments fermés ou les sous-sols des maisons, alors la concentration critique peut être atteinte. Des cas d'explosion dans des maisons situées à 200 m des sites ont été répertoriés. De plus, pour les sites d'enfouissement où il y a sur-pompage, l'air qui pénètre dans le site peut faire baisser le pourcentage de méthane à un niveau critique, ce qui peut entraîner un début d'incendie, voire, des explosions.

- Depuis quelques années, le réchauffement de la planète causé par l'effet de serre fait partie des phénomènes de pollution les plus discutés. Le méthane est l'un des gaz à effet de serre. Même si dans les activités humaines les émissions de méthane sont moins importantes, il faut savoir que ce gaz est 23 fois plus efficace pour retenir le rayonnement infrarouge que ne l'est le dioxyde de carbone (Nastev, 1998).

Comme pour le méthane, le dioxyde de carbone provient de plusieurs sources : décomposition de la matière organique, irruption volcanique, respiration animale et végétale. Cependant, les problèmes engendrés par ce dernier sont moins spectaculaires. Le CO₂ est l'un des gaz à effet de serre. Rappelons que le CO₂ est plus lourd que l'air, il a donc tendance à se retrouver au bas des sites en contact avec le lixiviat ou avec l'eau de la nappe souterraine dans laquelle il aura tendance à se solubiliser. Il y aura donc augmentation de l'acidité de la phase liquide.

Les autres problèmes provoqués par les biogaz sont les impacts sur la santé humaine et la végétation ainsi que la présence de mauvaises odeurs. Parmi les gaz qui se retrouvent à l'état de trace, il y a les *COV* — composés organiques volatils — qui sont très nocifs pour la santé humaine. Les composés les plus critiques sont le chlorure de vinyle et le benzène (Petersen, 1988). De plus, le dioxyde de soufre H₂S est responsable de la puanteur. Enfin, la végétation est souvent affectée par l'infiltration des biogaz dans le sol. En effet, le méthane en migrant dans les sols adjacents au site déplace l'oxygène qui est présent, d'où la détérioration de la végétation.

2.2.5 Les biogaz en tant que source d'énergie à valoriser

Les biogaz sont une source de pollution importante. Cependant, il existe des systèmes de contrôle — puits de captage — qui permettent de les récupérer pour les valoriser. En effet, le méthane contenu dans le biogaz a une haute valeur énergétique, ce qui le rend très attractif. Pour une concentration de 50 % en méthane, la valeur énergétique des biogaz est de 15,1 MJ/m³, par opposition à la valeur énergétique du gaz naturel qui est de 30,8 MJ/m³ (Nastev, 1998). Ainsi, avec un système de récupération adéquat, il est possible d'utiliser les biogaz soit pour faire de la vapeur et de l'électricité ou pour chauffer des édifices. Plus de cent projets de valorisation des biogaz sont dénombrés aux États-Unis (Thereloe, 1994). Au Québec, le CESM (Complexe environnemental de Saint-Michel) est un exemple de valorisation avec la production de 25 mégawatts d'électricité. La rentabilité d'exploitation des sites qui produisent d'assez grandes quantités de gaz est très intéressante. Il y a aussi la qualité des biogaz (% de méthane présent) qui doit être considérée pour juger de la rentabilité d'un projet. Par contre, ce n'est pas le cas pour les petits sites où le coût d'exploitation dépasse les recettes engendrées par la valorisation. Dans ces derniers cas, il faut brûler les biogaz.

2.2.6 Système pour brûler les biogaz

Le processus d'élimination des biogaz se fait par brûlage. Dans la plupart des cas, la valorisation s'effectue aussi par le biais du brûlage des biogaz pour en extraire leur potentiel énergétique. Certains sites font l'extraction du méthane pour le vendre par la suite comme gaz naturel. Lorsque les biogaz sont brûlés comme source d'énergie ou à l'air libre, il peut y avoir une émission de nouveaux gaz susceptibles d'être nocifs. Ce phénomène résulte de l'émission de monoxyde de carbone et des composés du NO_x à la mi-combustion. Ces gaz doivent être rebrûlés, et ce, durant la même opération afin d'être détruits (Rettenberger et Schreier, 1996). Les brûleurs doivent donc être techniquement conçus pour ce type d'usage car il faut réduire au maximum l'émission des gaz. Les paramètres qui influencent l'émission de ces gaz sont la température, le temps de réaction et l'ajout suffisant d'oxygène (Rettenberger et Schreier, 1996).

2.3 PHYSIQUE DE L'ÉCOULEMENT MULTIPHASE

L'écoulement des biogaz se fait dans la zone non saturée des sites d'enfouissement. Cet écoulement est appelé *multiphase* car il y a deux phases mobiles présentes : l'une liquide et l'autre gazeuse. La présence de ces deux phases rend complexe l'analyse du système. De plus, la phase gazeuse est composée de plusieurs gaz et de vapeur d'eau. Pour bien comprendre les principes physiques qui régissent cet écoulement, il faut faire une incursion dans la théorie de l'écoulement multiphase. Cette section est basée sur Nastev (1998) et les notes du cours (Écoulement en milieu poreux) de Lefebvre (1998).

2.3.1 Le milieu des déchets en tant que milieu poreux

Un site d'enfouissement est un milieu poreux au même titre que le sol dans lequel s'écoule l'eau souterraine. Il est donc composé de particules solides et de vides (les pores). Un des paramètres importants pour définir l'écoulement est la porosité n qui est le rapport du volume des vides sur un volume total de référence V_{total} . Ici $n = V_{vide} / V_{total}$. Lorsque tous les pores sont remplis d'un fluide, comme l'eau, le milieu est saturé et il contient donc une phase fluide. Par contre, pour un milieu partiellement saturé, il y a présence de deux phases dans les déchets, par exemple les biogaz (phase gazeuse) et le lixiviat (phase liquide). La figure 2.4 en fait une représentation.

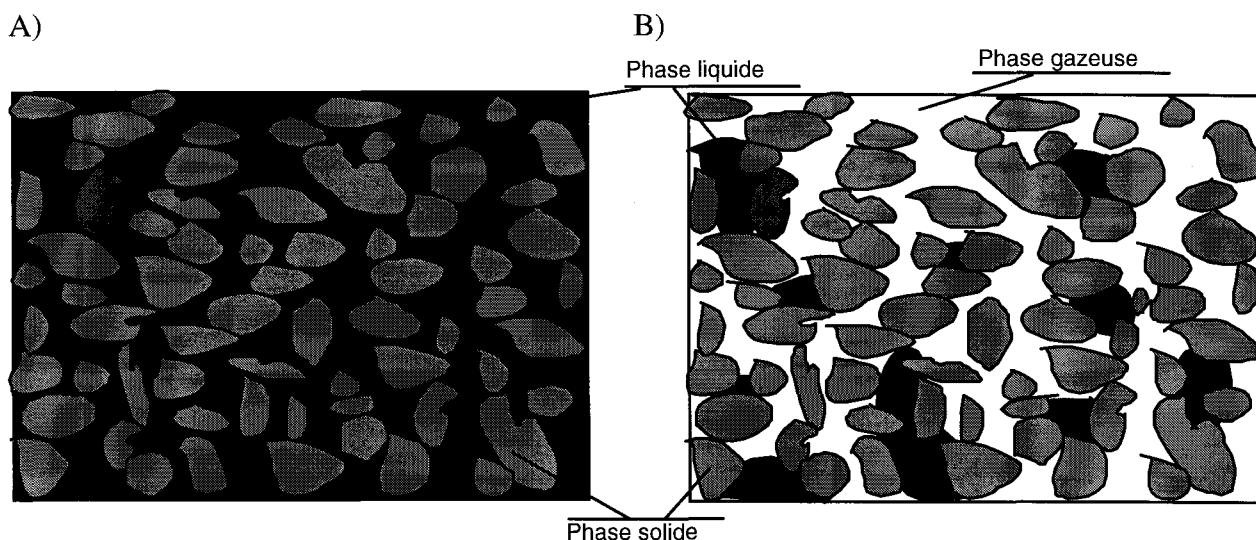


Figure 2.4 : A) Milieu saturé avec une phase aqueuse - B) Milieu non saturé contenant deux phases aqueuses

Il est très difficile de déterminer la porosité dans les sites d'enfouissement. En effet, des processus tels que la biodégradation, la consolidation et la redistribution des particules solides rendent le milieu des déchets très compressible (Nastev, 1998). Cela a pour effet de faire varier la porosité dans le temps, et ce, sur de courtes périodes. À long terme, ces phénomènes entraînent une minéralisation des déchets et donc, diminuent la porosité du milieu.

De plus, l'hétérogénéité dans les déchets est très importante : d'une part, les couches inférieures se trouvent fortement compactées — ce qui diminue leur porosité — et d'autre part, il est très difficile de déterminer la nature des déchets en place. Ainsi, d'une zone à l'autre, un site d'enfouissement peut avoir des propriétés hydrogéologiques fort différentes. Des paramètres comme la transmissivité et l'emmagasinement sont aussi très importants à déterminer pour établir l'écoulement dans un milieu et le captage par un puits de pompage. Cependant, ces paramètres demeurent difficiles à établir pour un site d'enfouissement.

2.3.2 Tension de surface et pression capillaire

Lorsque deux fluides immiscibles sont en contact, il se crée une tension interfaciale qui est la conséquence du déséquilibre des forces d'attraction entre les molécules différentes au contact de ces deux fluides. Dans les sites d'enfouissement, les biogaz et le lixiviat sont les deux fluides immiscibles que l'on retrouve au niveau des pores.

Ces deux fluides représentant deux phases sont en contact avec les déchets qui forment les parois solides des pores. Lors de ce contact, l'un des deux fluides aura tendance à adhérer aux parois (fluide mouillant) alors que l'autre se logera au centre des pores. Cette dernière constatation résulte du phénomène de mouillabilité qui est décrit par l'équation de Young-Dupré pour les surfaces planes :

$$\sigma_g - \sigma_l = \sigma \cos \theta \quad (2.11)$$

Cette équation relie les tensions de surface σ (N/m) avec la mouillabilité *relative des fluides* selon l'angle de contact Θ . Avec l'exemple de la figure 2.5, pour un $\Theta < 90^\circ$, le liquide est mouillant, alors que pour un $\Theta > 90^\circ$ le gaz est mouillant.

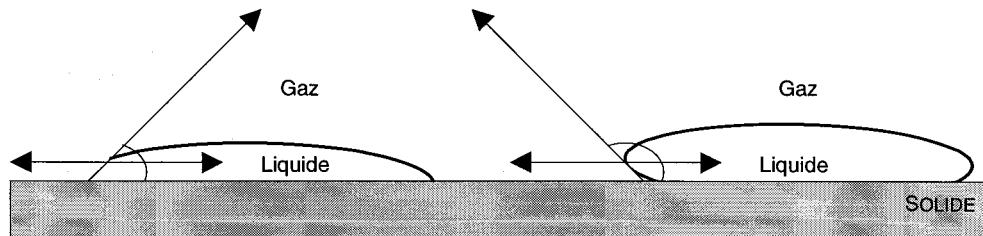


Figure 2.5 : Mouillabilité et angle de contact entre les fluides et les solides

La mouillabilité est importante car elle contrôle la distribution des phases fluides au niveau des pores dans la zone non saturée. Ainsi, les fluides mouillants auront tendance à se loger dans les plus petits pores contre les parois solides, ce qui laisse la place au fluide non mouillant dans les plus grands pores.

La pression capillaire est un autre phénomène physique important dans les milieux non saturés où il y a présence de deux phases fluides immiscibles. Elle résulte de la différence de pression à l'interface des deux fluides. En raison de cette différence, l'interface entre les fluides sera courbée (voir figure 2.6). L'expression de la pression capillaire se traduit de la manière suivante :

$$P_c = P_1 - P_2 \quad (2.12)$$

où P_c (Pa) est la pression capillaire, P_1 et P_2 la pression des deux fluides. Les deux fluides étudiés sont le biogaz et l'eau — le lixiviat ayant des propriétés hydrogéologiques semblables à l'eau.

Il est possible de relier la pression capillaire à la tension de surface. Ainsi, lorsque l'on enfonce un tube en verre de très faible rayon r , appelé *tube capillaire*, dans l'eau, il y aura une remontée de l'eau dans le tube :

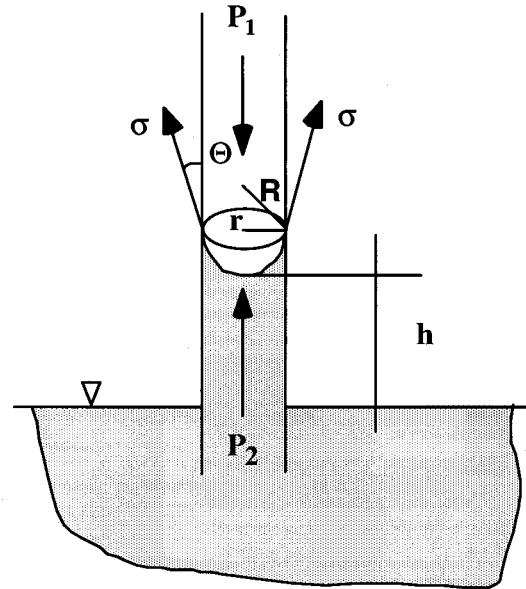


Figure 2.6 : Tube capillaire

Cette remontée est due à la tension de surface entre le verre et l'eau. La pression capillaire est reliée à la tension interfaciale entre les deux fluides immiscibles par l'expression de Young-Laplace :

$$P_c = \frac{2\sigma}{R} \quad (2.13)$$

où R (m) est le rayon de courbure moyen de l'interface. Ici, l'interface est supposée sphérique, il est donc possible d'écrire :

$$R = \frac{r}{\cos \theta} \quad (2.14)$$

Enfin, en substituant l'équation 2.13 dans 2.14, on obtient :

$$P_c = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta \quad (2.15)$$

Cette équation relie la tension de surface et le rayon des pores à la pression capillaire.

Il est possible de comparer l'effet des tubes capillaires à celui des pores d'un milieu poreux et ainsi représenter la pression capillaire dans ce milieu. Le rayon des tubes dépendra de la géométrie des pores et de la texture du milieu. La pression capillaire peut aussi être décrite par la hauteur de la remontée dans le tube du fluide mouillant :

$$P_c = \Delta\rho gh \quad (2.16)$$

où $\Delta\rho$ (kg/m^3) est la différence de densité entre les deux fluides, g est l'accélération gravitationnelle ($9,8 m/s^2$) et h la hauteur (m) de la remontée du fluide mouillant dans le tube capillaire.

Nous avons vu que l'écoulement des biogaz se fait dans la zone non saturée des sites d'enfouissement. Il existe un lien entre la saturation d'un milieu poreux et la pression capillaire. Ainsi, des courbes de pression capillaire vs la saturation d'un milieu (voir figure 2.7) sont réalisées en laboratoire sur des échantillons pour différents sols et fluides. Un échantillon de sol est complètement saturé avec un fluide mouillant — exemple, l'eau (phase liquide). Par la suite, une pression capillaire est imposée aux fluides non mouillants — exemple, l'air (phase gazeuse) — pour qu'il déplace le fluide mouillant. Le drainage, c'est-à-dire le déplacement du fluide mouillant, débutera lorsque la pression capillaire appliquée à l'air sera assez grande pour déplacer l'eau. Cette pression correspond à la pression de déplacement P_b sur la figure 2.7.

Dans un deuxième temps, il y aura désaturation progressive à mesure que la pression capillaire croît. Remarquons qu'il y a une limite au drainage et que l'air ne déplace pas toute l'eau dans l'échantillon. Il reste une certaine quantité d'eau, et ce, même si la pression capillaire continue à augmenter. C'est la saturation résiduelle en eau S_r . Cette eau se retrouve emprisonnée dans les pores. La saturation maximale à l'air S_{mg} étant atteinte, le processus inverse est appliqué. La pression capillaire est diminuée progressivement. Il y a donc imbibition, c'est-à-dire qu'il y a retour de la phase liquide dans l'échantillon. Les deux courbes, drainage et imbibition, ne correspondent pas. C'est le phénomène d'hystérèse qui apparaît car l'eau ne déplace pas tout l'air qui est

contenu dans l'échantillon. Comme pour le fluide mouillant, il reste une certaine quantité du fluide non mouillant, c'est la saturation résiduelle en air S_{rg} .

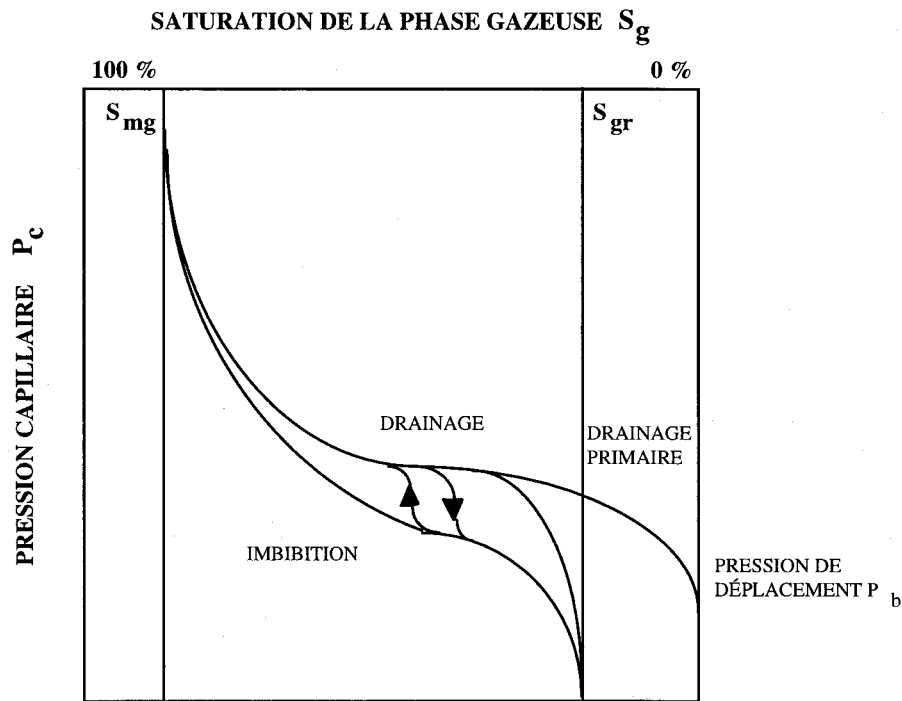


Figure 2.7 : Courbe de pression capillaire en fonction de la saturation

Les courbes capillaires changent selon les types de sols : pour un sol grossier, la pression de déplacement sera plus faible parce que les pores sont plus grands, il sera donc plus facile de déplacer le liquide mouillant et, inversement, plus difficile pour les sols plus fins.

Des modèles analytiques ont été élaborés afin de représenter les pressions capillaires en fonction de la saturation pour divers types de sol. La caractérisation de ces paramètres étant difficile, voire impossible à réaliser dans le milieu des déchets, l'utilisation de ces modèles est inévitable. L'un des modèles les plus connus et qui est utilisé dans TOUGH2-LGM est celui de van Genuchten (1980). Ce modèle se prête bien à cette étude car il couvre l'ensemble des saturations d'un milieu : il est valide pour des

sols fins à grossiers et il est facile à intégrer dans un modèle numérique. L'équation définissant ce modèle est :

$$S_e = \left[1 + (\alpha P_c)^n \right]^m \quad (2.17)$$

Cette équation relie la saturation effective en eau S_e à la pression capillaire P_c .

Ici, S_e est égale à :

$$S_e = \frac{S_l - S_r}{S_m - S_r} \quad (2.18)$$

où S_r est la saturation résiduelle, S_m est la saturation maximale et S_l est la saturation en eau. Les paramètres m , n , et α , sont des paramètres d'ajustement de la courbe. Ainsi, m qui est égal à $m = 1 - 1/n$, contrôle la pente de la courbe alors que $\alpha (Pa^{-1})$ contrôle la hauteur du plateau de la pression capillaire. Ces paramètres sont utilisés dans le fichier d'entrées de TOUGH2-LGM afin que le programme puisse calculer les pressions capillaires en utilisant le modèle.

2.3.3 Perméabilité effective et relative

La perméabilité $k (m^2)$, selon la loi généralisée de Darcy pour tous les fluides, est la capacité d'un milieu poreux à transmettre un fluide. La perméabilité est dite absolue k pour un milieu saturé où il n'y a qu'un seul fluide. Lorsqu'il y a deux phases fluides immiscibles, l'espace alloué à l'écoulement est partagé par les deux fluides, ce qui réduit leur perméabilité respective. Cette capacité à transmettre deux fluides en même temps se nomme perméabilité effective k_e qui est définie pour chaque fluide (pour cette étude, k_g pour le gaz, et k_l pour le liquide). Une autre définition importante est celle de la perméabilité relative k_r qui est la perméabilité effective d'un fluide k_e divisée par la perméabilité globale de ce fluide k qui est définie par $k_{rg} = k_g/k$ pour un gaz et $k_{rl} = k_l/k$ pour le liquide.

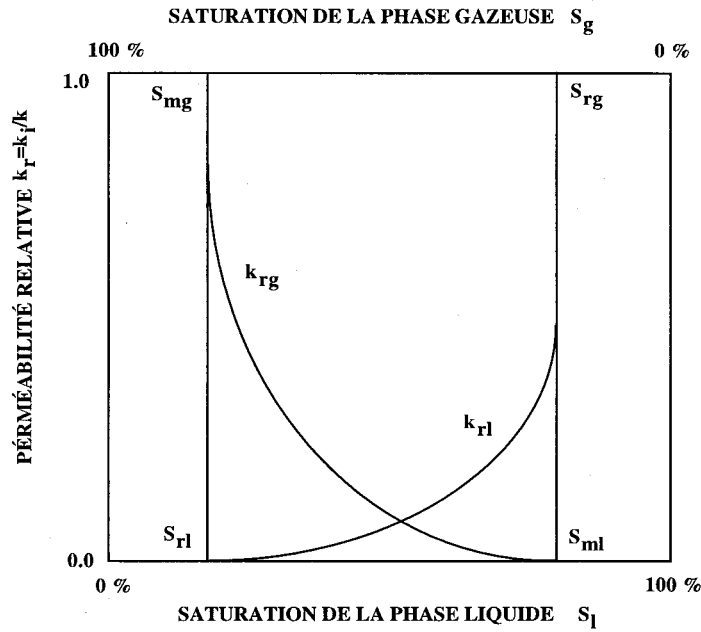


Figure 2.8 : Courbes de perméabilité relative vs la saturation des phases

Comme pour la pression capillaire, il existe des relations analytiques pour exprimer l'interdépendance entre la saturation et la perméabilité relative. Ici, c'est le modèle de Mualem (1976) qui est utilisé. L'équation qui relie la saturation effective S_e la perméabilité relative K_r , à partir des pressions capillaires en fonction de la saturation $P_c(S_e)$, est la suivante :

$$K_{rl}(S_e) = \sqrt{S_e} \left[\frac{\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{P_c(S_e)}}{\int_0^1 \frac{dS_e}{P_c(S_e)}} \right]^2 \quad (2.19)$$

Il est possible de simplifier cette équation en intégrant le modèle de capillarité de van Genuchten au modèle de Mualem. La relation que l'on obtient entre la perméabilité relative du fluide mouillant — ici, l'eau — et la saturation effective en eau est la suivante (van Genuchten, 1980) :

$$k_{rl} = \sqrt{S_e} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (2.20)$$

2.3.4 Mouvement des fluides

Il y a deux types de mouvement des fluides, soit l'advection et la dispersion. Comme pour les milieux saturés, les équations d'écoulement de Darcy s'appliquent au mouvement advectif des fluides dans le milieu poreux non saturé. Pour les biogaz, le déplacement des composés gazeux dans les déchets est relié à l'advection et à la diffusion.

Le déplacement advectif est dû à la différence de charge hydraulique qui existe dans un milieu. Les fluides auront tendance à se déplacer d'un endroit où la charge est élevée vers un endroit où elle est basse. La dispersion dans un milieu poreux est causée par deux processus : la dispersion hydrodynamique et la diffusion. La dispersion hydrodynamique est le résultat du frottement des fluides contre les parois solides du milieu poreux; alors que la diffusion est due au gradient de concentration d'un composé, le déplacement se faisant des concentrations élevées vers les concentrations basses.

2.4 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES BIOGAZ

La modélisation numérique a commencé vers le milieu des années 1970 dans le domaine de la production et du mouvement des biogaz dans les sites d'enfouissement. Il y a trois types de modèles qui ont été élaborés : 1) les modèles de génération des biogaz, 2) les modèles de transport des biogaz et 3) les modèles incluant le transport et la production des biogaz (El-Fadel, 1991) — ce qui est le cas pour TOUGH2-LGM.

Les objectifs de la modélisation, selon El-Fadel (1991), sont de minimiser les risques des biogaz, améliorer les réseaux de captage et identifier les paramètres qui affectent la méthanogénèse. Dans le cadre de ce projet, l'intérêt de la modélisation est d'améliorer les connaissances sur l'efficacité de différents types de puits de captage pour des sites d'enfouissement d'épaisseurs variables. Les résultats seront intégrés dans un système d'abaque qui pourra être consulté lors de la conception d'un réseau de captage.

Le principe de la modélisation consiste à prendre des équations mathématiques qui décrivent la physique d'un système — ici, l'écoulement des biogaz dans les déchets —, de les discrétiser et de les résoudre par diverses méthodes numériques. Afin d'avoir une image la plus fidèle possible, il faut des conditions aux limites et des conditions initiales qui représentent l'état du système. Pour assurer la représentativité du modèle, il est important de le caler. Pour ce faire, les résultats du modèle sont comparées aux données recueillies sur le terrain (la réalité), pour ensuite modifier le modèle afin qu'il soit plus près de la réalité.

Les modèles mathématiques sont essentiels pour la projection dans le futur des observations actuelles sur les mouvements des biogaz et du système de captage (Nastev, 1998). Les modèles de prédiction mathématiques reposent sur la solution analytique ou numérique des équations d'advection-dispersion. La différence entre les modèles analytiques et numériques est que ces derniers permettent une représentation plus complexe des systèmes étudiés. Ainsi, les modèles analytiques décrivent l'écoulement advectif à une dimension et l'écoulement dispersif est représenté par un coefficient soit uni ou multidirectionnel. De plus, la géométrie de ces modèles reste assez simple. Enfin, la représentation mathématique de la production des gaz est une fonction constante dans le temps (Nastev, 1998). Grâce à la puissance de calcul des ordinateurs, les modèles numériques permettent de représenter des systèmes qui sont plus complexes, donc possiblement plus près de la réalité.

Il est possible de séparer en deux l'histoire de la modélisation des biogaz. La première partie porte sur la production des biogaz alors que la deuxième concerne l'écoulement des biogaz. Les premiers modèles sur la production des biogaz ont été élaborés vers le milieu des années 1970. Voici la description de quelques-uns des modèles les plus importants :

- EMCON et Associés (1976) ont utilisé le modèle cinétique de Scholl Canyon. Ce modèle cinétique à une étape utilise une avec équation cinétique de premier ordre. Il s'apparente aux modèles d'utilisation de l'oxygène dissout par des bactéries qui utilisent de la matière organique décomposée. Le taux de

production total est calculé selon les caractéristiques de la composition des déchets avec différentes compositions de gaz selon le temps de déposition.

- Municipal Environmental Research Laboratory, City of Los Angeles (1977) s'appuie sur une étude basée sur le modèle cinétique de Palos Verdes. Ce modèle est en deux étapes. Sa cinétique est décrite avec les équations du premier ordre. Durant la première étape, le taux de production des gaz est proportionnel au volume de gaz dégagé. Pour la deuxième étape qui commence au sommet de la première, le taux de production décroît selon le potentiel restant. La demi-vie de production est atteinte au changement d'étape. Pour représenter le potentiel de production des déchets, trois types sont définis : fortement biodégradables, moyennement biodégradables et peu biodégradables, avec la somme de production des trois types de déchets. Le temps n'est pas considéré.
- Hilborn et al. (1979) ont développé un modèle dynamique pour la génération et le contrôle des biogaz. Le taux de production maximum est atteint deux ans après la mise en place des déchets. Par la suite, la production diminue selon une courbe exponentielle avec une demi-vie entre 10 et 30 ans. Le nombre de paramètres d'entrées est de 35, ce qui vient augmenter l'incertitude de la prédiction.
- Halvadaki (1983) (MGM) a conçu un modèle d'approximation du taux de génération par fonction triangulaire, basé sur le potentiel théorique de production de gaz déterminé par des méthodes stœchiométriques ou par biodégradabilité. La production totale est calculée à partir de la somme du taux de génération de chaque couche de déchets selon leurs âges de déposition.

Les premiers modèles numériques développés dans le domaine de la modélisation de l'écoulement des gaz dans les déchets et le sol adjacent ont été réalisés durant les années 1970. Voici les principaux :

- Alzaydis et Moore (1978) proposent un modèle mathématique sur l'écoulement multiphase dans un milieu poreux. L'écoulement est advectif, avec deux modes de diffusion soit la diffusion de Knudsen et la *bulk* diffusion globale. Il fait une synthèse des équations d'états des forces de diffusion pour les combiner.
- Moore (1976), Moore et al. (1979 à 1982) ont effectué des travaux importants pour la modélisation numérique en utilisant des modèles avec éléments finis et par différences finies. Ils modélisent le transport des gaz à l'extérieur des sites ainsi que l'influence de puits d'aération et de tranchés. Les pores dans le sol sont représentés par des tubes dont le rayon varie. Deux gaz sont représentés simultanément, soit l'azote et le méthane ou le dioxyde de carbone. Des abaques ont été réalisés comme outil de référence pour la conception de futurs sites.
- Findikakis et Leckie (1979) utilisent un modèle de production fondé sur les équations de Monod avec un taux de production à décroissance exponentielle. Le méthane et le dioxyde de carbone sont produits à quantité égale. Le modèle numérique représente l'advection et la diffusion en une dimension. La résolution des équations se fait par la méthode des différences finies. Les équations non linéaires sont résolues par itération avec la méthode Newton-Raphson.
- Metcalfe et Farquhar (1986) ont recours à un modèle mathématique pour la migration des gaz à deux dimensions avec résolution des équations par la méthode d'éléments finis de Galerkin avec éléments triangulaires. Les équations d'advection et de dispersion dans un milieu poreux ont été ajustées pour l'écoulement des gaz. L'écoulement des gaz est représenté dans le sol adjacent au site qui, lui, est une source continue.
- El-Fadel (1991) a développé un modèle numérique à une dimension, qui incorpore un écosystème microbien dynamique à couche multiple où le transport de la chaleur et des gaz dépend du temps. La méthode de résolution

est par éléments finis dont les équations non linéaires de transport des gaz sont résolues avec la méthode Newton-Raphson.

2.5 TOUGH2-LGM

Cette section est un résumé du chapitre 4 de la thèse de Nastev (1998).

TOUGH2-LGM (*Transport of Unsaturated Groundwater and Heat-Landfill Gas Migration*), comme son nom l'indique, est un logiciel qui simule le transport dans les milieux non saturés. Il a été adapté de TOUGH2 (Pruess 1987 et 1991) et de son dérivé TOUGH2-DMA (Lefebvre 1994) par Nastev (1998) dans le cadre de sa thèse de doctorat. Il permet la simulation de la production, du mouvement des gaz et du transfert de la chaleur dans les déchets et le sol adjacent. Les différences principales par rapport à TOUGH2 sont :

- Développement d'équations d'états pour répondre aux objectifs du modèle, c'est-à-dire l'ajout de deux gaz : le méthane et le dioxyde de carbone. Donc 4 composantes dans la phase gazeuse : l'air (azote N_2), la vapeur d'eau, le méthane et le dioxyde de carbone plus une composante de chaleur.
- Un modèle de production exponentielle du biogaz et transport de chaleur élargi au méthane et au dioxyde de carbone;

Ce logiciel est, par rapport à ses prédécesseurs, un meilleur outil pour représenter les processus qui sont présents dans un site d'enfouissement car il est plus complet au niveau des composantes mesurées — 4 gaz et une composante de chaleur — et il comporte un modèle de production de gaz. De plus, il permet de représenter l'écoulement radial autour d'un puits, ce qui est indispensable pour notre étude.

2.5.1 Structure du logiciel

Le logiciel TOUGH2-LGM est divisé en blocs de sous-programmes qui sont appelés lorsque le programme principal est lancé. Lors du développement de TOUGH2-

LGM, le bloc EOS3-LGM a été ajouté pour répondre au besoin de la modélisation. Ce bloc représente les états thermodynamiques pour les quatre composés de masses en présence (l'air, le méthane, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone). De plus, il contient un sous-programme comprenant une composante d'énergie (chaleur), une source implicite (méthane, dioxyde de carbone et chaleur) qui représente la production de biogaz et un nouveau sous-programme pour le calcul de la masse et de l'énergie.

2.5.2 Détail sur la loi des gaz

La loi des gaz parfaits explique avec précision le comportement des gaz. Il sera décrit ici quelques notions appliquées dans TOUGH2-LGM. Pour de plus amples informations, voir Nastev (1998).

La fraction molaire est importante pour définir le mélange des gaz dans TOUGH2-LGM. À partir de la pression partielle P_g^j (Pa), il est possible d'obtenir la fraction molaire de chaque composé x_g^j (m^3/m^3) avec :

$$x_g^j = \frac{P_g^j}{P_g} \quad (2.21)$$

On peut aussi définir la densité partielle ρ_g^j (kg/m^3) de chaque composante j du mélange avec la pression partielle P_g^j du composé et la masse molaire M^j (g/mol) de ce composé par :

$$\rho_g^j = \frac{P_g^j M^j}{RT} \quad (2.22)$$

Un autre paramètre significatif est la fraction de masse w_g^j qui peut être déterminée pour un fluide j du mélange par le rapport de la densité partielle et totale :

$$w_g^j = \frac{\rho_g^j}{\rho_g} \quad (2.23)$$

Enfin, la relation entre la fraction de masse et la fraction molaire est la suivante :

$$w_g^j = \frac{x_g^j M^j}{\sum_{j=1}^4 x_g^j M^j} \quad (2.24)$$

Le dernier paramètre qui sera discuté est la relation entre la pression partielle dans la phase gazeuse P_g^j et la fraction de masse dans la phase liquide w_l^j . Ces deux variables sont reliées par une constante H_j comme suit :

$$H_j = \frac{P_g^j}{w_l^j} = \frac{P_g x_g^j}{w_l^j} \quad (2.25)$$

où H_j (J) est la constante de la loi de Henry pour le composé j du mélange. La loi de Henry définit la fraction du composé présent dans la phase gazeuse et liquide sous des conditions d'équilibre local. Pour cette étude, la constante est fonction de la température et est indépendante de la pression partielle du composé (Nastev, 1998).

2.5.3 Le mouvement des fluides dans TOUGH2-LGM

Le mouvement des fluides dans TOUGH2-LGM est défini par rapport au système d'écoulement qui existe dans un site d'enfouissement. Il y a présence de deux phases (gazeuse et liquide), un mélange de quatre composés fluides dans ces deux phases (N_2 , CH_4 , CO_2 et de l'eau) et une composante de chaleur.

Le mouvement total d'un composé F_j est la conséquence de deux mécanismes — l'advection et la diffusion — et peut être décrit par une sommation de flux dans les deux phases :

$$F_j = F_g^{jA} + F_g^{jD} + F_l^{jA} \quad (2.26)$$

où F_g^{jA} est le flux advectif dans la phase gazeuse, F_g^{jD} le flux par diffusion dans la phase gazeuse et F_l^{jA} le flux d'advection dans la phase liquide.

Le mouvement des gaz dans les sites d'enfouissement résulte de deux mécanisme : le gradient de pression (mouvement d'advection) et le gradient de concentration (mouvement de diffusion). Le gradient de pression qui amène le mouvement advectif des fluides est créé par la production des biogaz qui font augmenter la pression à l'intérieur du site et entraînent un déséquilibre dans le système. Le fluide aura tendance à se déplacer des zones de haute pression vers les zones de basse pression. L'advection qui se produit dans les deux phases est décrite selon l'équation de Darcy pour les milieux partiellement saturés par :

$$q_i = k \frac{k_{ir}}{\mu_i} (\nabla P_i + \rho_i g) \quad (2.27)$$

où q_i est le flux de la phase i (m/s), k_{ri} et k sont la perméabilité relative de la phase i (m^2) et la perméabilité intrinsèque du milieu, μ_i la viscosité de la phase i (Pa s), ∇P_i gradient de pression de la phase i (Pa/m), ρ_i densité de la phase i (unité de masse par unité de volume) et g vecteur gravitationnel (m/s^2). La viscosité et la densité sont la somme des différentes viscosités et densités des quatre fluides, le tout régi par la fraction molaire et la fraction de masse de chaque fluide présent dans le système. Rappelons que la fraction molaire des gaz présents dans le lixiviat étant très faible, ce dernier est considéré avoir les mêmes propriétés que l'eau.

Le flux de masse advectif F_i^{jA} peut être déterminé pour chaque composé j dans la phase gazeuse et la phase liquide par :

$$F_i^{jA} = q_i w_i^j \rho_i = -k \frac{k_{ir}}{\mu_i} (\nabla P_i - \rho_i g) w_i^j \rho_i \quad (2.28)$$

Ici, la pression P_i s'exprime dans les deux phases par P_g pour la phase gazeuse et P_l pour la phase liquide. Ces deux pressions sont reliées par la pression capillaire définie à l'équation (2.12) et qui peut être représentée sous la forme suivante :

$$P_l = P_g - P_c \quad (2.29)$$

Un aspect important pour les deux équations ci-dessus est que la pression capillaire et la perméabilité relative sont des fonctions non linéaires, ce qui rend la relation (2.28) hautement non linéaire en raison de l'interdépendance des deux fonctions. Ceci a une incidence sur le choix des méthodes de résolution numérique.

La dispersion dans un milieu poreux est causée par deux processus : la dispersion mécanique et la diffusion. Les pressions qui existent dans les sites d'enfouissement sont de l'ordre de 1,5 à 3 kPa, ce qui implique que l'écoulement est laminaire et que la dispersion mécanique peut être négligée (Moshen, 1980; Findikakis and Leckie, 1979; Baehr, 1991; Massman et Maden, 1994). La diffusion est donc la seule responsable de la dispersion dans le milieu des déchets. De plus, elle n'a lieu que dans la phase gazeuse car elle est négligeable dans la phase liquide. Une grande variété de modèles existe dans le domaine de la diffusion. En ce qui concerne TOUGH2-LGM, deux modèles ont été implantés pouvant ainsi être utilisés dans des situations bien précises. Ainsi, la diffusion est décrite par la loi de Fick comme suit :

$$F_g^j = -\tau D_o^j \rho_g \nabla w_g^j \quad (2.30)$$

où D_o^j (m^2/s) est le coefficient de diffusion d'un composé j dans le fluide libre, ∇w_g^j (m^{-1}) le gradient de la fraction molaire et τ la tortuosité dans le milieu poreux pour la phase gazeuse. Dans TOUGH2-LGM, le coefficient de diffusion est déterminé pour chaque composé par :

$$D_o^j = \frac{(1 - x_g^j)}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^4 \frac{x_g^k}{D_o^{jk}}} \quad (2.31)$$

Avec cette équation empirique (Bird et al., 1960), il est possible de déterminer le coefficient de diffusion pour un composé j dans un mélange gazeux à partir de D_o^{jk} (m^2/s) qui est le coefficient de diffusion binaire pour deux gaz j et k , x_g^j et x_g^k qui sont respectivement la fraction molaire du composé j et k .

Bear (1972) définit la tortuosité avec $\tau = (d/d_e)^2$, où d est le chemin parcouru par une molécule de gaz en ligne droite entre deux points et d_e , le chemin parcouru par une molécule de gaz entre ces mêmes points mais dans un milieu poreux. Le chemin étant plus long dans le milieu poreux, la tortuosité est toujours plus petite que 1. Deux modèles de diffusion découlant de deux définitions de la tortuosité ont été incorporés à TOUGH2-LGM. Ainsi, Millington et Quirk (1961) ont proposé l'équation suivante :

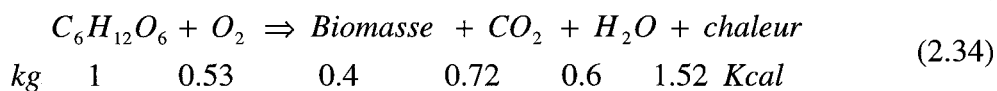
$$\tau = n^{\frac{4}{3}} S_g^{\frac{10}{3}} \quad (2.32)$$

Cette équation permet de relier la tortuosité à la saturation en gaz du milieu. De plus, avec l'exposant de la saturation, 10/3, ce modèle est plus sensible aux variations de la saturation. La deuxième définition de la tortuosité a été établie par Lai et al. (1976) après des tests en laboratoire sur trois types de sol. La relation est la suivante :

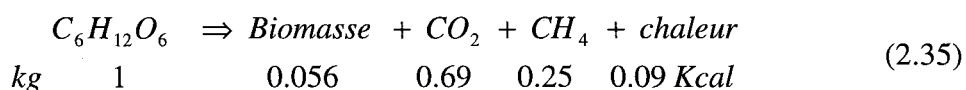
$$\tau = (n S_g)^{\frac{5}{3}} \quad (2.33)$$

2.5.4 Transfert de chaleur

Le processus de production de chaleur, résultat de la biodégradation des déchets, provient de deux réactions. La première réaction Pirt (1978) a lieu durant la phase de décomposition aérobie :



La chaleur créée est de l'ordre de 1,52 Kcal pour 1 kg de glucose, ce qui représente la plus grande production de tout le processus. L'oxygène étant rapidement consommé, la phase de décomposition anaérobie se met en place. La production de chaleur dans cette phase est moins importante, elle est décrite par la réaction suivante :



Pour 1 kg de glucose, il y a 0,09 Kcal de produit Pirt (1978). La chaleur engendrée est beaucoup moins importante mais elle permet de garder la température constante dans le site.

Deux processus sont responsables du mouvement de la chaleur dans les sites d'enfouissement. Premièrement, il s'agit de la migration des fluides qui transportent cette chaleur. Deuxièmement, il s'agit du gradient de température résultant d'une part, de la différence entre les températures variées qu'il y a à l'intérieur du site et d'autre part, de la différence entre les températures du site et celle de l'extérieur.

Dans TOUGH2-LGM, le processus de transport de chaleur est décrit par la loi de Fourier, $F_h^C = -\lambda \nabla T$, où F_h^C (J/m²s) est la conductivité du flux de chaleur; ∇T (K) le gradient de chaleur et λ (W m⁻¹ K⁻¹), est une constante de proportionnalité, la conductivité thermique du milieu. Puisque le transport de chaleur se fait par le biais des différents composés, les équations qui décrivent leurs mouvements seront utilisées. Ainsi, pour le transport advectif de la chaleur qui se produit dans les deux phases présentes, le terme F_i^{jA} (kg/m²s) qui provient de l'équation 2.28 est pris plus un terme h_i^j (J/kg) qui est l'enthalpie spécifique des phases gazeuse et liquide pour chacun des composés j de ces phases :

$$F_h^A = \sum_{j=1}^4 h_i^j F_i^{jA} \quad (2.36)$$

Comme pour l'advection, la diffusion de la chaleur est associée à l'équation de la diffusion (2.5.4) plus le terme de l'enthalpie, ce qui donne :

$$F_h^D = \sum_{j=1}^4 h_i^j F_i^{jD} \quad (2.37)$$

Toutes ces notions sont primordiales pour définir les équations mathématiques qui régissent le mouvement des fluides dans un milieu poreux tels les déchets. Elles seront donc incorporées au modèle afin qu'il soit le plus près possible de la réalité.

2.6 MÉTHODE NUMÉRIQUE

Nous avons vu que les mécanismes qui régissent le transfert de masse dans TOUGH2-LGM sont l'advection pour les deux phases et la diffusion dans la phase gazeuse, et ce, pour les quatre composantes du mélange et la chaleur. Pour définir cet écoulement, l'équation générale de continuité, qui définit le principe de conservation pour le système étudié, est la suivante :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} \Lambda^j dV = \int_{\Gamma_n} F^j \cdot n d\Gamma + \int_{V_n} \Omega^j dV \quad (2.38)$$

où Λ^j (kg/m³) est le terme d'accumulation de masse pour les quatre composantes et le terme de chaleur par unité de volume. F^j (kg/m²s) est le flux de toutes les composantes par unité de volume V_n (m³) dans la direction n perpendiculaire à la surface Γ_n et Ω^j (m³/s) le taux de génération pour chaque composante par volume.

Le terme Λ^j définit l'accumulation de masse pour les quatre fluides ou de chaleur, et ce, pour les deux phases en présence dans le volume V_n . L'accumulation de masse d'un composé j dans le volume dépend de la porosité n du milieu, de la saturation de la phase S_i , de la densité ρ_i de la phase, et de la fraction de masse w_i^j du composé dans la phase et elle s'exprime, comme suit, en fonction des deux phases :

$$\Lambda^{j=1,4} = nS_g \rho_g w_g^j + nS_l \rho_l w_l^j \quad (2.39)$$

L'accumulation de la chaleur dans le milieu est attribuable à la somme des accumulations dans la phase gazeuse et liquide de chaque composé ainsi que dans la phase solide. Elle s'exprime comme suit :

$$\Lambda^h = nS_g \rho_g u_g + nS_l \rho_l u_l + (1-n) \rho_s c_s \quad (2.40)$$

Ici, u_i (J/kg) est l'énergie interne des composés dans chaque phase, ρ_s est la densité du solide et c_s (J/kg^oT), la capacité thermique spécifique de la phase solide.

2.6.1 Discrétisation par la méthode des différences finies intégrales

TOUGH2-LGM utilise la méthode par différence finie intégrale (Narashiman et Witherspoon, 1976; Marsily, 1986) pour discrétiser, dans l'espace, les équations définissant les processus physiques qui s'appliquent à un milieu continu. Une représentation de la discrétisation de l'espace et des paramètres géométriques est donnée par la figure 2.9 :

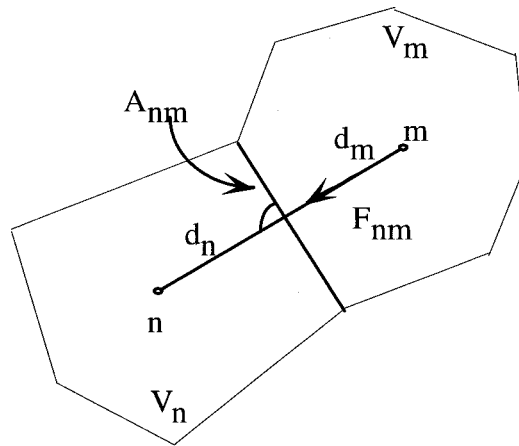


Figure 2.9 : Discrétisation du domaine dans l'espace et paramètres géométriques pour la méthode des différences finies intégrales (d'après Pruess, 1991)

La discrétisation de l'équation 2.41 est discutée en détail dans Pruess (1987). Le résultat de cette discrétisation est le suivant :

$$R^{j,t+\Delta t} \equiv \Lambda_n^{j,t+\Delta t} - \Lambda_n^{j,t} - \frac{\Delta t}{V_n} \left\{ \sum_m A_{nm} F_{nm}^{j,t+\Delta t} + V_n \Omega_n^{j,t+\Delta t} \right\} = 0 \quad 2.41$$

Cette équation, qui contient tous les termes d'accumulation, de flux et de sources, représente un système de $5*N$ équations : $4*N$ équations pour la conservation de la masse (eau, air, méthane et dioxyde de carbone) et $1*N$ équations de conservation d'énergie. De plus, il y a $5*N$ inconnues qui proviennent des cinq variables thermodynamiques qui seront décrites plus loin. Ici, N est le nombre d'éléments n compris dans le volume V .

2.6.2 Variable thermodynamique

Le nombre de variables thermodynamiques primaires qu'utilise TOUGH2-LGM pour décrire l'état du système est déterminé par la règle de phase de Gibbs qui est exprimée comme suit Pruess (1991) :

$$f = N_{mc} + 2 - N_{ph} \quad 2.42$$

où N_{mc} est le nombre de composantes et N_{ph} le nombre de phases. Ici, $N_{mc} = 4$ et $N_{ph} = 2$, ce qui donne pour $f = 4$. Toutefois, il y a un degré de liberté supplémentaire car la saturation des deux phases additionnées fait 1. Ce qui donne pour le nombre de degrés de liberté de saturation $N_{ph} - 1$:

$$f + N_{ph} - 1 = 5 \quad 2.43$$

Ceci nous indique le nombre de variables thermodynamiques primaires par n éléments. Ces variables ne sont pas les mêmes si l'on est en présence d'une ou de deux phases. Le tableau 2.4 nous indique ces variables :

Tableau 2.4 : Variables thermodynamiques primaires (d'après Nastev, 1998)

Variable	Une phase	Deux phases
X_1	Pression P(Pa)	Pression du gaz P_g (Pa)
X_2	Fraction de masse de l'air	Saturation en gaz S_{g+10}
X_3	Fraction de masse du CH_4 dans l'air, w_{air}^m	Fraction de masse du CH_4 dans l'air, w_{air}^m
X_4	Fraction de masse du CO_2 dans l'air, w_{air}^C	Fraction de masse du CO_2 dans l'air, w_{air}^C
X_5	Température T(°C)	Température T(°C)

Le logiciel peut donc utiliser certaines variables si l'écoulement est à une ou deux phases. Cependant, dans la plage de température où l'écoulement a lieu, il ne peut y avoir que deux phases dans le système. Il est possible d'utiliser une phase pour les conditions limites afin d'imperméabiliser cette limite (Nastev, 1998). Le paramètre X_2 représente la fraction de masse de l'air pour une phase et la saturation des gaz pour deux phases. Ces deux paramètres variant de 0 à 1, il a été nécessaire de les différencier.

Ainsi, lorsqu'il y a présence de deux phases, la saturation en gaz est additionnée à 10, S_g+10 .

Afin d'évaluer les propriétés de transport et de flux dans chaque élément, il faut dériver des variables secondaires à partir des variables primaires. Le tableau 2.5 nous décrit ces variables :

Tableau 2.5 : Variables thermodynamiques secondaires (d'après Nastev, 1998)

Variabiles	Phase gazeuse	Phase liquide
Saturation	S_g	$S_l(S_g)$
Perméabilité relative	$k_{rg}(S_g)$	$k_{rl}(S_l)$
Viscosité	$\mu_g(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$	$\mu_w(P_g, T)$
Densité	$\rho_g(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$	$\rho_w(P_g, T)$
Enthalpie spécifique	$h_g(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$	$h_g(S_w, S_g)$
Pression capillaire	-	$P_c(S_w, S_g)$
Fraction de masse de l'eau	$w_g^w(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$	$w_l^w(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$
Fraction de masse de l'azote	$w_g^n(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$	$w_l^n(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$
Fraction de masse du méthane	$w_g^m(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$	$w_l^m(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$
Fraction de masse du dioxyde de carbone	$w_g^l(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$	$w_l^l(P_g, S_g, w_{air}^m, w_{air}^c, T)$
Température	T	T

Ces variables peuvent être définies comme des fonctions non linéaires des variables primaires. D'autres sont prises en compte par le logiciel, il s'agit de la constante d'Henry pour la dissolution des gaz $H^j(T)$, de la tortuosité en fonction de la saturation $\tau(S_g, S_l)$ et du coefficient de diffusion moléculaire pour les composés de la phase gazeuse $D_o^j(P, w_g^j, T)$.

2.6.3 Méthode de résolution numérique Newton-Raphson

Pour résoudre l'équation (2.41), la méthode par itérations de Newton-Raphson est utilisée. Elle permet de linéariser le système d'équations par développement de résiduels

R en série de Taylor tout en permettant de trouver les variables primaires X qui minimisent ces résiduels.

2.6.4 Source de production et d'injection

Afin de modéliser le plus fidèlement possible les processus de production et migration des gaz, les puits de production et d'injection sont des outils importants. Trois sortes de puits peuvent être spécifiées dans TOUGH2-LGM :

- les sources implicites qui sont des sources représentant la production des biogaz dans le site;
- les sources explicites qui sont la pluie ou l'introduction d'air par un taux d'injection de masse;
- les puits d'extraction qui représentent le pompage des biogaz.

L'extraction des fluides peut être faite en masse ou en volume et elle est soit constante ou variable dans le temps. La composition d'une phase est déterminée par la mobilité relative de cette phase, alors que la masse du fluide est déterminée par la composition en masse de cette phase.

2.6.5 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont de deux types :

- Les conditions de Dirichlet définissent les conditions de pression, de température et de fraction de masse dans les éléments limites. Il y a deux moyens d'imposer des conditions constantes à ces limites. Premièrement, en établissant des volumes très grands de l'ordre de $10^{50} m^3$ avec une distance nodale très petite. Ceci implique que les variables primaires ne changeront pas. Deuxièmement, en donnant un volume zéro aux éléments limites ce qui les rend inactifs.

- Les conditions de Neumann définissent les flux de masse et d'énergie qui traversent les limites. En général, les flux aux limites sont représentés par des sources de pompage ou d'injection. Pour définir des limites imperméables, il suffit de spécifier aucune connexion avec les éléments limites.

2.7 CAPTAGE DES BIOGAZ

Le captage des biogaz est la solution la plus appropriée pour contrôler leurs émissions dans l'atmosphère, le sol adjacent et la nappe d'eau souterraine. De plus, les biogaz peuvent représenter une source d'énergie fort appréciable, en raison de la présence du méthane. Cependant, il est souhaitable que d'autres moyens de protection soient ajoutés afin minimiser les risques de pollution. Ainsi, une conception adéquate des sites d'enfouissement et le rôle des membranes imperméables pour prévenir la migration des lixiviats et des biogaz dans le sol sont primordiaux.

Les premières expériences sur le captage des biogaz ont eu lieu vers la fin des années 1970, aux États-Unis. Par la suite, l'Europe et le Canada ont emboîté le pas. Tel que mentionné, il est difficile de connaître les propriétés hydrogéologiques qui caractérisent les déchets enfouis, car elles sont très hétérogènes malgré le contrôle effectué sur les types de matières résiduelles. Cela est d'autant plus vrai pour les anciens sites d'enfouissement dont les mesures pour répertorier les types de déchets étaient rares, sinon inexistantes.

Pour avoir un captage efficace, il faut connaître la nature du sol dans lequel le puits est construit ou la quantité de fluide à pomper. Pour les sites d'enfouissement, ces renseignements sont difficiles à obtenir. C'est donc de manière empirique que les premiers systèmes de récupération ont été conçus. Par la suite, des tests ont été développés afin de mieux connaître le potentiel de production des sites étudiés et le rayon d'influence des puits de captage pour différentes zones du site. Il s'agit, entre autres, des tests de l'EPA discutés plus loin.

2.7.1 Expérience de Lofy

L'expérience de Lofy (1983) est intéressante car elle constitue une des rares études de terrain sur le rayon d'influence des puits de captage des biogaz. Elle a été menée au début des années 1980 sur un site d'enfouissement en Californie, dans une région assez sèche. Les objectifs de cette recherche étaient de :

- Déterminer la limite de la zone d'influence d'un puits de captage;
- Comprendre le phénomène d'entrée d'air par la surface du site (*vacuum breakthrough*) lorsqu'il y a une succion appliquée dans un puits;
- Déterminer l'effet de la longueur de la crépine par rapport à la profondeur du site.

Comme mentionné par Lofy (1983), la croyance était alors que sous des conditions naturelles, la pression à l'intérieur d'un site était toujours positive. Cette croyance était basée sur la supposition que le taux de production des biogaz est plus grand que la vitesse à laquelle ces derniers s'échappent du site. Un équilibre entre ce taux de production et la vitesse d'échappement sera établi après un certain temps. Par conséquent, l'introduction d'un puits de captage, auquel est appliquée une succion, amènerait une zone de pression négative constituant la zone d'influence de ce puits. La zone d'influence serait définie par la limite autour d'un puits de captage à laquelle la pression des gaz est nulle relativement à la pression atmosphérique.

Le système de mesure de cette expérience est composé de trois puits d'extraction à deux niveaux de crépine, chacune mesurant 7,6 m. Les données sont recueillies à partir de 37 puits d'observation à 6 niveaux de prise de mesure, disposés selon la figure 2.10 :

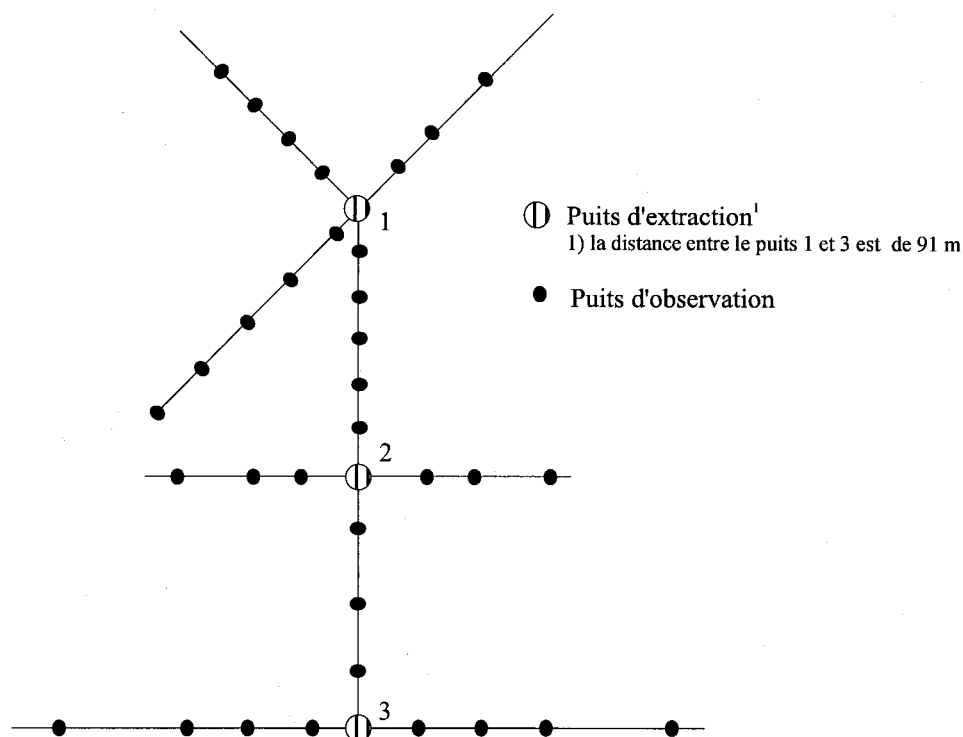


Figure 2.10 : Vue en plan de la configuration des puits de captage et des puits de mesure pour l'expérience de Lofy (Lofy, 1983)

Les mesures effectuées au puits d'observation concernaient surtout la pression dans les déchets. Des mesures de débit, de vitesse à chaque puits et de pression atmosphérique ont aussi été prises.

Ces tests, au nombre de 37, ont été menés sur des périodes de quelques heures à plusieurs jours, et ce, du mois de juin au mois de novembre 1983. Différentes configurations de puits ont été expérimentées durant tous ces tests. Les succions qui ont été imposées dans les puits varient de 1kPa à 3,6 kPa. Le tableau 2.6 décrit quelques un de ces tests:

Tableau 2.6 : Exemple de tests pour évaluer le rayon d'influence (Lofy, 1983)

Test No	Date des essais	Puits	Crépines*	Succion (kPa)	Flux (m ³ /min)	Temps de mesure (h)	Temps du test
1	24 juin	1	2	2.77	6.17	0 :07	1 :21
2	25 juin	3	1	2.09	2.78	0 :52	4 :53
17	6-8 août	1+2+3	2	1.05	7.99	5 :14	57 :51
29	18 septembre	1+2+3	1+2	1.58	20.02	7 :11	13 :03

⁸Crépine 1 située dans le haut du puits
Crépine 2 située dans le bas du puits

Suite ces tests les conclusions suivantes ont été tirées :

- Dans un premier temps, les résultats montrent que sous des conditions statiques, c'est-à-dire sans pompage, il existe des régions dans les déchets où la pression est négative, et d'autres, où elle est positive. Ces zones de pressions variables se déplacent et répondent à des influences externes;
- Lorsqu'une succion est appliquée dans le puits, les zones d'influence changent de forme et couvrent des surfaces différentes. De plus, elles ne sont pas symétriques. Elles dépendent de la pression atmosphérique, de la disponibilité des gaz, du taux de pompage *versus* le taux de production, du mouvement de l'eau vers le puits, du climat, des chemins préférentiels des gaz en mouvement, de l'eau de percolation et autres variables mineures;
- Il semble y avoir une grande différence dans les caractéristiques de la zone d'influence entre chaque puits, même si ces derniers ne sont distants que de 91 m. Ceci est probablement dû à l'hétérogénéité des déchets.
- La valeur minimale de pression négative créée par la succion du puits, à laquelle il était possible de reproduire un contour équipotentiel, était de -250 Pa. Cette valeur était mesurable 20 minutes après le début des tests. Ces contours ont été plus difficile à reproduire pour la partie supérieure du puits. L'explication est que les parties inférieures sont mieux isolées de la surface et des influences externes. Il semble que la migration des gaz vers le puits se fasse selon les couches horizontales, le ratio des axes horizontaux sur les verticales étant de 2 pour 1 à 3,8 pour 1, ce qui donne une forme ellipsoïde à la zone d'influence.
- Les zones d'influence (contours de -250 Pa) de chaque puits ne se sont jamais recoupées. Ceci semble vouloir dire que la distance de 91 mètres centre-centre entre chaque puits est trop élevée.
- La présence de zone de pression négative près des puits d'extraction et de la surface n'est pas une preuve d'entrée d'air due au fonctionnement du puits. En effet, plusieurs zones de pression négative étaient présentes avant le début des

tests près des puits. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ce phénomène notamment le changement de pression atmosphérique.

- Le débit de gaz au puits changeait même si la succion imposée était constante. Ce phénomène étant relié au changement de pression atmosphérique.
- La géométrie du site n'étant pas la même autour des trois puits, les zones d'influences y sont très grandement affectées.
- Le biogaz continue à se diriger vers le puits de captage après que le pômpage à ce dernier soit arrêté. Cela peut durer de quelques minutes à quelques heures.

Nous pouvons donc retenir que le rayon d'influence du puits de captage est affecté par une multitude de phénomènes physiques et qu'il n'est pas constant dans le temps. Des zones de pression négative sont présentes dans les déchets, et ce même s'il n'y a pas de pompage.

2.7.2 Test de l'EPA

L'EPA (1990) a mis au point au début des années 1990 une série de tests de terrain afin de mesurer divers paramètres sur la production et le captage des biogaz dans les sites d'enfouissement où sont conduit ces tests. Ces derniers se font sur de courtes périodes et sont basés sur des équations empiriques.

Le test 2E qui fait partie de cette série décrit les étapes pour déterminer d'une part, la production et l'écoulement des gaz autres que le méthane — (NMOC, *nonmethane organic compounds*) — et d'autre part, le calcul de la constante k qui est le taux de génération de méthane par année pour le site. Ce test se déroule comme suit : un puits de captage est creusé dans une zone du site où l'âge des déchets est semblable, si le site est grand et que l'âge des déchets diffère beaucoup, il faut installer plusieurs puits. Par la suite, des puits d'observations avec capteurs de pression à plusieurs étages sont installés à la périphérie du puits comme le montre la figure 2.11 :

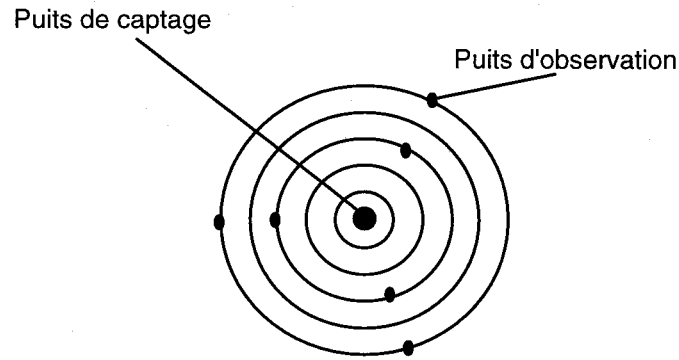


Figure 2.11 : Configuration des puits d'observation autour du puits de captage

Avant le test, la pression atmosphérique est enregistrée ainsi que les pressions dans chaque capteur des puits d'observation. Puis, le pompage est effectué à différents taux et les pressions sont enregistrées dans chaque puits d'observation. De plus, la composition et le volume des biogaz sont mesurés en tête du puits de captage. Par la suite, le rayon d'influence est déterminé par la distance à laquelle les capteurs subissent une baisse de pression par rapport à celle de l'atmosphère. Pour ce test, le rayon d'influence est souvent estimé entre deux capteurs qui se trouvent sur la même ligne dont un — le plus éloigné — ne subit aucune baisse de pression. Connaissant ce rayon, le volume de déchets sous l'influence du puits (ici, un cylindre dont la hauteur est proportionnelle à celle du puits de captage) est calculé, ce qui peut donner le volume de gaz généré pour un certain volume de déchets.

Ce test est une façon plus au moins précise de mesurer le rayon d'influence d'un puits de captage, car l'objectif premier est de connaître la production de biogaz du site étudié. Ainsi, le rayon d'influence est déterminé entre deux capteurs où le plus éloigné du puits ne subit aucun changement de pression alors que le plus près démontre une baisse par rapport à la pression atmosphérique. Cette façon de faire est discutable car le changement ou non de pression dans les capteurs peuvent provenir de plusieurs phénomènes : le changement de pression atmosphérique ou le déplacement naturel des gaz dans le site.

2.7.3 Conception d'un puits et d'un réseau

Les matériaux utilisés pour la conception d'un puits de captage restent assez conventionnels. La plus grande partie des tuyaux servant à la construction des puits de captage est en polyéthylène haute densité (PEHD) ou en PVC. Dans la plupart des cas, une valve de contrôle est prévue à la tête du puits afin de maîtriser le débit des gaz qui y sont pompés pour avoir une gestion du réseau plus souple. La figure 2.12 montre trois types de puits répandus :

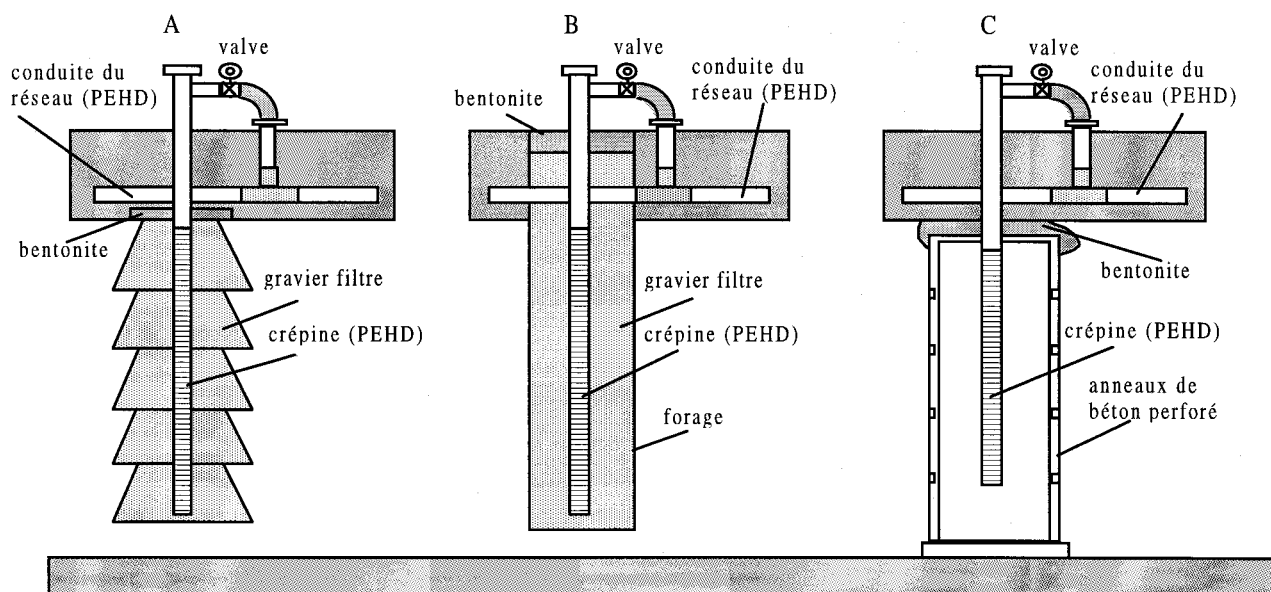


Figure 2.12 : Trois types de puits de captage répandus (Leach 1996)

Le puits A de la figure (2.12) est construit en même temps que l'exploitation du site. La crépine (tuyau perforé) est maintenue en place par du gravier filtre que l'on dispose autour du puits, d'où sa forme pyramidale caractéristique. Par la suite, les déchets sont disposés autour du gravier. Au fur et à mesure que l'épaisseur des déchets augmente, des tuyaux avec gravier filtre sont rajoutés. Ce gravier protège la crépine du puits en plus de permettre un meilleur écoulement des gaz. Avec ce type de puits, il est possible de pomper les biogaz durant les opérations du site.

Le puits C est aussi construit en même temps que l'exploitation du site, excepté que le gravier filtre est remplacé par des anneaux de béton perforé.

Le puits B est un exemple de puits construit à un stade avancé de l'exploitation ou après la fermeture d'un site, il faut donc forer les déchets pour ensuite faire l'installation du puits. Le forage dans les déchets a l'inconvénient d'entraîner des coûts de construction plus élevés. De plus, il peut y avoir une perte de biogaz si la construction des puits se fait longtemps après la fin d'une phase ou après l'exploitation du site.

Les puits de captage peuvent être horizontaux ou verticaux comme la montre la figure 2.13 :

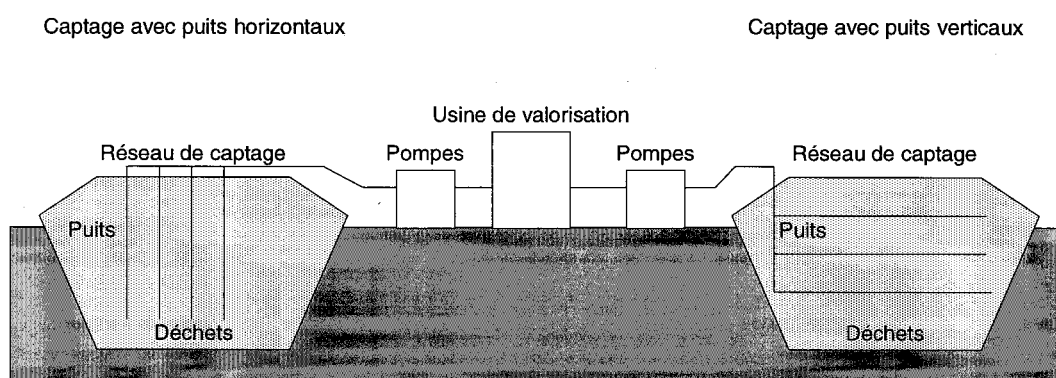


Figure 2.13 : Concepts de puits verticaux et horizontaux

Si la conception de ces deux types de puits est semblable, la différence vient toutefois de leur capacité à résister au tassement. Ainsi, les puits horizontaux auront peut-être plus facilement tendance à se briser avec le tassement différentiel. La construction des puits horizontaux est plus courante.

La conception d'un réseau de captage doit répondre à certains critères environnementaux et économiques :

- il doit être efficace : c'est-à-dire qu'il doit capter le maximum de gaz;
- il doit avoir un coût de construction acceptable;
- il doit avoir un coût d'exploitation minimum, et ce, tant au niveau de l'entretien que du fonctionnement.

Pour les puits horizontaux, le rayon d'influence est souvent établi à 30 m, ce qui détermine le nombre de puits qu'il y a sur un site pour un taux de pompage donné. L'augmentation du taux de pompage des puits est un des moyens d'accroître le rayon d'influence, de limiter le nombre de puits et, par le fait même, de réduire le coût de construction et d'entretien. Cependant, cette solution a l'inconvénient d'engendrer des coûts supplémentaires puisqu'il faut faire fonctionner les pompes à des régimes plus élevés.

De plus, la production des biogaz n'est pas constante dans le temps. Il y a, après un certain nombre d'années, une réduction de la production des biogaz, ce qui peut entraîner une augmentation du rayon d'influence des puits. Ainsi, certains puits pourraient être fermés, les autres prenant la relève. Enfin, la géométrie du site d'enfouissement ou celle du puits peut modifier le rayon d'influence des puits.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU RAYON D'INFLUENCE DES PUIITS DE CAPTAGE DES BIOGAZ DANS LES SITES D'ENFOUISSEMENT SANITAIRES

Ce chapitre présente non seulement les résultats de nos travaux mais également les notions de bases essentielles. Ce contenu est utilisé dans le but de nous servir de ce chapitre pour produire une publication avec le moins de modifications possibles. Cette approche entraîne cependant quelques répétitions par rapport aux chapitres précédents.

3.1 INTRODUCTION

La production des biogaz dans les sites d'enfouissement sanitaire et le danger qu'ils représentent sont des phénomènes assez bien connus et documentés depuis le début des années 1970 (Farquhar et Rovers, 1973 ; EMCON, 1975). Suite à ces études, des systèmes de récupération ont été développés vers la fin de cette décennie afin d'éliminer ou de valoriser les biogaz. L'efficacité de ces systèmes de captage n'est pas facile à évaluer car il est difficile de connaître la production exacte des biogaz dans un site d'enfouissement et, par le fait même, de la comparer aux quantités pompées.

Ainsi, l'un des aspects les plus importants pour concevoir adéquatement un système de captage est de connaître le rayon d'influence de chaque puits. Bien que peu d'études aient été réalisées sur ce sujet, on peut mentionner les travaux effectués au début des années 1980 par Lofy (1983). De plus, l'EPA (1990) a établi la méthode « 2 E » de terrain pour évaluer, d'une part, le volume de gaz extrait par un puits de captage et, d'autre part, le rayon d'influence de manière indirecte. Cependant, ces deux études ne portent que sur un seul type de site et de puits pour un temps de décomposition donné. Il

serait donc intéressant d'établir le rayon d'influence pour plusieurs géométries de site et de puits selon l'âge des déchets ou leur taux de production de biogaz. Ceci nous permettrait d'élaborer un guide pour la conception des systèmes de captage tenant compte des spécifications de chaque site.

Pour arriver à cette généralisation, l'outil le mieux adapté est la modélisation numérique. En particulier, le logiciel TOUGH2-LGM est approprié pour effectuer ce genre d'étude. Il a été développé par Nastev (1998) dans le but d'étudier la production et la migration des biogaz dans les sites d'enfouissement et dans les sols adjacents. Ce logiciel a été conçu pour représenter la production et la migration de quatre composés dans la phase gazeuse — le méthane (CH_4), le dioxyde de carbone (CO_2), l'air (N_2) et la vapeur d'eau (H_2O) ainsi que celle de la chaleur. De plus, TOUGH2-LGM permet de représenter numériquement les puits de captage et simuler leur taux de pompage et d'observer les fractions de masse de chaque composé gazeux.

3.2 DÉCHETS ET PUIITS

Il est essentiel de décrire la composition des déchets et les propriétés hydrogéologiques qui caractérisent un site d'enfouissement car elles ont une incidence sur la production et la migration des biogaz. Au Québec, les sites d'enfouissement sont composés en grande majorité de déchets industriels, commerciaux et institutionnels — 65% — et de déchets domestiques — 35% — (MEF, 1998).

3.2.1 Composition des déchets

La composition des déchets dans les sites d'enfouissement sanitaire est assez semblable en Amérique du Nord mais diffère grandement au niveau de la planète. À titre d'exemple, le tableau 3.1 décrit les différentes matières qui sont caractéristiques des déchets que l'on trouve au Québec :

Tableau 3.1 : Matières composant les déchets au Québec (MEF, 1998)

Matière	Domestique (%)	ICI [*] (%)
Papier/carton	33.1	30.5
Verre	8.1	1.3
Plastique	6.9	5.6
Métaux	5.9	37.4
Bois	2.1	7
Matières organiques (putrescibles)	30.6	6.5
Pneus	*	2.8
Autres	13.3	8.9

*ICI : Industriel, commercial et institutionnel

À la lumière de ces données, il est possible de diviser les matières résiduelles qui parviennent dans les sites d'enfouissement en trois catégories :

- les déchets très biodégradables qui auront un temps de dégradation assez court comme les matières putrescibles (nourriture de table, produits du jardin, etc.);
- les déchets moyennement biodégradables qui auront un temps de décomposition plus long (papier, carton, etc.);
- les déchets peu ou pas biodégradables (matériaux secs, etc.).

Les proportions de ces trois catégories de déchets ont une incidence sur la durée de la biodégradation dans les sites d'enfouissement. Par voie de conséquence, elles influencent aussi le taux de production de biogaz. Les sites d'enfouissement sanitaire peuvent contenir les trois catégories de déchets en un pourcentage variable. Il faut donc étudier chaque site individuellement pour connaître son taux de production.

3.2.2 Les biogaz

Les biogaz sont composés en grande majorité de méthane (50% à 60%) et de dioxyde de carbone (40% à 50%) (Farquhar et Rovers 1973). Le méthane est le composé

qui pose le problème le plus grave. En effet, un mélange de 5 à 15% de méthane dans l'air devient explosif, d'où l'importance d'éviter la migration de biogaz à l'extérieur des sites pour prévenir tout contact avec l'air. De plus, le méthane est un des gaz contribuant à l'effet de serre au même titre que le dioxyde de carbone. Ce dernier, à l'inverse du méthane, est plus lourd que l'air et est facilement soluble dans l'eau. Il a donc tendance à se retrouver au fond des sites et à diminuer le pH de l'eau.

D'autres composés sont aussi présents dans le biogaz. Bien qu'en quantités très faibles, ils restent indésirables à cause de leurs effets secondaires. Il y a, entre autres, le dioxyde de soufre qui est responsable des mauvaises odeurs, ainsi que le chlorure de vinyle et le benzène qui sont très nocifs pour la santé humaine (Petersen, 1988).

3.2.3 Taux de production des biogaz

Le taux de production des biogaz est variable dans le temps et est directement lié à la composition et à l'âge des déchets enfouis dans un site. Il est difficile de connaître la quantité de biogaz produite pour un site en raison de la surface qu'il couvre. Il n'est donc pas faisable de capter toute la production de biogaz, car elle s'étend sur plusieurs dizaines d'années. Pour palier à ces problèmes, des modèles mathématiques décrivant les processus de biodégradation ont été développés.

Plus particulièrement, le modèle de production utilisé par Nastev (1998) lors de l'élaboration du logiciel TOUGH2-LGM est basé sur l'équation cinétique générale de Monod qui schématise le processus de biodégradation.

Cette équation (3.1) permet d'établir le taux d'utilisation du substrat (matière organique) en fonction de la concentration des micro-organismes dans le site et en fonction de la concentration du substrat dissout entourant les micro-organismes (EMCON, 1982) :

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{xKC}{K_c + C} \quad (3.1)$$

Pour un C très petit, cette équation peut être réduite à une réaction du premier ordre :

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{KC}{K_c} x \quad C \ll K_c \quad (3.2)$$

Après quelques manipulations mathématiques simples, il est possible d'obtenir le taux de production Ω qui se définit comme suit :

$$\Omega = \vartheta \zeta_o e^{-\vartheta t} \quad (3.3)$$

La production cumulative ζ_c est aussi décrite. Elle est la différence entre le potentiel initial de production et le potentiel de production :

$$\zeta_c = \zeta_o (1 - e^{-\vartheta t}) \quad (3.4)$$

Ces équations sont un moyen simple, mais efficace, de représenter le phénomène global de production du biogaz.

3.2.4 Déchets en milieu saturé

Des études (Huges et al., 1971; Findikakis et Leckie, 1979; Schroeder et al., 1983, et 1994; Blais, 1996) montrent qu'il est possible de déterminer certaines caractéristiques hydrogéologiques des déchets en milieu saturé. Le tableau 3.2 donne certaines valeurs recueillies par ces auteurs :

Tableau 3.2 : Propriétés hydrogéologiques des déchets en milieu saturé

Auteur	Année	Propriétés hydrologiques			
		Capacité au champ (cm ³ /cm ³)	Porosité de drainage (cm ³ /cm ³)	Porosité (cm ³ /cm ³)	Conductivité Hydraulique (m/d)
Huges	1971	0.33~0.39	-	-	0.6~6.4
Findikakis	1979	-	-	0.5	0.86
Schroeder	1983	0.32	0.2	0.52	0.172
	1988	0.294	0.23	0.52	0.172
	1994	0.292	0.38	0.671	0.86
Blais	1996				5.184

Ces données nous indiquent qu'il y a une variation importante entre les propriétés hydrogéologiques de chaque sites d'enfouissement.

3.2.5 Déchets en milieu non saturé

La détermination des propriétés hydrogéologiques régissant l'écoulement non saturé des sols s'effectue surtout en laboratoire. Cependant, il existe des méthodes de terrain pour les définir mais aucune n'est vraiment adaptée aux déchets (Nastev, 1998). Ayant très peu de données disponibles sur ce sujet dans la littérature, il faut donc, par défaut, associer les matières résiduelles à des types de sols dont les propriétés sont déjà connues. Les données hydrogéologiques en milieu saturé peuvent alors être utilisées afin de trouver un sol qui présente des caractéristiques semblables. Par la suite, les paramètres capillaires de modèles tel que celui de van Genuchten (1980) décrivant les propriétés de ce sol en milieu non saturé, sont alors identifiés. Le tableau 3.3 nous donne les valeurs hydrogéologiques et les paramètres de van Genuchten utilisés par Nastev (1998). Ils correspondent à un sable silteux.

Tableau 3.3 : Paramètres hydrogéologiques des déchets au CESM (tirés de Nastev, 1998)

Porosité n		0,5
Saturation maximale (S_m)		1,0
Saturation résiduelle (S_r)		0,03
Paramètres de van Genuchten	m	0,11
	n	1,12
	α (Pa^{-1})	5,0
Pression d'entrée d'air P_b (Pa)		2076
Conductivité hydraulique K_l (m/s)		6×10^{-5}
Perméabilité horizontale k_h (m^2)		6×10^{-12}
Perméabilité verticale k_v (m^2)		1×10^{-12}

3.2.6 Les puits de captage

Un des moyen économiquement rentable pour capter les biogaz est l'installation de puits de captage dans les déchets. Plusieurs types de puits peuvent être installés, et ce, à des temps différents. Les premières tentatives de captage ont eu lieu aux États-Unis vers la fin des années 1970. Par la suite, le Canada et l'Europe ont emboîté le pas. Dans la

grande majorité des cas, les puits sont conçus en PEHD (Polyéthylène Haute Densité) (Leach, 1996). Cependant, la conception du puits peut changer s'il est construit durant l'exploitation du site ou après sa fermeture.

3.2.7 Mesure du rayon d'influence

Comme le dit Lofy (1983) : « le design de réseaux de captage relève plus de l'art que de la science ». Les premiers réseaux de captage sont construits selon l'expérience que pouvait avoir l'ingénieur responsable de l'enfouissement. En grande majorité, les concepteurs de réseau estimaient par expérience le rayon d'influence à 30 m.

Au début des années 1980, Lofy (1983) a conduit une série de tests sur le rayon d'influence des puits de captage. Trois puits de captage à deux niveaux de crépine, chacune mesurant 7,6 m de longueur, ont été utilisés. Les données étaient recueillies à partir de 37 puits d'observation à 5 niveaux de mesure (capteur de pression) disposés selon un schéma précis autour des trois puits de pompage. Les résultats de cette expérience apportent les conclusions suivantes :

- Dans un premier temps, les résultats montrent que sous des conditions statiques, c'est-à-dire sans pompage, il existe des régions dans les déchets où la pression est négative, et d'autres, où elle est positive. Ces zones de pressions variables se déplacent et répondent à des influences externes;
- Lorsqu'une succion est appliquée dans le puits, les zones d'influence changent de forme et couvrent des surfaces différentes. De plus, elles ne sont pas symétriques. Elles dépendent de la pression atmosphérique, de la disponibilité des gaz, du taux de pompage *versus* le taux de production, du mouvement de l'eau vers le puits, du climat, des chemins préférentiels des gaz en mouvement, de l'eau de percolation et autres variables mineures;
- Il semble y avoir une grande différence dans les caractéristiques de la zone d'influence entre chaque puits, même si ces derniers ne sont distants que de 91 m. Ceci est probablement dû à l'hétérogénéité des déchets.

- La valeur minimale de pression négative créée par la succion du puits, à laquelle il était possible de reproduire un contour équipotentiel, était de -250 Pa. Cette valeur était mesurable 20 minutes après le début des tests. Ces contours ont été plus difficile à reproduire pour la partie supérieure du puits. L'explication est que les parties inférieures sont mieux isolées de la surface et des influences externes. Il semble que la migration des gaz vers le puits se fasse selon les couches horizontales, le ratio des axes horizontaux sur les verticales étant de 2 pour 1 à 3,8 pour 1, ce qui donne une forme ellipsoïde à la zone d'influence.
- Les zones d'influence (contours de -250 Pa) de chaque puits ne se sont jamais recoupées. Ceci semble vouloir dire que la distance de 91 mètres centre-centre entre chaque puits est trop élevée.
- La présence de zone de pression négative près des puits d'extraction et de la surface n'est pas une preuve d'entrée d'air due au fonctionnement du puits. En effet, plusieurs zones de pression négative étaient présentes avant le début des tests près des puits. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ce phénomène notamment le changement de pression atmosphérique.
- Le débit de gaz au puits changeait même si la succion imposée était constante. Ce phénomène étant relié au changement de pression atmosphérique.
- La géométrie du site n'étant pas la même autour des trois puits, les zones d'influences y sont très grandement affectées.
- Le biogaz continue à se diriger vers le puits de captage après que le pompage à ce dernier soit arrêté. Cela peut durer de quelques minutes à quelques heures.

L'EPA a mis à point au début des années 1990, une série de tests de terrain afin de mesurer divers paramètres sur la production et le captage des biogaz dans les sites d'enfouissement (EPA, 1990). Ces tests se font sur de courtes périodes et sont basés sur plusieurs équations empiriques. Le test 2E, qui fait partie de cette série, décrit les

diverses étapes et procédures à suivre pour déterminer la production et l'écoulement des gaz autre que le méthane — *nonmethane organic compounds* (NMOC).

Ce test permet aussi d'établir la constante k qui est le taux de génération de méthane par année. Pour déterminer cette production, un puits de captage est installé dans les déchets à un endroit où leur âge est connu. Des puits d'observation, munis de capteurs de pression sur plusieurs étages, sont positionnés autour de lui. Leur configuration suit des cercles de rayons différents. Le volume de déchets affecté par le puits de captage est mesuré à l'aide des puits d'observation. Par la suite, le volume de biogaz récupéré étant connu, il est possible de calculer le taux de production selon l'âge des déchets.

Même si le calcul du rayon d'influence n'est pas l'objectif principal de ce test, il n'en demeure pas moins qu'il est une donnée primordiale pour le calcul du volume de déchets affecté par le puits de captage. Ce rayon est souvent positionné de façon arbitraire entre deux puits d'observation dont les capteurs indiquent des pressions de signes opposés. Enfin, ce test est conduit sur une courte période : il indique la production à un moment précis de la vie du site. Cette production est donc différente quelques années plus tard.

Dans les conceptions classiques de réseau de captage, le rayon d'influence est souvent estimé à 30 m et le nombre de puits est calculé pour répondre à la production de biogaz lorsqu'elle est à son maximum. Toutefois, comme la littérature le mentionne (Lofy, 1983; McBean, 1993), les rayons d'influence mesurés lors de certains tests sont beaucoup plus grands ou plus petits que 30 m.

Pour concevoir un réseau de captage, il faut pouvoir déterminer le rayon d'influence des puits. Pour ce faire, un certain nombre d'éléments doit être réuni dont les propriétés hydrogéologiques des déchets, la production de biogaz, le taux de pompage dans les puits, la géométrie de ces derniers et celle du site. Pour considérer scientifiquement la combinaison de tous ces éléments, la modélisation numérique se présente comme la meilleure méthode car elle intègre simultanément tous ces facteurs.

3.3 TOUGH2-LGM ET LE MODÈLE NUMÉRIQUE

TOUGH2-LGM est l'un des outils les mieux adaptés pour modéliser le rayon d'influence d'un puits de captage dans les déchets. Voici une brève description des équations d'écoulement contenues dans ce modèle (Nastev, 1998).

3.3.1 Équation d'écoulement

L'écoulement des biogaz dans les déchets est multiphase. Ces phases sont :

- 1) la phase solide qui est composée par les déchets,
- 2) la phase liquide qui est formée en majeure partie par l'eau (lixiviât),
- 3) la phase gazeuse qui est constituée d'un mélange de gaz (CH₄, CO₂, H₂O sous forme de vapeur et N₂).

L'écoulement en milieu non saturé (avec plusieurs phases) est un phénomène complexe. Il est régi par deux paramètres : la pression capillaire et la perméabilité relative d'un fluide par rapport aux autres. L'équation (3.5) dérivée par van Genuchten (1980) décrit la saturation effective en fonction de la pression capillaire :

$$S_e = \left[1 + (\alpha \Psi)^n \right]^{-m} \quad (3.5)$$

L'équation suivante qui a été élaborée par van Genuchten (1980) d'après les travaux de Mualem (1976) traduit la relation entre la perméabilité relative et la saturation effective :

$$k_{rl} = \sqrt{S_e} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (3.6)$$

Comme mentionné plus haut, les paramètres α (pour l'équation 3.6), m et n sont des paramètres d'ajustement qui dépendent des sols étudiés.

Les déchets forment un milieu poreux où l'écoulement des fluides est régi par la loi de Darcy. Les principaux mouvements sont l'advection et la diffusion représentées pour un milieu à deux phases par l'équation :

$$F_j = F_g^{jA} + F_g^{jD} + F_l^{jA} \quad (3.7)$$

L'advection est décrite par :

$$q_i = k \frac{k_{ir}}{\mu_i} (\nabla P_i + \rho_i g) \quad (3.8)$$

et :

$$F_i^{jA} = q_i w_i^j \rho_i \quad (3.9)$$

Le gradient de pression est responsable de ce déplacement mais il faut tenir compte du milieu dans lequel il s'effectue. L'équation (3.8) s'applique pour chaque phase qui est représentée par la lettre i . Le coefficient de diffusion d'un mélange de composés gazeux peut être calculé de la façon suivante :

$$D_o^j = \frac{(1 - x_g^j)}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^4 \frac{x_g^k}{D_o^{jk}}} \quad (3.10)$$

Cette équation traduit la diffusion d'un composé j à partir d'un mélange de composé j et k , et des fractions molaires de chaque composé. Enfin, la diffusion de chaque composé s'exprime par la loi de Fick comme tel que :

$$F_G^{jD} = -\tau D_o^j \rho_g \nabla w_g^j \quad (3.11)$$

Le transfert de chaleur résulte de la conduction du milieu ainsi que du transport de masse. Ce transfert est la somme de 4 paramètres définis comme suit :

$$F_h = -\lambda_0 \nabla T + h_l^w F_l^A + h_g F_g^A + h_g F_g^D \quad (3.12)$$

où le premier paramètre représente la loi de Fourier sur la conduction de la chaleur. Les deux paramètres suivants traduisent le transport advectif de la chaleur dans la phase liquide et gazeuse; et enfin, le dernier représente le transport de la chaleur rattachée à la diffusion de la phase gazeuse.

3.3.2 Condition de production

La production des biogaz est une fonction décroissante dans le temps. Une telle fonction de production a été intégrée dans le logiciel TOUGH2-LGM (Nastev, 1998), soit :

$$\Omega = \zeta_0 \sum w_i \vartheta_i e^{-\vartheta_i t} \quad (3.13)$$

Cette équation permet de modéliser la production des biogaz dans les déchets. La figure 3.1 la représente :

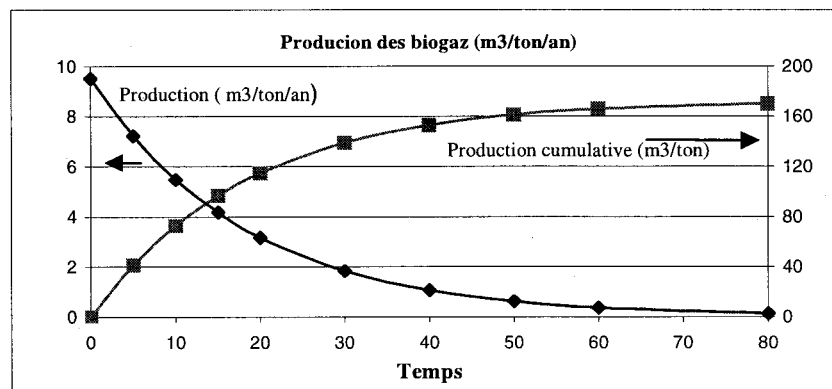


Figure 3.1 : Taux de production des biogaz dans les déchets pour le CESM (d'après Nastev, 1998)

Ce graphique nous montre que la production des biogaz décroît rapidement et que les premières années sont les plus productives. Pour déterminer le coefficient ϑ de l'équation 3.13, une courbe a été calculée à partir de données de pompage recueillies au CESM.

3.3.3 Numérisation des équations d'écoulement

La numérisation des équations d'écoulement et de transfert de chaleur se fait par la méthode des différences finies intégrales dans TOUGH2-LGM. Ainsi, l'équation de continuité :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} \Lambda^j dV = \int_{\Gamma_n} F^j \cdot n d\Gamma + \int_{V_n} \Omega^j dV \quad (3.14)$$

sera transformée par les différentes étapes en l'équation des résiduels qui suit :

$$R^{j,t+\Delta t} \equiv \Lambda_n^{j,t+\Delta t} - \Lambda_n^{j,t} - \frac{\Delta t}{V_n} \left\{ \sum_m A_{nm} F_{nm}^{j,t+\Delta t} + V_n \Omega_n^{j,t+\Delta t} \right\} = 0 \quad (3.15)$$

Cette équation contenant tous les termes d'accumulation de flux et de sources représente un système de $5*N$ équations : $4*N$ équations pour la conservation de la masse (eau, air, méthane et dioxyde de carbone) et $1*N$ équations de conservation d'énergie. De plus, il y a $5*N$ inconnues qui proviennent des cinq variables thermodynamiques (pression, fraction de masse d'air, fraction du méthane dans l'air, fraction du dioxyde de carbone dans l'air et température) qui sont indispensables pour décrire le système. Ici, N est le nombre d'éléments n que le modèle comporte.

3.3.4 Modèle numérique

Le modèle numérique élaboré pour cette étude a été utilisé pour modéliser une situation conceptuelle (figure 3.2). Cette simulation repose sur des paramètres représentatifs du site CESM à Montréal (Nastev, 1998) et de paramètres définis pour les besoins de la simulation. Le site du CESM est caractéristique des sites exploités durant les années 1970 et 1980. Il est situé en milieu urbain et contient environ 300 puits de captage. Ce site est décrit en détail par Nastev (1998).

Le volume des déchets affectés par le puits de captage est formé de plusieurs cylindres de rayons variables. Pour les calculs numériques, il est possible de transposer cette forme en utilisant un modèle 2D radial. Il s'agit de couper les cylindres et de les ouvrir ce qui donne un modèle en forme de pointe de tarte. Dans TOUGH2-LGM, le

maillage est construit en définissant des volumes qui sont petits près du puits et qui grossissent plus l'on s'en éloigne selon la méthode des différences finies. Chaque volume possède une coordonnée et est relié à deux autres volumes par une connexion verticale et une connexion horizontale. Les rayons sont mesurés à partir du centre des éléments du puits jusqu'au centre des volumes correspondants.

Les modèles (figure 3.2) qui ont servi pour les différentes modélisations comportent les caractéristiques suivantes :

Tableau 3.4 : Caractéristiques des modèles utilisés

Rayon du modèle	Épaisseur des déchets compactés
$a = 10$ m	$z = 10$ m
$b = 20$ m	$z = 20$ m
$c = 30$ m	$z = 30$ m
$d = 40$ m	$z = 40$ m
$e = 50$ m	$z = 50$ m
$f = 65$ m	
$g = 80$ m	
$h = 95$ m	
$i = 110$ m	
r maximum = 160 m	

Les rayons a à i des modèles ont été obtenus en gardant les éléments qui correspondaient à la grandeur voulue. À l'aide de plusieurs simulations effectuées avec ces différents rayons et des sorties graphiques, il a été possible d'établir le rayon maximum ($r = 160$ m) où le puits de captage n'a aucun effet sur la limite opposée. Les épaisseurs des déchets compactés ont été introduites dans le modèle par un facteur multiplicatif à partir du modèle de base élaboré avec une épaisseur de 20 m.

Le maillage a été construit comme suit : l'espacement entre les premiers rayons des éléments augmente d'un mètre jusqu'à la distance de 10 m. Par la suite, l'espacement est de 10 m pour les distances comprises entre 10 m et 50 m, de 15 m pour les distances de 50 m à 110 m, et enfin, de 20 m et 30 m pour les deux derniers espacements.

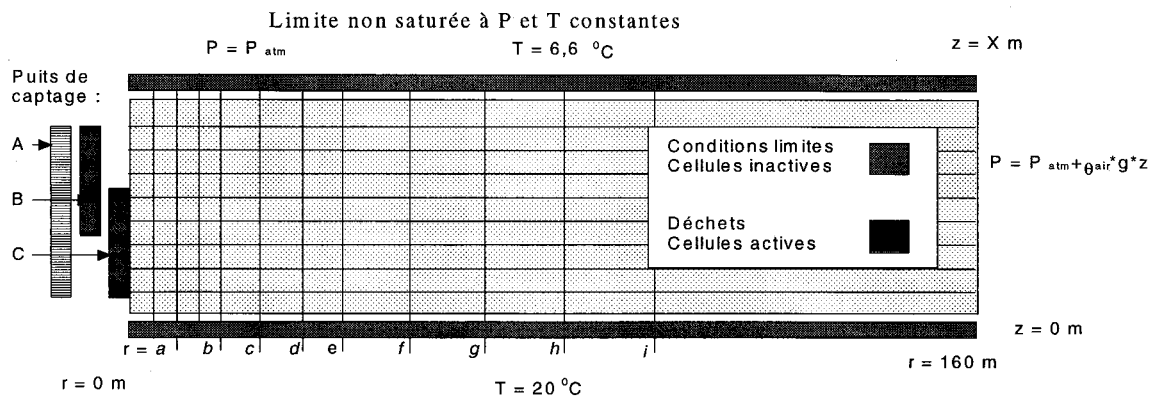


Figure 3.2 : Modèle conceptuel utilisé

Trois configurations de puits de captage — A, B et C — ont été testées dans cette étude (figure 3.3). La première configuration (A) de puits comprend une crépine dont la hauteur correspond à $\frac{4}{5}$ ^e de celle du site. Elle est disposée au milieu de ce dernier. Les deuxième (B) et troisième (C) configurations comportent une crépine dont la hauteur correspond à la moitié de l'épaisseur du site. Pour la configuration (B), la crépine est installée en haut du puits, alors que pour la configuration (C), la crépine est installée en bas. De plus, trois rayons du puits comprenant le gravier filtre ont été simulés, soit un de 1,5 m, 1,0 m et 0,5 m. Ces configurations ont été testées afin de déterminer la plus efficace d'entre elles.

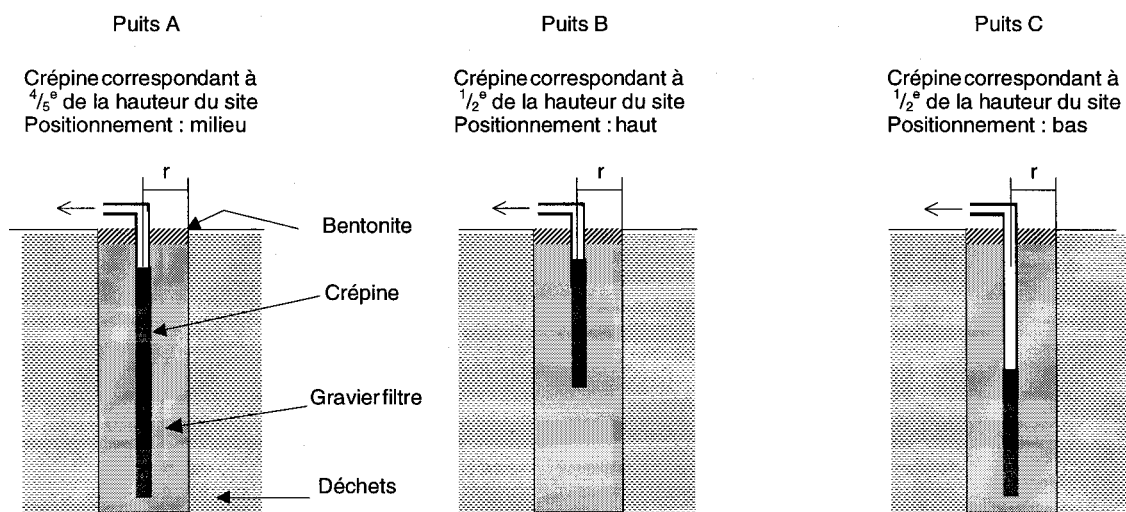


Figure 3.3 : Configuration des trois puits testés

Le modèle de 160 m de rayon est composé de 164 éléments dont 138 sont actifs. Le nombre de connexions entre les éléments est de 271. Les conditions initiales dans les

éléments ont été déterminées à partir du modèle 1D qui représente une colonne de déchets haute de 20, 30, 40 et 50 m. Ce modèle est composé de 10 éléments de 2, 3, 4 et 5 m d'épaisseur avec puits d'injection dans l'élément supérieur. Ainsi, pour une période définie, la pression, la saturation à l'équilibre de chaque élément et la température ont été établies sur chacune des épaisseurs. Par la suite, ces données ont été entrées comme conditions initiales dans le modèle 2D radial.

Les conditions aux limites sont indiquées à la figure 3.2. La température pour les éléments limites supérieurs correspond à la température moyenne annuelle au Québec (6°C). L'infiltration est simulée par 13 sources d'injection dans les éléments limites supérieurs. Elle reprend les mêmes paramètres que celle de l'île de Montréal, soit de 400 mm étalés uniformément sur une année. Dans TOUGH2-LGM, l'infiltration est contrôlée par la saturation en eau dans le milieu S_w . Cette limite supérieure est perméable aux biogaz car la pose d'une couverture imperméable aux gaz — lorsqu'il y en a une — se fait habituellement à la fermeture du site, soit quelques dizaines d'années après le début de son exploitation. La limite inférieure est imperméable au gaz et représente la surface piézométrique ou de drainage. Il est considéré que la température y est de 20°C lorsque la simulation commence. La conduction de la chaleur par la base a été ajustée pour correspondre à une augmentation de la chaleur de quelques degrés au fond du site lorsque la température globale du site atteint son maximum. Ces conditions représentent approximativement la perte de chaleur par conduction à la base.

3.4 RÉSULTATS

Les résultats de la modélisation se divisent en quatre temps (tableau 3.5) : la première étape permet d'établir la configuration de puits la plus efficace ; la deuxième présente la méthodologie utilisée pour définir le rayon d'influence. La troisième étape vise à déterminer le rayon d'influence selon le taux de production de biogaz pour différentes succions imposées. Enfin, la dernière étape permet de connaître la qualité des biogaz pompés.

Tableau 3.5 : Déroulement de l'étude de modélisation

Étape	Démarche
1	Détermination de la configuration du puits la plus efficace
2	Évaluation du rayon d'influence
3	Détermination du rayon d'influence en fonction du taux de production
4	Mesure de la qualité des biogaz pompés

3.4.1 Détermination de la configuration du puits la plus efficace

La première étape de l'étude vise à comparer les puits A, B et C afin de retenir le plus performant. Les paramètres de comparaison sont le taux de récupération du puits selon différents rayons du modèle pour un taux de production arrêté à 5 ans, soit 6,77 (m³/tonne/an).

Les trois simulations ont été effectuées pour différent rayon de modèle variant de 10 m à 160 m comme mentionné au tableau (3.4) pour une épaisseur de 20 m. Le temps de simulation est de 5 ans pour une succion de 3 kPa dans le puits. La taille du rayon de puits (gravier filtre et crépine) est considérée comme négligeable dans cette étude car, d'après les tests préalables effectués, elle n'a aucun impact majeur sur le rayon d'influence.

La figure 3.4, de la page suivante, montre les résultats obtenus. On peut remarquer qu'il existe des différences notables entre les performances des trois puits pour les rayons de modèle compris entre 20 à 60 m mais que ces distinctions s'estompent avec la distance. De plus, les performances des configurations B et C sont presque semblables.

Ceci étant dit, on constate que le puits A est le plus efficace des trois. En effet, il permet de capter la plus grande quantité de biogaz entre 20 et 100 m. Le puits B arrive deuxième pour ses performances alors que le puits C est le moins efficace. Ce puits a le désavantage de laisser sortir trop de biogaz par le haut du site, et ce, même pour des succions très fortes

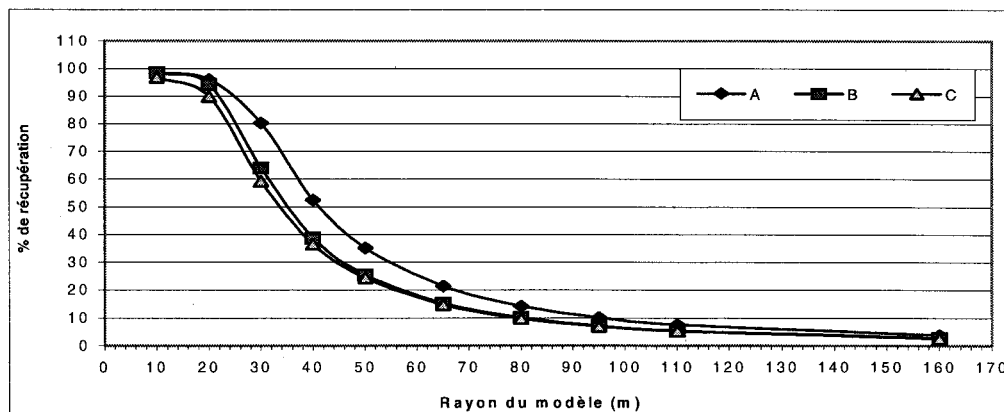
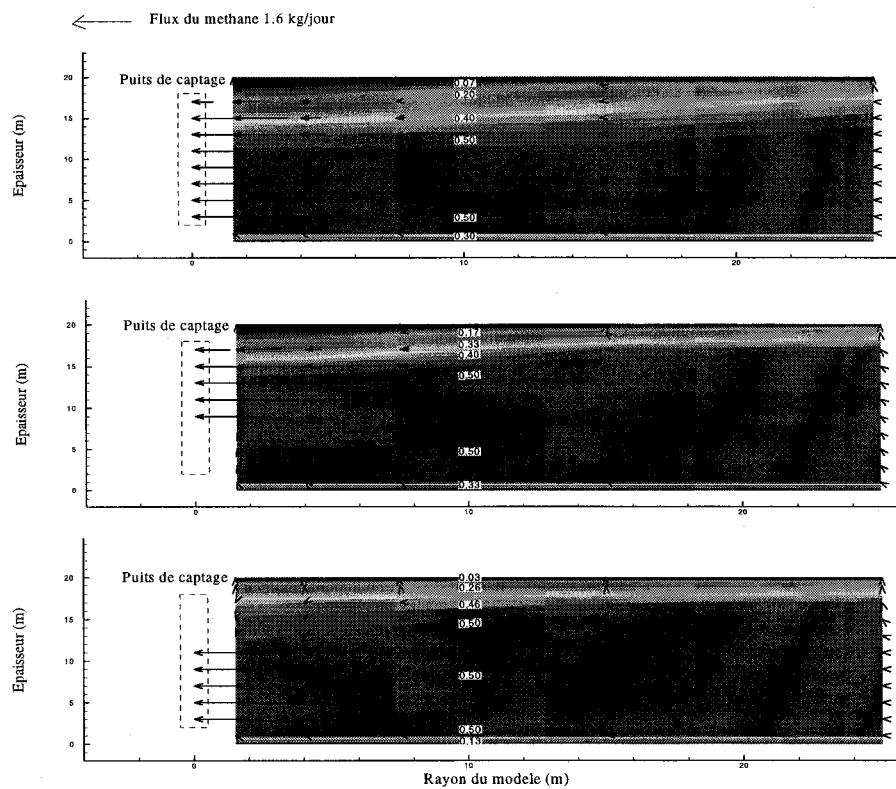


Figure 3.4 : Comparaison entre les configuration de puits A, B et C étudiés à 5 ans pour une succion de 3 kPa

La figure 3.5 illustre la fraction molaire du méthane et le flux des gaz pour les trois configuration de puits. Elle permet de visualiser l'effet des différentes configurations de puits.



Note : la dimension des têtes de flèches n'est pas proportionnelle aux flux de méthane

Figure 3.5 : Visualisation de la fraction molaire de méthane (contours) et des flux des (vecteurs) gaz pour trois configurations de puits A, B et C (succion 3 kPa et 20 m d'épaisseur de déchets)

La fraction molaire, représenté à la figure 3.5, est identifiée par les étiquettes et le dégradé de gris du schéma, alors que le flux est représenté par des flèches de longueurs différentes. Ainsi, plus le flux est important, plus la flèche sera longue. Remarquons que près des puits de captage, le flux des gaz est important, alors qu'à la limite opposée, il est très faible. Ces trois graphiques corroborent les observations faites à partir de la figure 3.4. En effet, le puits A est le plus performant car la fraction molaire du méthane y est moins élevée, ce qui indique un plus grand captage de méthane. De plus, l'orientation des flèches montre que le rayon d'influence de ce puits est plus grand que pour les deux autres configurations de puits.

À la suite de ces résultats, le puits A apparaît le plus efficace. C'est pourquoi cette configuration a été retenue pour la conduite des autres modélisations de l'étude.

3.4.2 Méthodologie utilisée pour l'évaluation du rayon d'influence

La deuxième étape vise à présenter la méthodologie retenue pour calculer le taux de récupération du méthane selon le rayon du modèle. Ce calcul permet de déterminer le rayon d'influence pour les différentes succions exercées dans le puits. Les paramètres de comparaison sont le taux de récupération du puits et le rayon du modèle pour un taux de production arrêtée à 5 ans, soit $6,77 \text{ (m}^3\text{/tonne/an)}$.

Les trois simulations avec des succions de productions distinctes ont été effectuées avec des modèles de rayon de 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 65 m, 80 m, 95 m, 110 m et 160 m, ainsi qu'une épaisseur de 20 m. Ces modèles représentent, pour la configuration d'un réseau de captage, le demi-espacement entre deux puits. Ainsi, pour un rayon de modèle de 10 m, les puits sont espacés de 20 m; alors que, pour un rayon de 30 m, ils le sont de 60 m. Le temps de simulation est de 5 ans pour une succion de 1,5, 3 et 4,5 kPa appliquées au puits.

Le taux de récupération retenu pour déterminer le rayon d'influence est de 90 % car il semble raisonnable de supposer que les puits de récupération devraient avoir une efficacité de cet ordre. Ce taux est déterminé par une division, soit : la masse de méthane

passant dans le puits de récupération pour un temps donné divisée par la masse de méthane produite dans le modèle pour le même temps.

La figure (3.6) démontre que le rayon d'influence est proportionnel à la succion exercée au puits de captage des biogaz. En effet, plus la succion dans le puits de captage est importante, plus le rayon d'influence est grand. Ainsi, pour la succion de 1,5 kPa dans le puits de captage, le rayon d'influence ne dépasse pas les 12 m alors que pour la succion de 3 kPa il monte à 24 m; enfin pour 4,5 kPa, le rayon d'influence est d'environ 33 m.

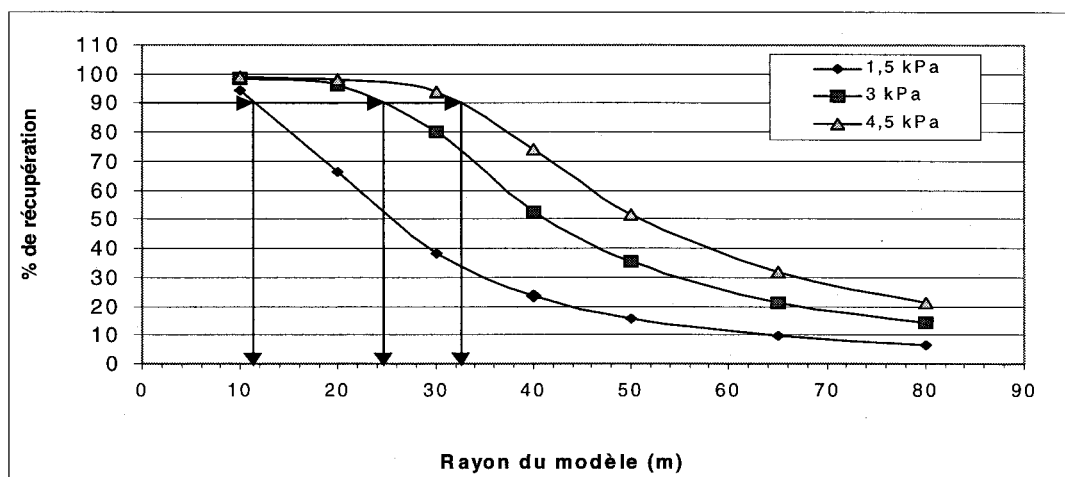
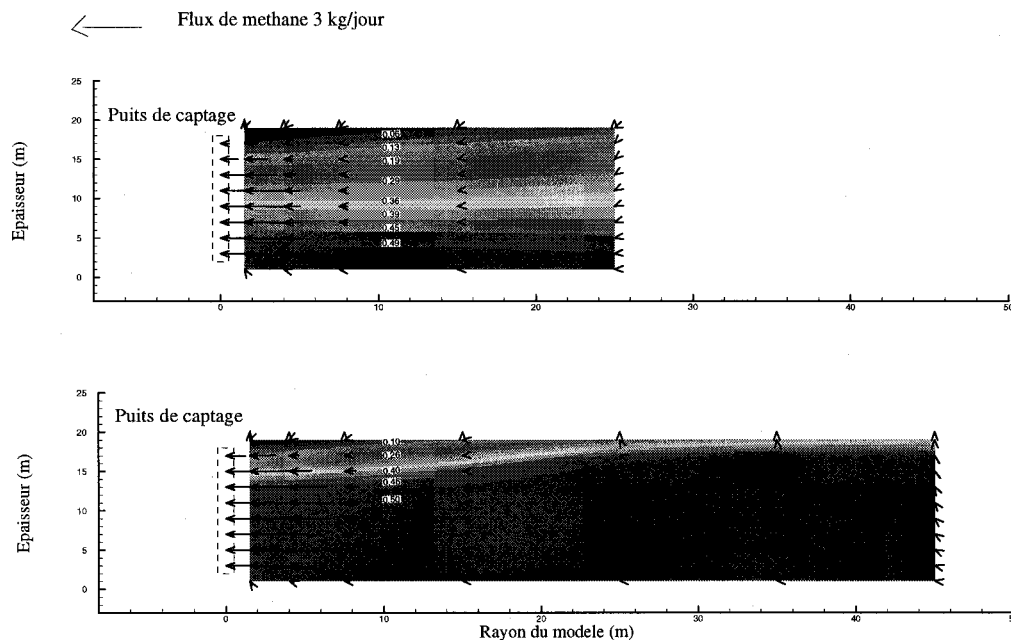


Figure 3.6 : Taux de récupération en fonction du rayon du modèle (demi espaceur entre les puits) pour trois succions. Méthode de définition du rayon d'influence d'un puits selon l'épaisseur des déchets et de la succion imposée.

De plus, pour les succions de 3 et 4,5 kPa, le taux de récupération est sensiblement le même uniquement pour les 15 premiers mètres, après quoi cette similitude n'existe plus. L'influence de ces succions est beaucoup plus importante que celle de 1,5 kPa. Enfin, l'écart entre l'impact des trois succions est le plus grand pour les rayons de 20 m et plus.

La figure (3.7) permet de mieux apprécier les résultats présentés dans le graphique précédent. On y montre les conditions pour un site de 20 m d'épaisseur pour une succion de 4,5 kPa mais avec des rayons différents (30 et 50 m). Visuellement, on peut constater que la fraction de méthane apparaissant sur les étiquettes est moins élevée pour le modèle avec un rayon de 30 m par opposition à celui dont le rayon fait 50 m. Par conséquent, le pourcentage de méthane pompé est plus grand avec le premier modèle. Enfin, cette figure

confirme que le mouvement des flux de gaz est plus unidirectionnel avec un rayon de 30 m qu'avec un rayon de 50 m.



Note : la dimension des têtes de flèches n'est pas proportionnelle aux flux de méthane

Figure 3.7 : Visualisation à 5 ans des fractions de méthane et des flux de gaz pour deux rayons de modèle de 30 et 50 m (suction de 4,5 kPa et 20 m d'épaisseur de déchets)

En utilisant le taux de récupération du méthane pour différents rayons de modèle et de succions, il est possible de déterminer le rayon d'influence pour une production donnée. Avec des productions variées (temps de simulation distincts), le comportement du puits sur une période plus ou moins longue peut être recréé. Ces simulations sont réalisées pour plusieurs épaisseurs de site.

3.4.3 Détermination du rayon d'influence en fonction du taux de production

Cette troisième partie de l'étude illustre l'impact du rayon d'influence sur le pompage du méthane avec les différents modèles de site étudiés, avec les trois succions imposées. Ici, les paramètres de comparaison utilisés sont le rayon d'influence et le taux de production. Le taux de production est interchangeable avec le temps de décomposition des déchets pour une courbe de production donnée. Cependant, le taux de production est d'intérêt plus générale que le temps de décomposition. Le graphique reliant le temps et le taux de production est présenté à la figure 3.1.

Les modèles étudiés pour cette série de mesures sont au nombre de cinq. Leur rayon est fixé à 160 m pour des épaisseurs de 10 m, 20 m, 30 m, 40 m et 50 m. Les résultats sont présentés selon trois succions : 1,5, 3 et 4,5 kPa.

Une des premières constatations qui s'impose à la figure 3.8, est que le taux de pompage a un impact direct sur le rayon d'influence. Cependant, pour la succion de 1,5 kPa, les courbes du rayon d'influence pour les différentes épaisseurs du site sont relativement proches et le rayon d'influence augmente peu avec le temps. Par contre, le rayon d'influence s'élargit avec l'augmentation de la succion et celle de l'épaisseur du site. Pour une épaisseur de 50 m et une succion de 1,5 kPa, le rayon d'influence augmente de 15 m pour un taux de production qui s'étend sur 60 ans; alors que, pour une succion de 4,5 kPa il atteint 70 m d'augmentation pour la même période de temps. De plus, peu importe le taux de pompage, il semble que pour un site épais de 10 m, le rayon d'influence change peu avec le temps.

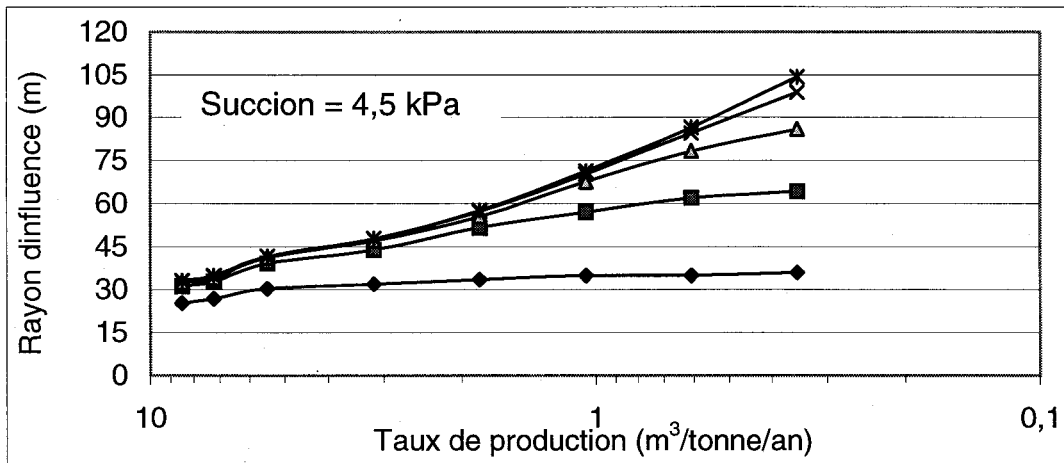
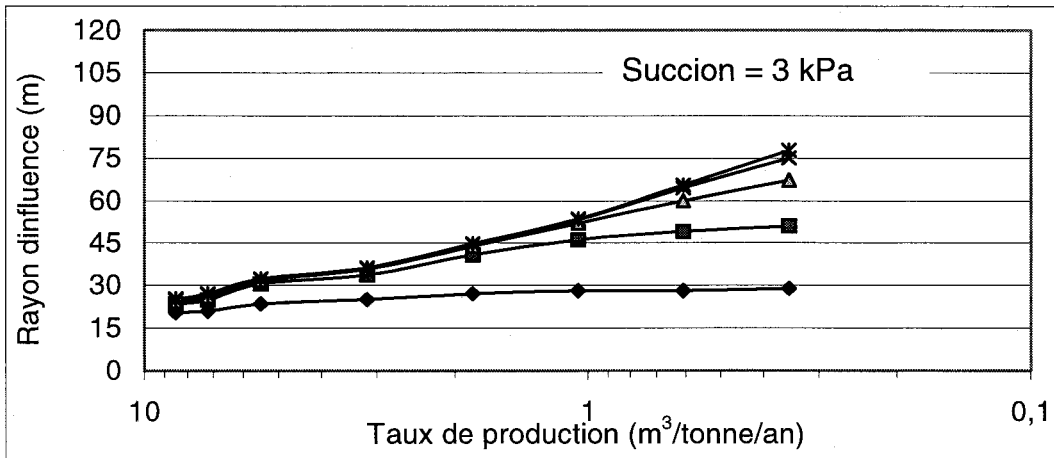
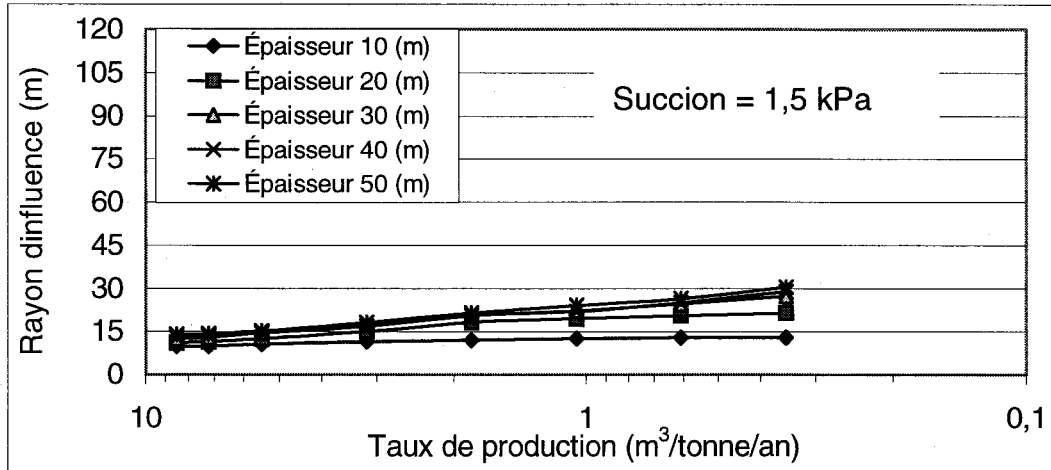


Figure 3.8 : Rayons d'influence en fonction du taux de production des biogaz pour différentes épaisseurs de déchets et 3 succions de pompage

Les graphiques de la figure 3.8 constituent un moyen de connaître le rayon d'influence selon le taux de production pour une certaine géométrie de site. Ainsi, avec leur aide, il est possible de concevoir un réseau de captage pour un site donné et d'en connaître le comportement dans le temps. En effet, si l'on prend pour exemple le premier graphique qui représente une succion de pompage de 1,5 kPa, pour une épaisseur de déchets de 50 m et un taux de production de 9,8 (m³/tonne/an), le rayon d'influence du puits est d'environ 15 m. Le taux de pompage correspondant à un moment précis pour un site donné, il est possible de déterminer l'évolution du rayon d'influence dans le temps.

3.4.4 Détermination de la qualité des biogaz pompés

La qualité des biogaz pompés a un impact sur leur potentiel de valorisation. Cette dernière partie de l'étude porte sur la détermination de la qualité des biogaz par deux mesures : celle de la fraction molaire de méthane présente au puits de captage et celle du débit massique (kg/s) de méthane pompé.

Trois types de simulations avec des succions différentes ont été effectuées avec des modèles de rayon de 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 65 m, 80 m, 95 m, 110 m et 160 m, ainsi que d'une épaisseur de 20 m et de 40 m. Ces modèles représentent, pour la configuration d'un réseau de captage, le demi-espacement entre deux puits. Ainsi, pour un rayon de modèle de 10 m, les puits sont espacés de 20 m, alors que pour un rayon de 30 m, ils le sont espacés de 60 m.

D'après les résultats présentés aux figures 3.9 et 3.10, on constate que plus le rayon du modèle est grand, plus la fraction molaire de méthane demeure à un pourcentage élevé. Ceci est logique car il y a plus de méthane disponible pour les modèles avec un grand rayon. Cependant, la fraction molaire demeure proche de 50 % sur une plus longue période pour le site de 40 m de hauteur. Par conséquent, il n'y a pas de relation linéaire entre les épaisseurs de site et le captage des biogaz. Comme la production de méthane et de biogaz va en diminuant quelle que soit la hauteur du site (20 m ou 40 m), le comportement du débit massique est identique : il baisse graduellement. Remarquons que pour des succions élevés, la fraction molaire du méthane se réduit plus rapidement. De

plus, le débit massique des gaz pompés (biogaz et air atmosphérique) diminue, ce qui tend à montrer que le taux de production baisse impliquant que la pression exercée par les gaz pompés est inférieure.

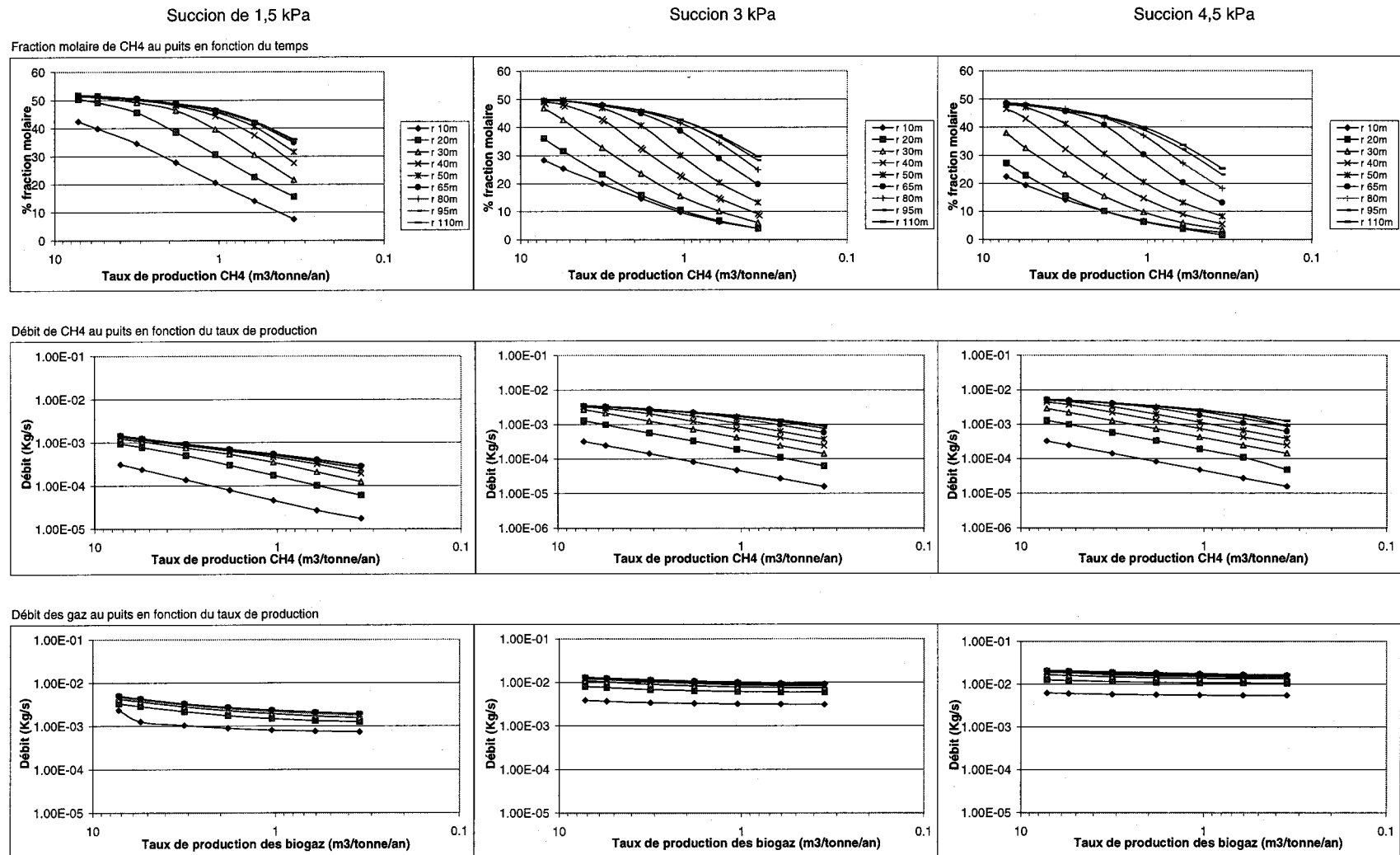


Figure 3.9 : Fraction molaire du méthane et débit massique du méthane et des gaz en fonction du taux de production de biogaz pour trois succions de puits et 20 m de déchets

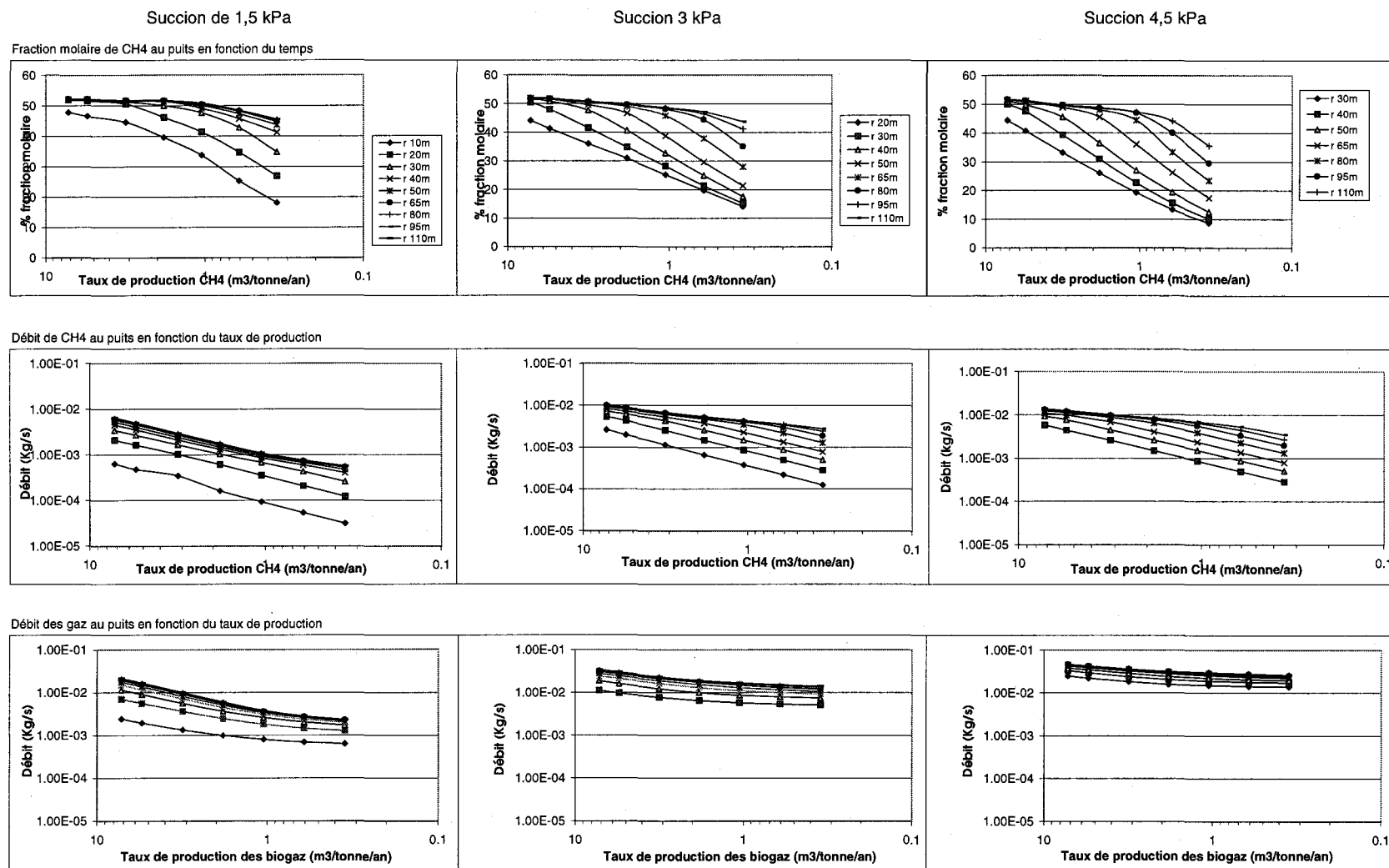


Figure 3.10 : Fraction molaire du méthane et débit massique du méthane et des gaz en fonction du taux de production de biogaz pour trois succions de puits et 40 m de déchets

Ces résultats indiquent que la fraction molaire de méthane n'est pas l'unique paramètre à connaître pour vérifier la qualité énergétique des biogaz au cours du pompage. Il faut aussi tenir compte du débit massique pour en avoir une appréciation plus réaliste. Ainsi, les graphiques représentant le site de 40 m d'épaisseur avec une succion de 1,5 kPa montrent que la fraction molaire demeure élevée sur une longue période pour les rayons de modèles supérieurs à 30 m, alors que le débit de méthane chute. Par conséquent, lorsqu'il y a valorisation énergétique des biogaz, il faut que la fraction molaire et le débit du méthane soient le plus élevés possible tout en tenant compte de l'aspect environnemental.

3.5 EXEMPLE D'APPLICATION À LA CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE CAPTAGE

Afin de proposer une conception efficace à la lumière des résultats présentés, il faut réunir les différentes données pour avoir une vue d'ensemble des divers paramètres qui contrôlent le captage des biogaz. Voici donc un exemple d'approche à la conception des systèmes de captage utilisant les résultats présentés précédemment. Il est possible de changer les variables du site décrit ci-dessous, pour y introduire les paramètres d'un nouveau site. Un site, fictif à être exploité comporte les caractéristiques suivantes :

Tableau 3.6 : Variables du site fictif retenues pour l'exemple d'application

Nombre d'habitants	45 000
Types de déchets	Domestiques
Grandeur du site	150 x 300 m
Nombre de phases d'enfouissement	5
Dimensions des phases	150 x 60 m
Épaisseur des déchets compactés	20 m
Construction	
• Fond imperméabilisé	OUI
• Parois imperméabilisées	OUI
Drainage des lixiviats	OUI

Selon la population desservie, chaque phase devrait être exploitée pendant 5 ans, pour une durée totale d'exploitation du site de 25 ans. Afin de bien comprendre les procédures nécessaires à la construction d'un réseau de captage, les différentes étapes sont expliquées dans le tableau qui suit :

Tableau 3.7 : Description des différentes étapes pour la conception d'un réseau de captage selon les spécifications du site exploité

Étape	Opération	Résultats
1	Déterminer le taux de production des biogaz du site selon l'âge des déchets par le calcul de la constante k et l'application de l'équation 3.11, et ce, avec : <ul style="list-style-type: none"> • Revue de littérature des valeurs disponibles sur la constante ϑ données selon le type de déchets. 	Figure 3.11 ou l'utilisation de l'équation 3.16 ϑ = donnée du CESM
2	Choisir le type de puits : <ul style="list-style-type: none"> • selon les modèles présentés : type A, B ou C (figure 3.3) • le construire durant l'exploitation du site ou après sa fermeture 	<ul style="list-style-type: none"> • Puits de type A • Construction durant l'exploitation
3	Établir la succion la plus sécuritaire environnementalement et la plus économique à partir de la figure 3.12 <ul style="list-style-type: none"> • si la succion est faible, alors le nombre de puits sera élevé et il y aura une diminution de leur nombre au bout de quelques années • si la succion est élevée, alors le nombre de puits sera faible et il y aura une diminution de la succion au bout de quelques années 	Selon les spécifications du site et le taux de production : <ul style="list-style-type: none"> • succion 4, 5 kPa pour les 10 premières années • succion de 3 kPa pour les 30 années suivantes
4	Réévaluer la production des biogaz après un certain nombre d'années afin de réajuster tous les paramètres de captage	

Étape 1 : il faut déterminer la constante ϑ afin de calculer le taux de production de biogaz dans les déchets. Les tests de terrain exigent que le site soit rendu à un certain stade d'exploitation. Dans la littérature, il est possible de trouver des informations sur le taux de production selon certains types de déchets, ce qui peut donner des informations précieuses pour gérer l'exploitation d'un futur site (El-Fadel 1991). Lorsque la constante ϑ est fixée, il s'agit d'appliquer la formule qui suit :

$$\Omega = \zeta_0 \sum w_i \vartheta_i e^{-\vartheta_i t} \quad (3.16)$$

où w_i est la fraction de masse de la $i^{\text{ème}}$ catégorie de déchets enfouis dans le site, ϑ_i est la constante de production pour cette catégorie, alors que, ζ_0 est le potentiel initial de production. Pour ce test, un mélange de déchets est considéré, donc $\sum w_i = 1$ et la constante ϑ est calculée pour l'ensemble des catégories présentes. Ici, les tests de terrain ont abouti à la relation suivante représentative du CESM :

$$\Omega = 8,7 \exp(-0,05t) \quad (3.17)$$

Cette relation donne un taux initial de production de $\zeta_0 = 8,7 \text{ m}^3 / \text{tonne} / \text{année}$ et une constante $\vartheta = 0,05$. Avec cette équation, il est possible de calculer le taux de production pour une période de 60 ans, illustré par le graphique suivant :

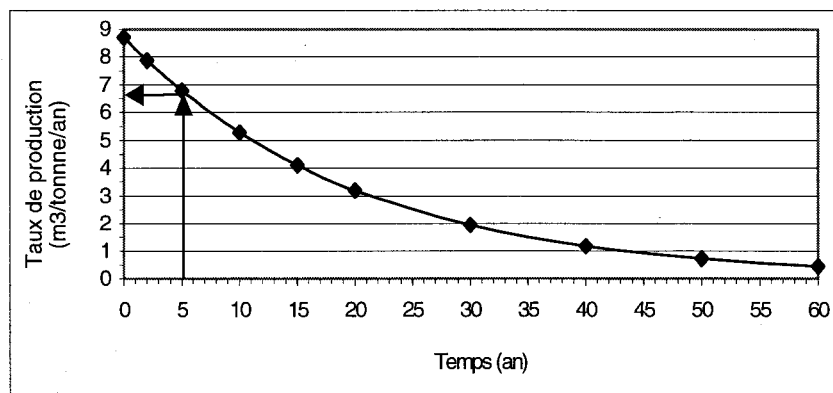


Figure 3.11 : Taux de production des biogaz dans les déchets en fonction du temps

Rappelons qu'il faut cinq ans pour terminer chaque phase du site d'enfouissement. Ceci signifie que les puits de captage construits dans chacune des phases débuteront leurs opérations régulières à ce moment. Il est donc possible de déterminer, à partir du graphique de la figure 3.11, le taux de production durant cette période. Ici, il est de $\Omega = 6,77 \text{ (m}^3 / \text{tonne} / \text{an})$. Notons, que ce graphique peut être utilisé pour toute la durée de la production des biogaz.

Étape 2 : comme le montrent les résultats précédents, il est plus efficace de crépiner $4/5^{\text{e}}$ du puits afin d'obtenir un rendement idéal, selon la configuration A de la figure 3.3. En outre, plutôt que d'installer les puits après la fermeture du site, il est préférable de les

construire au fur et à mesure que les phases se remplissent, et ce, pour deux raisons : d'une part, la probabilité d'émettre des biogaz dans l'environnement est moins élevée car la production de ces derniers s'amorce très rapidement (quelques mois) et, d'autre part, l'opération est moins coûteuse car cela évite de forer pour installer les puits. Cependant, il faut porter un soin tout particulier à la succion appliquée tant que le puits n'est pas achevé. Pour le cas considéré ici, les puits sont supposés être terminés lorsque les déchets atteignent leur épaisseur maximale, soit 20 m.

Étape 3 : la succion exercée permet de déterminer le nombre de puits qui sera nécessaire par phase de construction. Le graphique ci-dessous montre le rayon d'influence d'un puits de captage crépiné sur les $4/5^e$ de l'épaisseur du site choisi en fonction du taux de production pour trois succions dans le puits et pour 20 m d'épaisseur de déchets. Ces courbes sont extraites de la figure 3.8. Il permet d'identifier ; quelle est la succion la plus appropriée :

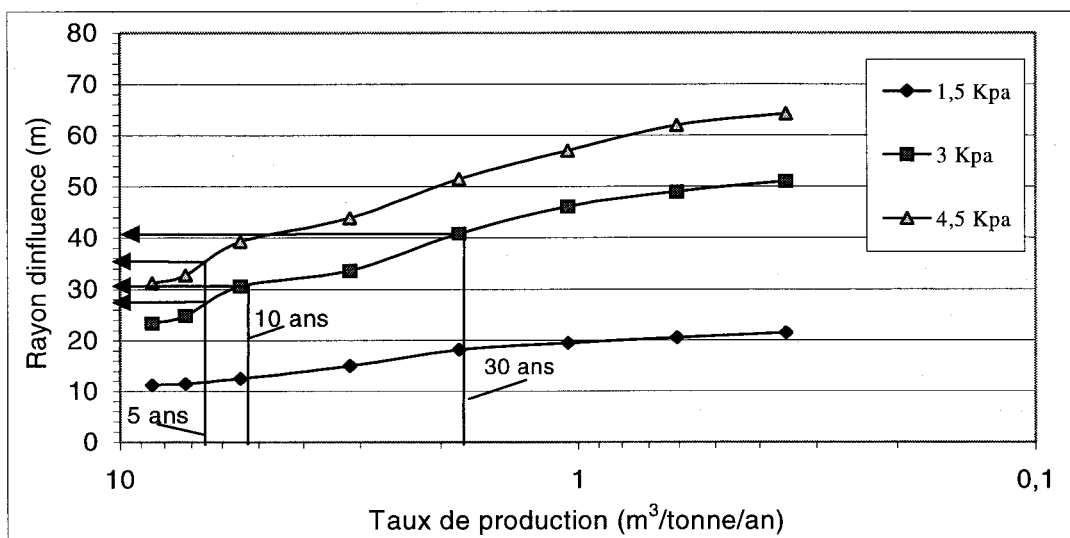


Figure 3.12 : Rayons d'influence du puits de captage pour différentes succions et une épaisseur de 20 m de déchets

Avec une succion de 4,5 kPa, pour la période de 5 ans (taux de production à $6,77 \text{ m}^3/\text{tonne}/\text{an}$), le rayon d'influence est établi à 35 m selon la figure 3.12. Par conséquent, un maximum de trois puits est nécessaire pour chaque phase, alors que pour une succion de 3 kPa, il en faudrait quatre. Cette dernière situation n'est pas sans inconvénient car un plus grand nombre de puits est plus coûteux à construire et rend le

réseau plus fragile. Cependant, le fonctionnement d'un réseau de captage avec un taux de succion élevé requiert plus d'énergie. Il faut donc établir la conception selon ce qui est le plus avantageux pour le propriétaire du site tout en gardant une marge de sécurité importante pour protéger les humains et l'environnement.

Après un certain temps, la succion de pompage peut être réajustée pour conserver un rayon d'influence quelque peu supérieur à 30 m. Ainsi après 10 ans (taux de production à 5,2 m³/tonne/an), la succion peut être ramenée à 3 kPa. On obtient alors un rayon d'influence un peu plus grand que 30 m. De plus, il y a augmentation de la fraction molaire de méthane, ce qui implique un gaz de meilleure qualité. Après 30 ans (taux de production à 1,92 m³/tonne/an), le rayon d'influence atteint 40 m pour 3 kPa. À ce stade, une réévaluation de la production est nécessaire afin d'ajuster le réseau de captage à la première phase d'exploitation du site. Il faut retenir qu'il existe un décalage de 5 ans entre chaque phase. La conception doit donc en tenir compte et prévoir l'usage d'une succion distincte dans chaque phase ou un nombre de puits approprié.

Enfin, la succion de pompage doit être déterminée selon l'âge des déchets mais aussi selon la fraction molaire de méthane et son débit afin d'avoir un gaz de qualité (présence suffisante de méthane) si celui-ci est valorisé.

3.6 DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Afin de bien déterminer le rayon d'influence des puits de captage, il faut considérer plusieurs éléments dont l'hydrogéologie, le taux pompage, la géométrie du puits, l'épaisseur de site et la production des biogaz. L'apport scientifique de cette étude tient au regroupement de ces diverses variables grâce à la modélisation numérique.

Ainsi, il ressort que la longueur de la crépine d'un puits de captage doit correspondre idéalement au $\frac{4}{5}$ ^e de celle du site lorsqu'il n'a pas de couverture imperméable au gaz. Selon l'épaisseur du site, le rayon d'influence aura tendance à évoluer de manière différente. Le rayon reste quasiment constant pour les sites d'une épaisseur 10 m, alors qu'il prend beaucoup d'expansion pour les sites de 50 m. La

fraction molaire du méthane tend à diminuer plus rapidement lorsque les succions sont élevées. De plus, la figure 3.9 montre que pour des puits trop rapprochés, la fraction molaire de méthane est plus basse, donc les biogaz sont de moindre qualité et difficilement valorisables.

Remarquons que la succion doit être ajustée en fonction de l'évolution de la production des biogaz. Enfin, le rayon d'influence est plus grand avec des succions plus élevées, mais à ces taux de pompage, il peut y avoir une intrusion d'air par la partie supérieure du site. Ce phénomène est à éviter à tout prix car il y a un risque de combustion lorsque l'air se mélange avec le méthane. De plus, cette intrusion d'air tue les bactéries qui produisent les biogaz, ce qui a pour effet de réduire leur production et de diminuer leur qualité. Cette réduction de l'activité biologique prolonge les délais requis pour stabiliser les déchets

Au-delà de ces constats, certaines recommandations s'imposent. Pour les futures modélisations, il serait pertinent de regarder l'effet de la perméabilité sur le rayon d'influence car elle a été considérée uniforme dans cette étude sur l'ensemble du site. Afin d'avoir une image plus réaliste, il serait donc judicieux de tester différentes perméabilités selon l'épaisseur des déchets.

Le taux de production des biogaz qui a été utilisé pour cette étude provient du site d'enfouissement de la ville de Montréal, le CESM. Il est caractéristique des sites qui ont été construits durant les années 1970, 1980 et début 1990. Cependant, les nouvelles normes de gestion tant au Québec qu'en Amérique du Nord, et même en Europe, amènent un tri des déchets, ce qui n'est pas sans conséquence sur la production des biogaz. Plus ces normes deviendront uniformes, plus les sites d'enfouissement vont se ressembler en Occident. Ces sites doivent être étudiés sur plusieurs plans (hydrogéologique, biologiques, etc.) afin de pouvoir connaître leurs comportements tout au long de la production des biogaz.

Les modélisations ont été effectuées alors que le site ne disposait pas de recouvrement imperméable. L'analyse de l'impact du recouvrement sur le rayon

d'influence permettrait d'affiner les résultats. Notons que Nastev (1998) a effectué des modélisations sur le recouvrement d'un site et son influence sur la migration de biogaz dans un sol adjacent, et ce, avec présence d'un puits de captage dans les déchets. Il faudrait continuer ce type de modélisation avec différents paramètres afin de généraliser ce cas.

Nous avons supposé au départ que les puits modélisés étaient situés au centre d'un site d'enfouissement, donc sans effet de bord (paroi d'un site ou pente inclinée des déchets, etc.). Il serait important d'effectuer de telles simulations afin de vérifier le comportement des puits de captage dans ces conditions.

Toutes ces mises en relief demandent une grande connaissance dans divers domaines rattachés au site d'enfouissement et, plus particulièrement, à la production des biogaz. De ce point de vue, constituer une banque de données sur la production des biogaz selon divers types de sites pour des climats différents à travers le monde permettrait de rendre disponibles et accessibles des informations importantes. Cette banque pourrait être utilisée comme base de référence pour la conception de systèmes de captage adaptés pour chaque type de site. Elle serait un bassin de savoir et de connaissances sur la gestion des sites et des biogaz.

CHAPITRE 4

CONCLUSION

Le but de nos travaux était de présenter une approche scientifique pour établir le rayon d'influence de puits de captage des biogaz applicable pour différentes géométries de sites d'enfouissement et de puits. De plus, les résultats devaient être présentés sous forme d'abaques pour faciliter la conception de futurs réseaux de captage. Grâce au logiciel utilisé (TOUGH2-LGM), ces objectifs ont été en grande partie et efficacement atteints.

Dans un premier temps, il a fallu faire l'apprentissage du logiciel TOUGH2-LGM et des notions d'hydrogéologie qui y sont rattachées. Par la suite, l'élaboration du modèle numérique a été effectuée. Ce dernier est un modèle 2D radial avec 160 mètres de rayon et un puits de captage. Les premières simulations ont été effectuées sur trois types de puits afin d'établir le plus performant. Ces simulations nous ont montré que le puits comportant la crépine la plus longue, couvrant les 4/5^e de l'épaisseur du site, est le plus efficace.

Les simulations sur le rayon d'influence ont ensuite été réalisées. Trois différentes succions dans le puits de captage et 4 épaisseurs de site ont été simulées pour des taux de production des biogaz étalés sur 60 ans de vie du site. Les résultats obtenus ont montré, entre autres, que la relation entre les différentes épaisseurs de site et le rayon

d'influence des puits de captage n'était pas linéaire et qu'il y a une relation entre la succion exercée au puits de captage et l'amplitude du rayon d'influence. Par la suite, ces résultats ont été mis sous forme d'abaques qui permettent de connaître le rayon d'influence pour différentes succions, géométries de site et différents taux de production des biogaz. Ce dernier paramètre est important car il permet de généraliser à certains sites d'enfouissement ces abaques puisque le taux de production de ces sites devrait se situer dans la plage du taux utilisé. Enfin, la qualité des biogaz pompés a aussi fait l'objet d'étude sur les modèles dont les épaisseurs étaient de 20 m et 40 m. Ceci pour les trois succions du puits de captage et le même taux de production des biogaz mentionné plus haut.

Suite à nos travaux, il est maintenant possible d'avoir une idée précise du design que peut prendre un système de captage et de son évolution dans le temps. De plus, la conception est relativement simple au niveau des variables qu'il faut préciser (épaisseur du site, années d'exploitation, type de déchets, etc.). La modélisation est un outil qui permet d'avoir un réseau plus efficace et performant, donc plus sûr pour l'environnement et les êtres humains. Les abaques obtenus servent à prévoir le nombre de puits qui seront nécessaires pour le captage des biogaz. Ils sont donc utiles pour estimer les coûts liés au design d'un réseau. Avec cette approche, il est aussi possible d'estimer la quantité de méthane qui sera pompée durant les décennies d'exploitation et, par le fait même, d'établir la valeur économique de la valorisation des biogaz. Outil technique par excellence des ingénieurs, la modélisation numérique devient du même coup un outil de planification financière non négligeable à la disposition des propriétaires responsables des sites d'enfouissement.

Notre discussion nous conduit à conclure que la gestion des sites d'enfouissement sera de plus en plus spécialisée en fonction du tri des déchets. Ainsi, tel site sera conçu pour tel type de déchets et ainsi de suite. Il est donc important d'étudier en profondeur le comportement des matières résiduelles afin de concevoir des systèmes de sécurité adéquats pour la protection des êtres humains et de l'environnement. Ces études devraient porter sur les aspects hydrogéologiques, la composition et la production des

biogaz avec l'effet du climat sur cette production et l'évaluation des différentes causes de l'évolution des pressions dans les sites.

Les systèmes de captage des biogaz devraient aussi être soumis à des études plus approfondies pour bien répondre à chaque type de production vu la spécialisation que semble prendre les sites d'enfouissement. Ainsi, selon la production de biogaz prévue pour un site contenant un certain type de déchet, il serait possible de prévoir un système de captage adapté pour recueillir la maximum de biogaz. De plus, l'environnement d'un site d'enfouissement étant hostile, les systèmes de captage des biogaz demandent un entretien fréquent. Il serait important de faire des études sur ces systèmes afin qu'ils résistent mieux à cet environnement pour ainsi diminuer les coûts d'entretien et augmenter leur durée de vie, et ce , selon les types de site.

CHAPITRE 5

BIBLIOGRAPHIE

Alzaydis, A. A., Moore, C. A. & Rai, I. S. (1977) Combined pressure and diffusional transition region flow of gases in porous media. *AICHE Journal, American Institute of Chemical Engineering* **24**, 35 p. Cité par ¹.

Amtec Engineering, Inc. (1997) *Tecplot User's Manual*. Tecplot version 7.0. Amtec Engineering, Inc. Bellevu WA.

Baehr, A. L. (1991) Evaluation of unsaturated zone air permeability through pneumatic tests. *Water Resources Research* **27**, 2605-17. Cité par ².

Bear, J. (1972) *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier Publishing Co., New York. Cité par ².

Bird, R. B., Steward, W. E. & Lightfoot, E. N. (1960) *Transport phenomena*. John Wiley & Sons, New York. Cité par ².

Blais, C. (1996) *Caractérisation des propriétés hydrauliques au CTED de la ville de Montréal*. Mémoire de maîtrise, INRS-Géoressources.

Blumberg, L., & Gottlieb, J. (1989) *War on waste*. Island Press, Washington, D.C.

Clancy, D. P., Blanchet, M. J. & Hodgen, R. E. (1980) *Probabilistic model for sanitary landfill gas production*. User's Guide to the FILGAS program.

El-fadel¹, M. A. (1991) *Modeling gas and heat generation and transport in sanitary landfills*. Thèse de doctorat, Stanford University : 385 p.

EMCON, Associates, (1975) *Sonoma county solid waste stabilization study*. EPA-530/SW-65d.1. (NTIS PB 239 778), 275 p. Cité par ¹.

EMCON Associates (1980) *Methane Generation and Recovery from Landfill*. Ann Arbor Science, Michigan : 139 p.

EMCON Associates (1986) *Gas production enhancement techniques*. ENCOM Associates, San Jose, Californie : 361-74.

EMCON Associates, & Jacobs Engineering Compagny (1976) *A feasibility study of recovery of methane from parcel 1 of the Scholl Canyon sanitary landfill for the city of Glendale*. EMCON Associates, October, San Jose, CA. : 38p. Tiré de ¹.

United States Environmental Protection Agency (1997) *Method 2E-Determination of landfill gas production flow rate*. Office of Air Quality Planning & Standards (<http://www.epa.gov/ttnemc01/emmc.html>), 27 p.

Farquhar, G. J., & Rovers, F. A. (1973) Gas production during refuse decomposition. *Water, Air and Soil Pollution* **2** : 483-95.

Findikakis, A. N., & Leckie, J. O. (1979) Numerical Simulation of Gas Flow in Sanitary Landfill. *Journal of the environmental engineering division* : 927-45.

Gendebien, A., Pauwels, M., Constant, M. *et al.* (1992) *Landfill Gas. From Environmen to Energy*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. Cité par Campbell, D. J. V. *Explosion and fire hazards*

associated with landfillgas. Présenté dans Landfilling of waste : Biogas (1996), Éditeurs : Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. : 133-54

Halvadakis, C. P. (1983) *Methanogenesis in solid-waste landfill bioreactors*. Ph. D. thesis, Department of Civil Engineering, Stanford, California.

Ham, R. K. & Barlaz, M. A. (1989) *Measurement and prediction of landfill gas quality and quantity*. Présenté dans : Sanitary Landfilling : Process, Technology and Environmental Impact, Éditeurs : Academic Press Ltd., London : 155-66.

Hartz, K. E. & Ham, R. K. (1982) Gas Generation rates of Landfill Samples. *Consevation & Recycling* 5 : 133-47.

Hilborn, R. J. & al. (1979) *SIMCON-A Simulation Control Command Language*. Institute of Animal Resource Ecology, University of British Columbia Vancouver. Cité par ¹.

Huges, G. M., Landon, R. A. & Farvolen, R. N. (1971) *Hydrogeology of solid waste disposal sites in Northeastern Illinois*. EPA-SW-12d. Cité par ¹.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1992) *Climate Change 1992*. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge Unerversity Press, UK.

Kunz, C. & Lu, A. H. (1980) *Methane production rate studies and gas flow modeling for the Fresh Kills landfill*. New York State Energy Research and Development Administration Report.

Lai, S. H., Tiedje, J. M. & Erickson, A. E. (1976) *In situ* measurements of gas diffusion coefficient in soil . *Soil Science Society of America Journal*, 40, 3-6. Cité par ².

Leach, A. (1996) *Design of Combined Landfill Gas Abstraction Systems*. Présenté dans Landfilling of waste : Biogas (1996), Éditeurs : Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. : 455-70

Lefebvre³, R. (1998) *Écoulement en milieux poreux*. Note de cours, INRS-Géoresources.

Lofy, R. J (1983) *Zones of vacuum influence surrounding gas extraction wells*. Présenté dans Landfilling of waste : Biogas (1996), Éditeurs : Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. : 320-454.

Los Angeles, (1977) *A case study of the Los Angeles County Palos Verdes landfill gas development project*. Municipal Environmental Research Laboratory, City of Los Angeles. Cité par ¹.

Marsily, G. de (1986) *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press, San Diego, CA. Cité par ².

Massmann, J. W. & Moore, C. A. (1983) Effects of landfill cover design on methane recovery systems. *Journal of Energy Resources Technology* **105** : 528-33.

Massmann, J. W. & Madden, M. (1994) Estimating air conductivity and porosity from vadose zone pumping tests. *Journal of Environmental Engineering, ASCE* **120**, 313-28. Cité par ².

McBean, E. A. (1993) *Landfill gas and leachate management*. Notes de cours, Université de Waterloo Ontario.

Ministère de l'Environnement et de la faune (1992) *Refonte du règlement sur les déchets solides*. Version de septembre 1992

Ministère de l'Environnement et de la faune (1998) *Plan d'action québécois sur la gestion des matières résiduelles 1998-2008*. Ministère de l'environnement et de la faune, Gouvernement du Québec.

Metcalf, D. E. & Farquhar, G. J. (1986) Modeling gas migration through unsaturated soils from waste disposal sites. *Air and Soil Pollution* **19**, 247-59. Cité par ¹.

Milington, R. J. & Quirk, J. P. (1961) Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* **57**, 1200-7. Cité par ³.

Mohsen, M. F. N., Farquhar, G. J. & Kouwen, N. (1980) Gas migration and vent design at landfill sites. *Water, Air and Soil Pollution* **13**, 79-97. Cité par ².

Moore, C. A. (1976) *Theoretical Approach to gas movement through soils*. Ohio State University : 33-43.

Moore, C. A., Rai, I. S & Lynch, J. (1982) Computer Design of Landfill Methan Migration Control Journal of the environmental engineering division. *ASCE* **108**, No E1 : 89-106.

Moore, C. A., Rai, S. I. & Alzaydl, A. A. (1979) Methane migration around sanitary landfills. *Journal of the geotechnical engineering division* : 131-44.

Mualem, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research* **12**, 513-21.

Narasimhan, T. N., & Witherspoon, P. A. (1976) An integrated finite difference methode for analyzing fluid flow in porous media. *Water Resourcess Research* **12**, 57-64. Cité par ².

Nastev², M. (1998) *Modeling landfill gas generation and migration in sanitary landfills and geological formations*. Thèse de doctorat, Université Laval.

Oweis, I. S. & Khera, R. P. (1990) *Geotechnology of waste management*. Butterworth & Co. Ltd, Cambridge, Angleterre.

Peterson, T. N. (1988) *Human health risk assessment of landfill gas emissions*. Proceedings 11th Annual Madison Waste Conference, 13-14 Septembre, University of Wisconsin, Madison, USA. Présenté dans *Landfilling of waste : Biogas* (1996), Éditeurs : Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. : 132-54

Pirt, S. J. (1978) *Aerobic and Anaerobic Microbial Digestion in Waste Reclamation*. *J. Appl. Chem. Biotechnol.* **28**, 232-6. Cité par ¹.

Pruess K. & Narasimhan T. N. (1985) *A practical Methode for Modeling Fluid and Heat Flow in Fractured Porous Media*. *Society of petroleum engineers journal* : 14-26.

Pruess, K. (1991) *TOUGH2-A general-purpos numerical simulator for multiphase fluid and heat flow*. Earth science division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkley.

Rees, J.F. (1980) *The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organic matter*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* **30** : 161-75.

Rettenberger, G., Schreier, W. (1996) *Combustion Processes and Emissions of Landfill Gas Flares*. Présenté dans *Landfilling of waste : Biogas* (1996), Éditeurs : Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. : 505-20.

Robinson, W. D. (1986). *The solid Waste Handbook*, Éditeurs : Wiley & Sons Inc.

Schroeder, P. R., Gibson, A. C. & Smolen, M. D. (1983) *The hydraulic evaluation of landfill performance (HELP) model 2*. Documentation for version 1. Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati Ohio. Cité par ².

Schroeder, P. R., Gibson, A. C. & Smolen, M. D. (1983) *The hydraulic evaluation of landfill performance (HELP) model Volume III: User's guide for version 2*. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. Project officer : R. Landreth, Landfill Pollution Control Division, Hazardous Waste Engineering Research Laboratory.

Schroeder, P. R., Peyton, R. L., McEnro, B. M. & Sjostrom, J. W. (1994) *The hydraulic evaluation of landfill performance (HELP) model 3*. User's guide for version 3. Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati Ohio. Cité par ².

Senior, E., & Balba, M. T. M. (1987) *Bioenvironmental Systems volume II, chapitre 2, Landfill Biotechnology*, Éditeurs : Wise, D. L. : 17-65.

Thorneloe, S. A. (1994) *Option and economics of landfill gas utilization in the USA*. US Environmental Protection Agency, Air and Energy Engineering Laboratory, Research Triangle Park, NC 27711, USA. Présenté dans *Landfilling of waste : Biogas* (1996), Éditeurs : Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. : 597-610.

van Genuchten, M. TH. (1980) A Closed-form Equation for Predicting the hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 : 892-98.

Annexe A

Fichiers d'entrée de TOUGH2-LGM

Covered Indfill 2D radial model with extraction wells

ROCKS

WASTE	2	760.	.50	6.0E-12	1.0E-12	1.0E-12	0.184	1333.
	0.	0.	0.038	1.0	0.0		0.184	
	9	0.11	0.03	1.0				
	7	0.11	0.03	5.1E-04	1.0E06	1.0		
WAST2	2	760.	.50	1.0E-12	1.0E-12	1.0E-12	1.0E-11	1333.
	0.	0.	1.0E-11	1.0	0.0		0.184	
	9	0.11	0.03	1.0				
	7	0.11	0.03	5.1E-04	1.0E06	1.0		
WELLS	2	760.	.50	1.0E-09	1.0E-09	1.0E-12	0.184	1333.
	0.	0.	0.038	1.0	0.0		0.184	
	9	0.11	0.03	1.0				
	7	0.11	0.03	5.1E-04	1.0E06	1.0		
ROCKF	2	2246.0	0.05	1.0E-13	1.0E-13	7.4E-11	2.06	838.
	0.	0.	1.76	1.0				
	9	0.823	0.10	1.0				
	7	0.823	0.10	13.4	1.0	1.0		
INTER	2	1995.	.42	5.8E-12	5.8E-12	5.8E-12	0.800	1000.
	0.	0.	0.212	1.0				
	9	0.717	0.00	0.888				
	7	0.717	0.00	1.53E-05	2.94E05	0.888		
PROTE	2	2098.	.355	5.8E-12	5.8E-12	5.8E-12	0.828	1000.
	0.	0.	0.270	1.0				
	9	0.625	0.0	0.927				
	7	0.625	0.0	4.07E-06	1.18E06	0.927		
PLOT2	2	2075.	.39	1.0E-15	1.0E-15	1.0E-15	0.813	1380.
	0.	0.	0.237	1.0				
	9	0.676	0.261	0.99				
	7	0.676	0.261	1.15E-05	3.9E05	0.99		
PLOT3	2	1857.	0.521	1.0E-16	1.0E-16	1.0E-16	0.758	1380.
	0.	0.	0.146	1.0				
	9	0.671	0.0	0.977				
	7	0.671	0.0	5.1E-07	4.9E06	0.977		
CLCFR	2	2246.0	0.05	7.4E-11	7.4E-11	7.4E-11	2.06	838.
	0.	0.	1.76	1.0				
	9	0.823	0.10	1.0				
	7	0.823	0.10	13.4	1.0	1.0		
CLCSD	2	2246.0	0.01	2.5E-16	2.5E-16	2.5E-16	2.17	838.
	0.	0.	2.1	1.0				
	9	0.375	0.121	1.0				
	7	0.375	0.121	0.00308	1.0E05	1.0		
BCTOP	2	760.	.50	6.0E-13	6.0E-13	6.0E-13	0.184	1333.
	0.	0.	0.038	1.0	0.0			
	9	0.11	0.03	1.0				
	7	0.11	0.03	5.1E-00	10.00	1.0		

START-----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8
 PARAM-----1-----*-----123456789012345678901234-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8
 8 39999 09999000020100000000271000094 1.0 1.80
 0. 3.15576E7 1000. 0. 9.81 1.4
 1.E-5 1. 0.1 1.0 1.0
 100000. 10.58 0.0 0.0 5.0
 TIMES-----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8-----*-----9-----*-----0

		31557600.441806400.757382400.	2.11436E9					2.11436E9
		252460.315576000.473364000.631152000.788940000.946728000.						
		1997. 2007. 2017. 2050. 3.787E9 4.418E9 5.0492E9 5.680E9 6.3115E9 7.8894E9						
ELEME	1	*-----2-----*-----Vol	*-----4-----*-----5-----*-----'X'	*-----'Y'	*-----8-----*-----Tdep			
AW 1	WASTE	50.26	1.5	19.0	+0.01	1983		
AW 2	WASTE	169.64	4.0	19.0	+0.01	1983		
AW 3	WASTE	402.12	7.5	19.0	+0.01	1983		
AW 4	WASTE	1884.95	15.0	19.0	+0.01			
AW 5	WASTE	3141.59	25.0	19.0	+0.01			
AW 6	WASTE	4398.23	35.0	19.0	+0.01			
AW 7	WASTE	5654.87	45.0	19.0	+0.01			
AW 8	WASTE	10838.49	57.5	19.0	+0.01			
AW 9	WASTE	13665.93	72.5	19.0	+0.01			
AW 10	WASTE	16493.36	87.5	19.0	+0.01			
AW 11	WASTE	19320.79	102.5	19.0	+0.01			
AW 12	WASTE	30159.30	120.0	19.0	+0.01			
AW 13	WASTE	54663.71	145.0	19.0	+0.01			
WEL 2	WELLS	6.28	0.0	17.0	+1.00	1982		
BW 1	WASTE	50.26	1.5	17.0	+1.00	1982		
BW 2	WASTE	169.64	4.0	17.0	+1.00	1982		
BW 3	WASTE	402.12	7.5	17.0	+1.00	1982		
BW 4	WASTE	1884.95	15.0	17.0	+1.00			
BW 5	WASTE	3141.59	25.0	17.0	+1.00			
BW 6	WASTE	4398.23	35.0	17.0	+1.00			
BW 7	WASTE	5654.87	45.0	17.0	+1.00			
BW 8	WASTE	10838.49	57.5	17.0	+1.00			

BW 9	WASTE	13665.93	72.5	17.0	+1.00	
BW 10	WASTE	16493.36	87.5	17.0	+1.00	
BW 11	WASTE	19320.79	102.5	17.0	+1.00	
BW 12	WASTE	30159.30	120.0	17.0	+1.00	
BW 13	WASTE	54663.71	145.0	17.0	+1.00	
WEL 3	WELLS	6.28	0.0	15.0	+1.00	1982
CW 1	WASTE	50.26	1.5	15.0	+1.00	1982
CW 2	WASTE	169.64	4.0	15.0	+1.00	1982
CW 3	WASTE	402.12	7.5	15.0	+1.00	1982
CW 4	WASTE	1884.95	15.0	15.0	+1.00	
CW 5	WASTE	3141.59	25.0	15.0	+1.00	
CW 6	WASTE	4398.23	35.0	15.0	+1.00	
CW 7	WASTE	5654.87	45.0	15.0	+1.00	
CW 8	WASTE	10838.49	57.5	15.0	+1.00	
CW 9	WASTE	13665.93	72.5	15.0	+1.00	
CW 10	WASTE	16493.36	87.5	15.0	+1.00	
CW 11	WASTE	19320.79	102.5	15.0	+1.00	
CW 12	WASTE	30159.30	120.0	15.0	+1.00	
CW 13	WASTE	54663.71	145.0	15.0	+1.00	
WEL 4	WELLS	6.28	0.0	13.0	+2.00	1981
DW 1	WASTE	50.26	1.5	13.0	+2.00	1981
DW 2	WASTE	169.64	4.0	13.0	+2.00	1981
DW 3	WASTE	402.12	7.5	13.0	+2.00	1981
DW 4	WASTE	1884.95	15.0	13.0	+2.00	
DW 5	WASTE	3141.59	25.0	13.0	+2.00	
DW 6	WASTE	4398.23	35.0	13.0	+2.00	
DW 7	WASTE	5654.87	45.0	13.0	+2.00	
DW 8	WASTE	10838.49	57.5	13.0	+2.00	
DW 9	WASTE	13665.93	72.5	13.0	+2.00	
DW 10	WASTE	16493.36	87.5	13.0	+2.00	
DW 11	WASTE	19320.79	102.5	13.0	+2.00	
DW 12	WASTE	30159.30	120.0	13.0	+2.00	
DW 13	WASTE	54663.71	145.0	13.0	+2.00	
WEL 5	WELLS	6.28	0.0	11.0	+2.00	1981
EW 1	WASTE	50.26	1.5	11.0	+2.00	1981
EW 2	WASTE	169.64	4.0	11.0	+2.00	1981
EW 3	WASTE	402.12	7.5	11.0	+2.00	1981
EW 4	WASTE	1884.95	15.0	11.0	+2.00	
EW 5	WASTE	3141.59	25.0	11.0	+2.00	
EW 6	WASTE	4398.23	35.0	11.0	+2.00	
EW 7	WASTE	5654.87	45.0	11.0	+2.00	
EW 8	WASTE	10838.49	57.5	11.0	+2.00	
EW 9	WASTE	13665.93	72.5	11.0	+2.00	
EW 10	WASTE	16493.36	87.5	11.0	+2.00	
EW 11	WASTE	19320.79	102.5	11.0	+2.00	
EW 12	WASTE	30159.30	120.0	11.0	+2.00	
EW 13	WASTE	54663.71	145.0	11.0	+2.00	
WEL 6	WELLS	6.28	0.0	9.0	+3.00	1980
FW 1	WASTE	50.26	1.5	9.0	+3.00	1980
FW 2	WASTE	169.64	4.0	9.0	+3.00	1980
FW 3	WASTE	402.12	7.5	9.0	+3.00	1980
FW 4	WASTE	1884.95	15.0	9.0	+3.00	
FW 5	WASTE	3141.59	25.0	9.0	+3.00	
FW 6	WASTE	4398.23	35.0	9.0	+3.00	
FW 7	WASTE	5654.87	45.0	9.0	+3.00	
FW 8	WASTE	10838.49	57.5	9.0	+3.00	
FW 9	WASTE	13665.93	72.5	9.0	+3.00	
FW 10	WASTE	16493.36	87.5	9.0	+3.00	
FW 11	WASTE	19320.79	102.5	9.0	+3.00	
FW 12	WASTE	30159.30	120.0	9.0	+3.00	
FW 13	WASTE	54663.71	145.0	9.0	+3.00	
WEL 7	WELLS	6.28	0.0	7.0	+3.00	1980
GW 1	WASTE	50.26	1.5	7.0	+3.00	1980
GW 2	WASTE	169.64	4.0	7.0	+3.00	1980
GW 3	WASTE	402.12	7.5	7.0	+3.00	1980
GW 4	WASTE	1884.95	15.0	7.0	+3.00	
GW 5	WASTE	3141.59	25.0	7.0	+3.00	
GW 6	WASTE	4398.23	35.0	7.0	+3.00	
GW 7	WASTE	5654.87	45.0	7.0	+3.00	
GW 8	WASTE	10838.49	57.5	7.0	+3.00	
GW 9	WASTE	13665.93	72.5	7.0	+3.00	
GW 10	WASTE	16493.36	87.5	7.0	+3.00	
GW 11	WASTE	19320.79	102.5	7.0	+3.00	
GW 12	WASTE	30159.30	120.0	7.0	+3.00	
GW 13	WASTE	54663.71	145.0	7.0	+3.00	
WEL 8	WELLS	6.28	0.0	5.0	+4.00	1979
HW 1	WASTE	50.26	1.5	5.0	+4.00	1979
HW 2	WASTE	169.64	4.0	5.0	+4.00	1979
HW 3	WASTE	402.12	7.5	5.0	+4.00	1979
HW 4	WASTE	1884.95	15.0	5.0	+4.00	
HW 5	WASTE	3141.59	25.0	5.0	+4.00	

HW 6	WASTE	4398.23	35.0	5.0	+4.00	
HW 7	WASTE	5654.87	45.0	5.0	+4.00	
HW 8	WASTE	10838.49	57.5	5.0	+4.00	
HW 9	WASTE	13665.93	72.5	5.0	+4.00	
HW 10	WASTE	16493.36	87.5	5.0	+4.00	
HW 11	WASTE	19320.79	102.5	5.0	+4.00	
HW 12	WASTE	30159.30	120.0	5.0	+4.00	
HW 13	WASTE	54663.71	145.0	5.0	+4.00	
WEL 9	WELLS	6.28	0.0	3.0	+4.00	1979
IW 1	WASTE	50.26	1.5	3.0	+4.00	1979
IW 2	WASTE	169.64	4.0	3.0	+4.00	1979
IW 3	WASTE	402.12	7.5	3.0	+4.00	1979
IW 4	WASTE	1884.95	15.0	3.0	+4.00	
IW 5	WASTE	3141.59	25.0	3.0	+4.00	
IW 6	WASTE	4398.23	35.0	3.0	+4.00	
IW 7	WASTE	5654.87	45.0	3.0	+4.00	
IW 8	WASTE	10838.49	57.5	3.0	+4.00	
IW 9	WASTE	13665.93	72.5	3.0	+4.00	
IW 10	WASTE	16493.36	87.5	3.0	+4.00	
IW 11	WASTE	19320.79	102.5	3.0	+4.00	
IW 12	WASTE	30159.30	120.0	3.0	+4.00	
IW 13	WASTE	54663.71	145.0	3.0	+4.00	
JW 1	WASTE	50.26	1.5	1.0	+6.00	1977
JW 2	WASTE	169.64	4.0	1.0	+6.00	1977
JW 3	WASTE	402.12	7.5	1.0	+6.00	1977
JW 4	WASTE	1884.95	15.0	1.0	+6.00	
JW 5	WASTE	3141.59	25.0	1.0	+6.00	
JW 6	WASTE	4398.23	35.0	1.0	+6.00	
JW 7	WASTE	5654.87	45.0	1.0	+6.00	
JW 8	WASTE	10838.49	57.5	1.0	+6.00	
JW 9	WASTE	13665.93	72.5	1.0	+6.00	
JW 10	WASTE	16493.36	87.5	1.0	+6.00	
JW 11	WASTE	19320.79	102.5	1.0	+6.00	
JW 12	WASTE	30159.30	120.0	1.0	+6.00	
JW 13	WASTE	54663.71	145.0	1.0	+6.00	
BUP 1	WASTE	0.00	1.5	20.0	-10.00	
BUP 2	WASTE	0.00	4.0	20.0	-10.00	
BUP 3	WASTE	0.00	7.5	20.0	-10.00	
BUP 4	WASTE	0.00	15.0	20.0	-10.00	
BUP 5	WASTE	0.00	25.0	20.0	-10.00	
BUP 6	WASTE	0.00	35.0	20.0	-10.00	
BUP 7	WASTE	0.00	45.0	20.0	-10.00	
BUP 8	WASTE	0.00	57.5	20.0	-10.00	
BUP 9	WASTE	0.00	72.5	20.0	-10.00	
BUP10	WASTE	0.00	87.5	20.0	-10.00	
BUP11	WASTE	0.00	102.5	20.0	-10.00	
BUP12	WASTE	0.00	120.0	20.0	-10.00	
BUP13	WASTE	0.00	145.0	20.0	-10.00	
BDW 1	WAST2	0.00	1.5	0.0	-10.00	
BDW 2	WAST2	0.00	4.0	0.0	-10.00	
BDW 3	WAST2	0.00	7.5	0.0	-10.00	
BDW 4	WAST2	0.00	15.0	0.0	-10.00	
BDW 5	WAST2	0.00	25.0	0.0	-10.00	
BDW 6	WAST2	0.00	35.0	0.0	-10.00	
BDW 7	WAST2	0.00	45.0	0.0	-10.00	
BDW 8	WAST2	0.00	57.5	0.0	-10.00	
BDW 9	WAST2	0.00	72.5	0.0	-10.00	
BDW10	WAST2	0.00	87.5	0.0	-10.00	
BDW11	WAST2	0.00	102.5	0.0	-10.00	
BDW12	WAST2	0.00	120.0	0.0	-10.00	
BDW13	WAST2	0.00	145.0	0.0	-10.00	

CONNE	---	1--	NSEQ	---	2----	*--	ISOT	---	Dist1	----	*--	Dist2	----	*--	Area	Hor(0.)	/Ver(1.)	Link
BUP 1AW	1					2	1.E-10		1.00		25.13		1.					
BUP 2AW	2					2	1.E-10		1.00		84.82		1.					
BUP 3AW	3					2	1.E-10		1.00		201.06		1.					
BUP 4AW	4					2	1.E-10		1.00		942.48		1.					
BUP 5AW	5					2	1.E-10		1.00		1570.80		1.					
BUP 6AW	6					2	1.E-10		1.00		2199.11		1.					
BUP 7AW	7					2	1.E-10		1.00		2827.43		1.					
BUP 8AW	8					2	1.E-10		1.00		5419.25		1.					
BUP 9AW	9					2	1.E-10		1.00		6832.96		1.					
BUP10AW	10					2	1.E-10		1.00		8246.68		1.					
BUP11AW	11					2	1.E-10		1.00		9660.40		1.					
BUP12AW	12					2	1.E-10		1.00		15079.64		1.					
BUP13AW	13					2	1.E-10		1.00		27331.86		1.					
AW 1BW	1					2	1.00		1.00		25.13		1.					
AW 2BW	2					2	1.00		1.00		84.82		1.					
AW 3BW	3					2	1.00		1.00		201.06		1.					
AW 4BW	4					2	1.00		1.00		942.48		1.					

AW	5BW	5	2	1.00	1.00	1570.80	1.
AW	6BW	6	2	1.00	1.00	2199.11	1.
AW	7BW	7	2	1.00	1.00	2827.43	1.
AW	8BW	8	2	1.00	1.00	5419.25	1.
AW	9BW	9	2	1.00	1.00	6832.96	1.
AW	10BW	10	2	1.00	1.00	8246.68	1.
AW	11BW	11	2	1.00	1.00	9660.40	1.
AW	12BW	12	2	1.00	1.00	15079.64	1.
AW	13BW	13	2	1.00	1.00	27331.86	1.
BW	1CW	1	2	1.00	1.00	25.13	1.
BW	2CW	2	2	1.00	1.00	84.82	1.
BW	3CW	3	2	1.00	1.00	201.06	1.
BW	4CW	4	2	1.00	1.00	942.48	1.
BW	5CW	5	2	1.00	1.00	1570.80	1.
BW	6CW	6	2	1.00	1.00	2199.11	1.
BW	7CW	7	2	1.00	1.00	2827.43	1.
BW	8CW	8	2	1.00	1.00	5419.25	1.
BW	9CW	9	2	1.00	1.00	6832.96	1.
BW	10CW	10	2	1.00	1.00	8246.68	1.
BW	11CW	11	2	1.00	1.00	9660.40	1.
BW	12CW	12	2	1.00	1.00	15079.64	1.
BW	13CW	13	2	1.00	1.00	27331.86	1.
CW	1DW	1	2	1.00	1.00	25.13	1.
CW	2DW	2	2	1.00	1.00	84.82	1.
CW	3DW	3	2	1.00	1.00	201.06	1.
CW	4DW	4	2	1.00	1.00	942.48	1.
CW	5DW	5	2	1.00	1.00	1570.80	1.
CW	6DW	6	2	1.00	1.00	2199.11	1.
CW	7DW	7	2	1.00	1.00	2827.43	1.
CW	8DW	8	2	1.00	1.00	5419.25	1.
CW	9DW	9	2	1.00	1.00	6832.96	1.
CW	10DW	10	2	1.00	1.00	8246.68	1.
CW	11DW	11	2	1.00	1.00	9660.40	1.
CW	12DW	12	2	1.00	1.00	15079.64	1.
CW	13DW	13	2	1.00	1.00	27331.86	1.
DW	1EW	1	2	1.00	1.00	25.13	1.
DW	2EW	2	2	1.00	1.00	84.82	1.
DW	3EW	3	2	1.00	1.00	201.06	1.
DW	4EW	4	2	1.00	1.00	942.48	1.
DW	5EW	5	2	1.00	1.00	1570.80	1.
DW	6EW	6	2	1.00	1.00	2199.11	1.
DW	7EW	7	2	1.00	1.00	2827.43	1.
DW	8EW	8	2	1.00	1.00	5419.25	1.
DW	9EW	9	2	1.00	1.00	6832.96	1.
DW	10EW	10	2	1.00	1.00	8246.68	1.
DW	11EW	11	2	1.00	1.00	9660.40	1.
DW	12EW	12	2	1.00	1.00	15079.64	1.
DW	13EW	13	2	1.00	1.00	27331.86	1.
EW	1FW	1	2	1.00	1.00	25.13	1.
EW	2FW	2	2	1.00	1.00	84.82	1.
EW	3FW	3	2	1.00	1.00	201.06	1.
EW	4FW	4	2	1.00	1.00	942.48	1.
EW	5FW	5	2	1.00	1.00	1570.80	1.
EW	6FW	6	2	1.00	1.00	2199.11	1.
EW	7FW	7	2	1.00	1.00	2827.43	1.
EW	8FW	8	2	1.00	1.00	5419.25	1.
EW	9FW	9	2	1.00	1.00	6832.96	1.
EW	10FW	10	2	1.00	1.00	8246.68	1.
EW	11FW	11	2	1.00	1.00	9660.40	1.
EW	12FW	12	2	1.00	1.00	15079.64	1.
EW	13FW	13	2	1.00	1.00	27331.86	1.
FW	1GW	1	2	1.00	1.00	25.13	1.
FW	2GW	2	2	1.00	1.00	84.82	1.
FW	3GW	3	2	1.00	1.00	201.06	1.
FW	4GW	4	2	1.00	1.00	942.48	1.
FW	5GW	5	2	1.00	1.00	1570.80	1.
FW	6GW	6	2	1.00	1.00	2199.11	1.
FW	7GW	7	2	1.00	1.00	2827.43	1.
FW	8GW	8	2	1.00	1.00	5419.25	1.
FW	9GW	9	2	1.00	1.00	6832.96	1.
FW	10GW	10	2	1.00	1.00	8246.68	1.
FW	11GW	11	2	1.00	1.00	9660.40	1.
FW	12GW	12	2	1.00	1.00	15079.64	1.
FW	13GW	13	2	1.00	1.00	27331.86	1.
GW	1HW	1	2	1.00	1.00	25.13	1.
GW	2HW	2	2	1.00	1.00	84.82	1.
GW	3HW	3	2	1.00	1.00	201.06	1.
GW	4HW	4	2	1.00	1.00	942.48	1.
GW	5HW	5	2	1.00	1.00	1570.80	1.
GW	6HW	6	2	1.00	1.00	2199.11	1.
GW	7HW	7	2	1.00	1.00	2827.43	1.

GW	8HW	8	2	1.00	1.00	5419.25	1.
GW	9HW	9	2	1.00	1.00	6832.96	1.
GW	10HW	10	2	1.00	1.00	8246.68	1.
GW	11HW	11	2	1.00	1.00	9660.40	1.
GW	12HW	12	2	1.00	1.00	15079.64	1.
GW	13HW	13	2	1.00	1.00	27331.86	1.
HW	1IW	1	2	1.00	1.00	25.13	1.
HW	2IW	2	2	1.00	1.00	84.82	1.
HW	3IW	3	2	1.00	1.00	201.06	1.
HW	4IW	4	2	1.00	1.00	942.48	1.
HW	5IW	5	2	1.00	1.00	1570.80	1.
HW	6IW	6	2	1.00	1.00	2199.11	1.
HW	7IW	7	2	1.00	1.00	2827.43	1.
HW	8IW	8	2	1.00	1.00	5419.25	1.
HW	9IW	9	2	1.00	1.00	6832.96	1.
HW	10IW	10	2	1.00	1.00	8246.68	1.
HW	11IW	11	2	1.00	1.00	9660.40	1.
HW	12IW	12	2	1.00	1.00	15079.64	1.
HW	13IW	13	2	1.00	1.00	27331.86	1.
IW	1JW	1	2	1.00	1.00	25.13	1.
IW	2JW	2	2	1.00	1.00	84.82	1.
IW	3JW	3	2	1.00	1.00	201.06	1.
IW	4JW	4	2	1.00	1.00	942.48	1.
IW	5JW	5	2	1.00	1.00	1570.80	1.
IW	6JW	6	2	1.00	1.00	2199.11	1.
IW	7JW	7	2	1.00	1.00	2827.43	1.
IW	8JW	8	2	1.00	1.00	5419.25	1.
IW	9JW	9	2	1.00	1.00	6832.96	1.
IW	10JW	10	2	1.00	1.00	8246.68	1.
IW	11JW	11	2	1.00	1.00	9660.40	1.
IW	12JW	12	2	1.00	1.00	15079.64	1.
IW	13JW	13	2	1.00	1.00	27331.86	1.
JW	1BDW	1	2	1.00	1.E-10	25.13	1.
JW	2BDW	2	2	1.00	1.E-10	84.82	1.
JW	3BDW	3	2	1.00	1.E-10	201.06	1.
JW	4BDW	4	2	1.00	1.E-10	942.48	1.
JW	5BDW	5	2	1.00	1.E-10	1570.80	1.
JW	6BDW	6	2	1.00	1.E-10	2199.11	1.
JW	7BDW	7	2	1.00	1.E-10	2827.43	1.
JW	8BDW	8	2	1.00	1.E-10	5419.25	1.
JW	9BDW	9	2	1.00	1.E-10	6832.96	1.
JW	10BDW10	10	2	1.00	1.E-10	8246.68	1.
JW	11BDW11	11	2	1.00	1.E-10	9660.40	1.
JW	12BDW12	12	2	1.00	1.E-10	15079.64	1.
JW	13BDW13	13	2	1.00	1.E-10	27331.86	1.
AW	1AW	2	1	1.00	1.50	37.70	0.
AW	2AW	3	1	1.50	2.00	75.40	0.
AW	3AW	4	1	2.00	5.00	125.66	0.
AW	4AW	5	1	5.00	5.00	251.33	0.
AW	5AW	6	1	5.00	5.00	376.99	0.
AW	6AW	7	1	5.00	5.00	502.65	0.
AW	7AW	8	1	5.00	7.50	628.32	0.
AW	8AW	9	1	7.50	7.50	816.81	0.
AW	9AW	10	1	7.50	7.50	1005.31	0.
AW	10AW	11	1	7.50	7.50	1193.80	0.
AW	11AW	12	1	7.50	10.00	1382.30	0.
AW	12AW	13	1	10.00	15.00	1633.63	0.
BW	1BW	2	1	1.00	1.50	37.70	0.
BW	2BW	3	1	1.50	2.00	75.40	0.
BW	3BW	4	1	2.00	5.00	125.66	0.
BW	4BW	5	1	5.00	5.00	251.33	0.
BW	5BW	6	1	5.00	5.00	376.99	0.
BW	6BW	7	1	5.00	5.00	502.65	0.
BW	7BW	8	1	5.00	7.50	628.32	0.
BW	8BW	9	1	7.50	7.50	816.81	0.
BW	9BW	10	1	7.50	7.50	1005.31	0.
BW	10BW	11	1	7.50	7.50	1193.80	0.
BW	11BW	12	1	7.50	10.00	1382.30	0.
BW	12BW	13	1	10.00	15.00	1633.63	0.
CW	1CW	2	1	1.00	1.50	37.70	0.
CW	2CW	3	1	1.50	2.00	75.40	0.
CW	3CW	4	1	2.00	5.00	125.66	0.
CW	4CW	5	1	5.00	5.00	251.33	0.
CW	5CW	6	1	5.00	5.00	376.99	0.
CW	6CW	7	1	5.00	5.00	502.65	0.
CW	7CW	8	1	5.00	7.50	628.32	0.
CW	8CW	9	1	7.50	7.50	816.81	0.
CW	9CW	10	1	7.50	7.50	1005.31	0.
CW	10CW	11	1	7.50	7.50	1193.80	0.
CW	11CW	12	1	7.50	10.00	1382.30	0.
CW	12CW	13	1	10.00	15.00	1633.63	0.

DW	1DW	2	1	1.00	1.50	37.70	0.
DW	2DW	3	1	1.50	2.00	75.40	0.
DW	3DW	4	1	2.00	5.00	125.66	0.
DW	4DW	5	1	5.00	5.00	251.33	0.
DW	5DW	6	1	5.00	5.00	376.99	0.
DW	6DW	7	1	5.00	5.00	502.65	0.
DW	7DW	8	1	5.00	7.50	628.32	0.
DW	8DW	9	1	7.50	7.50	816.81	0.
DW	9DW	10	1	7.50	7.50	1005.31	0.
DW	10DW	11	1	7.50	7.50	1193.80	0.
DW	11DW	12	1	7.50	10.00	1382.30	0.
DW	12DW	13	1	10.00	15.00	1633.63	0.
EW	1EW	2	1	1.00	1.50	37.70	0.
EW	2EW	3	1	1.50	2.00	75.40	0.
EW	3EW	4	1	2.00	5.00	125.66	0.
EW	4EW	5	1	5.00	5.00	251.33	0.
EW	5EW	6	1	5.00	5.00	376.99	0.
EW	6EW	7	1	5.00	5.00	502.65	0.
EW	7EW	8	1	5.00	7.50	628.32	0.
EW	8EW	9	1	7.50	7.50	816.81	0.
EW	9EW	10	1	7.50	7.50	1005.31	0.
EW	10EW	11	1	7.50	7.50	1193.80	0.
EW	11EW	12	1	7.50	10.00	1382.30	0.
EW	12EW	13	1	10.00	15.00	1633.63	0.
FW	1FW	2	1	1.00	1.50	37.70	0.
FW	2FW	3	1	1.50	2.00	75.40	0.
FW	3FW	4	1	2.00	5.00	125.66	0.
FW	4FW	5	1	5.00	5.00	251.33	0.
FW	5FW	6	1	5.00	5.00	376.99	0.
FW	6FW	7	1	5.00	5.00	502.65	0.
FW	7FW	8	1	5.00	7.50	628.32	0.
FW	8FW	9	1	7.50	7.50	816.81	0.
FW	9FW	10	1	7.50	7.50	1005.31	0.
FW	10FW	11	1	7.50	7.50	1193.80	0.
FW	11FW	12	1	7.50	10.00	1382.30	0.
FW	12FW	13	1	10.00	15.00	1633.63	0.
GW	1GW	2	1	1.00	1.50	37.70	0.
GW	2GW	3	1	1.50	2.00	75.40	0.
GW	3GW	4	1	2.00	5.00	125.66	0.
GW	4GW	5	1	5.00	5.00	251.33	0.
GW	5GW	6	1	5.00	5.00	376.99	0.
GW	6GW	7	1	5.00	5.00	502.65	0.
GW	7GW	8	1	5.00	7.50	628.32	0.
GW	8GW	9	1	7.50	7.50	816.81	0.
GW	9GW	10	1	7.50	7.50	1005.31	0.
GW	10GW	11	1	7.50	7.50	1193.80	0.
GW	11GW	12	1	7.50	10.00	1382.30	0.
GW	12GW	13	1	10.00	15.00	1633.63	0.
HW	1HW	2	1	1.00	1.50	37.70	0.
HW	2HW	3	1	1.50	2.00	75.40	0.
HW	3HW	4	1	2.00	5.00	125.66	0.
HW	4HW	5	1	5.00	5.00	251.33	0.
HW	5HW	6	1	5.00	5.00	376.99	0.
HW	6HW	7	1	5.00	5.00	502.65	0.
HW	7HW	8	1	5.00	7.50	628.32	0.
HW	8HW	9	1	7.50	7.50	816.81	0.
HW	9HW	10	1	7.50	7.50	1005.31	0.
HW	10HW	11	1	7.50	7.50	1193.80	0.
HW	11HW	12	1	7.50	10.00	1382.30	0.
HW	12HW	13	1	10.00	15.00	1633.63	0.
IW	1IW	2	1	1.00	1.50	37.70	0.
IW	2IW	3	1	1.50	2.00	75.40	0.
IW	3IW	4	1	2.00	5.00	125.66	0.
IW	4IW	5	1	5.00	5.00	251.33	0.
IW	5IW	6	1	5.00	5.00	376.99	0.
IW	6IW	7	1	5.00	5.00	502.65	0.
IW	7IW	8	1	5.00	7.50	628.32	0.
IW	8IW	9	1	7.50	7.50	816.81	0.
IW	9IW	10	1	7.50	7.50	1005.31	0.
IW	10IW	11	1	7.50	7.50	1193.80	0.
IW	11IW	12	1	7.50	10.00	1382.30	0.
IW	12IW	13	1	10.00	15.00	1633.63	0.
JW	1JW	2	1	1.00	1.50	37.70	0.
JW	2JW	3	1	1.50	2.00	75.40	0.
JW	3JW	4	1	2.00	5.00	125.66	0.
JW	4JW	5	1	5.00	5.00	251.33	0.
JW	5JW	6	1	5.00	5.00	376.99	0.
JW	6JW	7	1	5.00	5.00	502.65	0.
JW	7JW	8	1	5.00	7.50	628.32	0.
JW	8JW	9	1	7.50	7.50	816.81	0.
JW	9JW	10	1	7.50	7.50	1005.31	0.

JW 10JW 11	1	7.50	7.50	1193.80	0.
JW 11JW 12	1	7.50	10.00	1382.30	0.
JW 12JW 13	1	10.00	15.00	1633.63	0.
WEL 2BW 1	1	0.50	1.00	12.566	0.
WEL 3CW 1	1	0.50	1.00	12.566	0.
WEL 4DW 1	1	0.50	1.00	12.566	0.
WEL 5EW 1	1	0.50	1.00	12.566	0.
WEL 6FW 1	1	0.50	1.00	12.566	0.
WEL 7GW 1	1	0.50	1.00	12.566	0.
WEL 8HW 1	1	0.50	1.00	12.566	0.
WEL 9IW 1	1	0.50	1.00	12.566	0.

GENER-----1---Pres-2-----*---3-----*---4-----*GX-5-----*EX-6-----*HG-7-----*---8-----*---9-----*-T-10

AW 1SIN 1			WATE 3.1932E-04	27800.	
AW 2SIN 2			WATE 1.0778E-03	27800.	
AW 3SIN 3			WATE 2.5549E-03	27800.	
AW 4SIN 4			WATE 0.01197602	27800.	
AW 5SIN 5			WATE 0.01996003	27800.	
AW 6SIN 6			WATE 0.02794392	27800.	
AW 7SIN 7			WATE 0.03592794	27800.	
AW 8SIN 8			WATE 0.06886199	27800.	
AW 9SIN 9			WATE 0.08682589	27800.	
AW 10SIN10			WATE 0.10478993	27800.	
AW 11SIN11			WATE 0.12275396	27800.	
AW 12SIN12			WATE 0.19161583	27800.	
AW 13SIN13			WATE 0.34730385	27800.	
WEL 2GAS 2	1		DELV 1.11E-09	98000.	1.
WEL 3GAS 3	1		DELV 1.11E-09	98100.	1.
WEL 4GAS 4	1		DELV 1.11E-09	98200.	1.
WEL 5GAS 5	1		DELV 1.11E-09	98300.	1.
WEL 6GAS 6	1		DELV 1.11E-09	98400.	1.
WEL 7GAS 7	1		DELV 1.11E-09	98500.	1.
WEL 8GAS 8	1		DELV 1.11E-09	98600.	1.
WEL 9GAS 9	1		DELV 1.11E-09	98700.	1.

INCON---1---Pres-2-----*---3-----*X2-4-----*---5-----*X3-6-----*---7-----*X4-8-----*---9-----*-T-10

AW 1 12 1	100024.33	10.11	0.00	0.00	30.486
WEL 2	100048.68	10.11	0.00	0.00	30.138
BW 1 12 1	100048.68	10.11	0.00	0.00	30.138
WEL 3	100073.02	10.11	0.00	0.00	30.031
CW 1 12 1	100073.02	10.11	0.00	0.00	30.031
WEL 4	100097.35	10.11	0.00	0.00	30.254
DW 1 12 1	100097.35	10.11	0.00	0.00	30.254
WEL 5	100121.68	10.11	0.00	0.00	30.928
EW 1 12 1	100121.68	10.11	0.00	0.00	30.928
WEL 6	100146.00	10.11	0.00	0.00	30.221
FW 1 12 1	100146.00	10.11	0.00	0.00	30.221
WEL 7	100170.29	10.11	0.00	0.00	30.360
GW 1 12 1	100170.29	10.11	0.00	0.00	30.360
WEL 8	100194.56	10.11	0.00	0.00	30.659
HW 1 12 1	100194.56	10.11	0.00	0.00	30.659
WEL 9	100218.79	10.11	0.00	0.00	30.542
IW 1 12 1	100218.79	10.11	0.00	0.00	30.542
JW 1 12 1	100242.96	10.068	0.00	0.00	30.550
BUP 1 12 1	100000.00	10.410	0.00	0.00	6.6
BDW 1 12 1	105184.00	.203E-05	0.00	0.00	20.0

START
ENDCY

Annexe B

Fichiers de sortie de TOUGH2-LGM

0 00 0 0 000 0000 0 0 0 0000 0 0 0 000 000 0 0 0 000 000 00 00000 0 00 0 0
0 0 0 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 00 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0000 0 0 0 0 0000 0 0 0 0000 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 00
0000 0 0 0 0 000 0 0 0000 0000 0 0000 00 0 000 000 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

LFM (MODIFIED VERSION OF TOUGH2) IS A PROGRAM FOR TWO-PHASE FOUR-COMPONENT FLOW IN PERMEABLE MEDIA, INCLUDING HEAT FLOW.
TOUGH2 IS A MEMBER OF THE MULKOM FAMILY OF CODES, DEVELOPED BY KARSTEN PRUESS AT LAWRENCE BERKELEY LABORATORY.

0 0000 0 0 000 0 0 0 0 0 0 00 00000 0 00 0 0 000 0 0 0 0
0 0 0 00 00 0 0 0 00 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0000 0 0 0 00 0 0 0 0 0 0 0000 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0
0000 0 0 0 0 000 0 0 0 00 0000 0 0 0 0 00 0 0

LFM IS A MODIFIED VERSION OF TOUGH2 (VERSION 1.0, AP.91) ADAPTED TO LANDFILL FLUIDS MIGRATION (LFM) MODELLING.
MODIFICATIONS DONE BY BY MIRO NASTEV AT LAVAL UNIVERSITY, QUEBEC, CANADA.

***** LFM - VERSION 3.2 (MARCH 1996) *****

PARAMETERS FOR FLEXIBLE DIMENSIONING OF MAJOR ARRAYS (MAIN PROGRAM) ARE AS FOLLOWS

MNEL = 4000 MNCON =10000 MNEQ = 5 MNK = 4 MNPH = 2 MNB = 6 MNOGN = 100 MGTAB = 5000

=====
MAXIMUM NUMBER OF VOLUME ELEMENTS (GRID BLOCKS): MNEL = 4000
MAXIMUM NUMBER OF CONNECTIONS (INTERFACES): MNCON = 10000
MAXIMUM LENGTH OF PRIMARY VARIABLE ARRAYS: MPRIM = 20000
MAXIMUM NUMBER OF GENERATION ITEMS (SINKS/SOURCES): MNOGN = 100
MAXIMUM NUMBER OF TABULAR (TIME-DEPENDENT) GENERATION DATA: MGTAB = 5000
LENGTH OF SECONDARY PARAMETER ARRAY: MSEC = 528000
MAXIMUM NUMBER OF JACOBIAN MATRIX ELEMENTS: MNZ = 600000

LARGE LINEAR EQUATION ARRAYS: LENGTH OF IRN IS LIRN = 1200000
LENGTH OF ICN AND CO IS LICN = 2400000
=====

SUMMARY OF DISK FILES

FILE *VERS* EXISTS -11- OPEN AS AN OLD FILE
FILE *MESH* EXISTS --4- OPEN AS AN OLD FILE
FILE *INCON* EXISTS --1- OPEN AS AN OLD FILE
FILE *GENER* EXISTS --3- OPEN AS AN OLD FILE
FILE *SAVE* EXISTS --7- OPEN AS AN OLD FILE
FILE *LINEQ* EXISTS -15- OPEN AS AN OLD FILE

FILE *cont.dat* EXISTS -20- OPEN AS AN OLD FILE
FILE *flux.dat* EXISTS -30- OPEN AS AN OLD FILE

=====

PROBLEM TITLE: Covered landfill 2D radial model with extraction wells

DOMAIN NO. 1 MATERIAL NAME -- WASTE

DOMAIN NO. 2 MATERIAL NAME -- WAST2

DOMAIN NO. 3 MATERIAL NAME -- WELLS

DOMAIN NO. 4 MATERIAL NAME -- ROCKF

DOMAIN NO. 5 MATERIAL NAME -- INTER

DOMAIN NO. 6 MATERIAL NAME -- PROTE

DOMAIN NO. 7 MATERIAL NAME -- PLOT2

DOMAIN NO. 8 MATERIAL NAME -- PLOT3

DOMAIN NO. 9 MATERIAL NAME -- CLCFR

DOMAIN NO. 10 MATERIAL NAME -- CLCSD

DOMAIN NO. 11 MATERIAL NAME -- BCTOP
ROCKS

WRITE FILE *MESH* FROM INPUT DATA

HAVE READ UNKNOWN BLOCK LABEL " " --- IGNORE THIS, AND CONTINUE READING INPUT DATA

HAVE READ UNKNOWN BLOCK LABEL " " --- IGNORE THIS, AND CONTINUE READING INPUT DATA

WRITE FILE *GENER* FROM INPUT DATA

AW 1SIN 1	1	WATE	0.3193E-030.2780E+05	0.
AW 2SIN 2	1	WATE	0.1078E-020.2780E+05	0.
AW 3SIN 3	1	WATE	0.2555E-020.2780E+05	0.
AW 4SIN 4	1	WATE	0.1198E-010.2780E+05	0.
AW 5SIN 5	1	WATE	0.1996E-010.2780E+05	0.
AW 6SIN 6	1	WATE	0.2794E-010.2780E+05	0.
AW 7SIN 7	1	WATE	0.3593E-010.2780E+05	0.
AW 8SIN 8	1	WATE	0.6886E-010.2780E+05	0.
AW 9SIN 9	1	WATE	0.8683E-010.2780E+05	0.
AW 10SIN10	1	WATE	0.1048 0.2780E+05	0.
AW 11SIN11	1	WATE	0.1228 0.2780E+05	0.
AW 12SIN12	1	WATE	0.1916 0.2780E+05	0.
AW 13SIN13	1	WATE	0.3473 0.2780E+05	0.
WEL 2GAS 2	1	DELV	0.1110E-080.9800E+05	1.000
WEL 3GAS 3	1	DELV	0.1110E-080.9810E+05	1.000
WEL 4GAS 4	1	DELV	0.1110E-080.9820E+05	1.000
WEL 5GAS 5	1	DELV	0.1110E-080.9830E+05	1.000
WEL 6GAS 6	1	DELV	0.1110E-080.9840E+05	1.000
WEL 7GAS 7	1	DELV	0.1110E-080.9850E+05	1.000
WEL 8GAS 8	1	DELV	0.1110E-080.9860E+05	1.000
WEL 9GAS 9	1	DELV	0.1110E-080.9870E+05	1.000

GENER ZAVRSI

WRITE FILE *INCON* FROM INPUT DATA
 HAVE READ UNKNOWN BLOCK LABEL " " --- IGNORE THIS, AND CONTINUE READING INPUT DATA
 ROCKS

```
*****
*                               *
*          EVALUATE FLOATING POINT ARITHMETIC          *
*                               *
* FLOATING POINT PROCESSOR HAS APPROXIMATELY 15 SIGNIFICANT DIGITS *
*                               *
* DEFAULT VALUE OF INCREMENT FACTOR FOR NUMERICAL DERIVATIVES IS DFAC = 0.1051E-07 *
* DEFAULT VALUE FOR DFAC WILL BE USED                 *
*                               *
*****
```

MESH HAS 164 ELEMENTS (138 ACTIVE) AND 271 CONNECTIONS (INTERFACES) BETWEEN THEM
 GENER HAS 21 SINKS/SOURCES

TOUGH2 INPUT DATA

PROBLEM TITLE: Covered lndfill 2D radial model with extraction wells

PROBLEM SPECIFICATIONS

NOITE	KDATA	MCYC	MSEC	MCYPR	MOP	DIPF0	TEXP	BE
8	3	999999	0	9999	0000201000000000271000094	0.1000E+01	0.1800E+01	0.0000E+00

diffusion: LAI

TSTART	TIMAX	DELTEN	DELTMX	ELST	GF	REDLT	SCALE
0.0000E+00	0.1893E+10	0.1000E+04	0.0000E+00		0.9810E+01	0.1400E+01	0.1000E+01

A CONSTANT TIME STEP OF DELTEN IS PRESCRIBED

RE1	RE2	U	WUP	WNR	DFAC	FOR
0.1000E-04	0.1000E+01	0.1000E+00	0.1000E+01	0.1000E+01	0.1051E-07	0.1000E+01

DEFAULT VALUES FOR PRIMARY VARIABLES

P-DEP(1)	X-DEP(2)	XCH4-DEP(3)	XCO2-DEP(4)	T-DEP(5)
0.10000000E+06	0.10580000E+02	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.50000000E+01

ROCK PROPERTIES

DOMAIN	MAT	DENSITY	POROSITY	CONDUCTIVITY	HEAT CAP	COMPR	EXPAN
1	WASTE	0.7600E+03	0.5000E+00	0.1840E+00	0.1333E+04	0.0000E+00	0.0000E+00
	PERM1	PERM2	PERM3				
	0.6000E-11	0.1000E-11	0.1000E-11				
DOMAIN	MAT	DENSITY	POROSITY	CONDUCTIVITY	HEAT CAP	COMPR	EXPAN
2	WAST2	0.7600E+03	0.5000E+00	0.1000E-10	0.1333E+04	0.0000E+00	0.0000E+00
	PERM1	PERM2	PERM3 ...				

ELEMENTS

ELEMENT	MATERIAL	VOLUME	HEAT LOSS AREA	TIME OF DEPOS.
AW 1	1	0.5026E+02	0.0000E+00	0.0
AW 2	1	0.1696E+03	0.0000E+00	0.0
AW 3	1	0.4021E+03	0.0000E+00	0.0
AW 4	1	0.1885E+04	0.0000E+00	0.0
AW 5	1	0.3142E+04	0.0000E+00	0.0
AW 6	1	0.4398E+04	0.0000E+00	0.0
AW 7	1	0.5655E+04	0.0000E+00	0.0
AW 8	1	0.1084E+05	0.0000E+00	0.0
AW 9	1	0.1367E+05	0.0000E+00	0.0
AW 10	1	0.1649E+05	0.0000E+00	0.0
AW 11	1	0.1932E+05	0.0000E+00	0.0
AW 12	1	0.3016E+05	0.0000E+00	0.0
AW 13	1	0.5466E+05	0.0000E+00	0.0
WEL 2	3	0.6280E+01	0.0000E+00	1.0
BW 1	1	0.5026E+02	0.0000E+00	1.0
BW 2	1	0.1696E+03	0.0000E+00	1.0
BDW 1	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW 2	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW 3	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW 4	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW 5	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW 6	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW 7	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW 8	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW 9	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW10	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW11	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW12	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0
BDW13	2	0.0000E+00	0.0000E+00	-10.0

CONNECTIONS

ELEM1	ELEM2	ISOT	DEL1	DEL2	AREA	BETA
BUP 1	AW 1	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.2513E+02	0.1000E+01
BUP 2	AW 2	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.8482E+02	0.1000E+01
BUP 3	AW 3	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.2011E+03	0.1000E+01
BUP 4	AW 4	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.9425E+03	0.1000E+01
BUP 5	AW 5	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.1571E+04	0.1000E+01
BUP 6	AW 6	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.2199E+04	0.1000E+01
BUP 7	AW 7	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.2827E+04	0.1000E+01
BUP 8	AW 8	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.5419E+04	0.1000E+03
BUP 9	AW 9	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.6833E+04	0.1000E+01
BUP10	AW 10	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.8247E+04	0.1000E+01
BUP11	AW 11	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.9660E+04	0.1000E+01
BUP12	AW 12	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.1508E+05	0.1000E+01
BUP13	AW 13	2	0.1000E-09	0.1000E+01	0.2733E+05	0.1000E+01
AW 1	BW 1	2	0.1000E+01	0.1000E+01	0.2513E+02	0.1000E+01
AW 2	BW 2	2	0.1000E+01	0.1000E+01	0.8482E+02	0.1000E+01

JW 5	JW 6	1	0.5000E+01	0.5000E+01	0.3770E+03	0.0000E+00
JW 6	JW 7	1	0.5000E+01	0.5000E+01	0.5026E+03	0.0000E+00
JW 7	JW 8	1	0.5000E+01	0.7500E+01	0.6283E+03	0.0000E+00
JW 8	JW 9	1	0.7500E+01	0.7500E+01	0.8168E+03	0.0000E+00
JW 9	JW 10	1	0.7500E+01	0.7500E+01	0.1005E+04	0.0000E+00
JW 10	JW 11	1	0.7500E+01	0.7500E+01	0.1194E+04	0.0000E+00
JW 11	JW 12	1	0.7500E+01	0.1000E+02	0.1382E+04	0.0000E+00
JW 12	JW 13	1	0.1000E+02	0.1500E+02	0.1634E+04	0.0000E+00
WEL 2	BW 1	1	0.5000E+00	0.1000E+01	0.1257E+02	0.0000E+00
WEL 3	CW 1	1	0.5000E+00	0.1000E+01	0.1257E+02	0.0000E+00
WEL 4	DW 1	1	0.5000E+00	0.1000E+01	0.1257E+02	0.0000E+00
WEL 5	EW 1	1	0.5000E+00	0.1000E+01	0.1257E+02	0.0000E+00
WEL 6	FW 1	1	0.5000E+00	0.1000E+01	0.1257E+02	0.0000E+00
WEL 7	GW 1	1	0.5000E+00	0.1000E+01	0.1257E+02	0.0000E+00
WEL 8	HW 1	1	0.5000E+00	0.1000E+01	0.1257E+02	0.0000E+00
WEL 9	IW 1	1	0.5000E+00	0.1000E+01	0.1257E+02	0.0000E+00

GENERATION DATA

ELEMENT	SOURCE	RATE	ENTHALPY
AW 1	SIN 1	0.3193E-03	0.2780E+05

CONSTANT RATE IS SPECIFIED

ELEMENT	SOURCE	RATE	ENTHALPY
---------	--------	------	----------

WELL ON DELIVERABILITY \$\$\$\$\$\$ OPEN IN 1 LAYERS \$\$\$\$\$\$

ELEMENT	SOURCE	PI	PWB	DEL(Z)
WEL 2	GAS 2	0.1110E-08	0.9800E+05	0.1000E+01
WEL 3	GAS 3	0.1110E-08	0.9810E+05	0.1000E+01
WEL 4	GAS 4	0.1110E-08	0.9820E+05	0.1000E+01
WEL 5	GAS 5	0.1110E-08	0.9830E+05	0.1000E+01
WEL 6	GAS 6	0.1110E-08	0.9840E+05	0.1000E+01
WEL 7	GAS 7	0.1110E-08	0.9850E+05	0.1000E+01
WEL 8	GAS 8	0.1110E-08	0.9860E+05	0.1000E+01
WEL 9	GAS 9	0.1110E-08	0.9870E+05	0.1000E+01

INITIAL CONDITIONS

ELEMENT	POROSITY	X1-Pres.	X2-Sg	X3-CH4	X4-CO2	X5-Temp.
AW 1	0.5000E+00	0.100024E+06	0.1011E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3049E+02
AW 2	0.5000E+00	0.100024E+06	0.1011E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3049E+02
AW 3	0.5000E+00	0.100024E+06	0.1011E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3049E+02
AW 4	0.5000E+00	0.100024E+06	0.1011E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3049E+02
AW 5	0.5000E+00	0.100024E+06	0.1011E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3049E+02
AW 6	0.5000E+00	0.100024E+06	0.1011E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3049E+02
BDW 9	0.5000E+00	0.105184E+06	0.2030E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02
BDW10	0.5000E+00	0.105184E+06	0.2030E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02
BDW11	0.5000E+00	0.105184E+06	0.2030E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02
BDW12	0.5000E+00	0.105184E+06	0.2030E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02
BDW13	0.5000E+00	0.105184E+06	0.2030E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02

 END OF INPUT DATA

 * ARRAY *MOP* ALLOWS TO GENERATE MORE PRINTOUT IN VARIOUS SUBROUTINES, AND TO MAKE SOME CALCULATIONAL CHOICES. *

MOP(1) = 0 *** ALLOWS TO GENERATE A SHORT PRINTOUT FOR EACH NEWTON-RAPHSON ITERATION
 = 0, 1, OR 2: GENERATE 0, 1, OR 2 LINES OF PRINTOUT
 MORE PRINTOUT IS GENERATED FOR MOP(I) > 0 IN THE FOLLOWING SUBROUTINES (THE LARGER MOP IS, THE MORE WILL BE PRINTED).

MOP(2) = 0 *** CYCIT MOP(3) = 0 *** MULTI MOP(4) = 0 *** QU MOP(5) = 2 *** EOS MOP(6) = 0 *** LINEQ

MOP(7) = 1 *** IF UNEQUAL ZERO, WILL GENERATE A PRINTOUT OF INPUT DATA
 CALCULATIONAL CHOICES OFFERED BY MOP ARE AS FOLLOWS:

MOP(9) = 0 *** CHOOSES FLUID COMPOSITION ON WITHDRAWAL (PRODUCTION).
 = 0: ACCORDING TO RELATIVE MOBILITIES.
 = 1: ACCORDING TO COMPOSITION IN PRODUCING ELEMENT.

MOP(10) = 0 *** CHOOSES INTERPOLATION FORMULA FOR DEPENDENCE OF THERMAL CONDUCTIVITY ON LIQUID SATURATION (SL).
 = 0: $K = K_{DRY} + \sqrt{SL} * (K_{WET} - K_{DRY})$
 = 1: $K = K_{DRY} + SL * (K_{WET} - K_{DRY})$

MOP(11) = 0 *** CHOOSES EVALUATION OF MOBILITY AND ABSOLUTE PERMEABILITY AT INTERFACES.
 = 0: MOBILITIES ARE UPSTREAM WEIGHTED WITH WUP. (DEFAULT IS WUP = 1.0). PERMEABILITY IS UPSTREAM WEIGHTED.
 = 1: MOBILITIES ARE AVERAGED BETWEEN ADJACENT ELEMENTS. PERMEABILITY IS UPSTREAM WEIGHTED.
 = 2: MOBILITIES ARE UPSTREAM WEIGHTED WITH WUP. (DEFAULT IS WUP = 1.0). PERMEABILITY IS HARMONIC WEIGHTED.
 = 3: MOBILITIES ARE AVERAGED BETWEEN ADJACENT ELEMENTS. PERMEABILITY IS HARMONIC WEIGHTED.
 = 4: MOBILITY * PERMEABILITY PRODUCT IS HARMONIC WEIGHTED.

MOP(12) = NOT VALID (MODIFIED TO A REAL STEP FUNCTION)
 = 0 *** CHOOSES PROCEDURE FOR INTERPOLATING GENERATION RATES FROM A TIME TABLE.
 = 0: TRIPLE LINEAR INTERPOLATION.
 = 1: "STEP FUNCTION" OPTION.

MOP(14) = 0 *** SPECIFIES THE HANDLING OF PIVOT FAILURES IN THE LINEAR EQUATION SOLUTION
 = 0: PERFORM NEW MATRIX DECOMPOSITION AFTER PIVOT FAILURE
 > 0: IGNORE PIVOT FAILURE AND PROCEED

MOP(15) = 0 *** ALLOWS TO SELECT A SEMI-ANALYTICAL HEAT EXCHANGE CALCULATION WITH CONFINING BEDS.
 = 0: NO SEMI-ANALYTICAL HEAT EXCHANGE
 > 0: SEMI-ANALYTICAL HEAT EXCHANGE ENGAGED (WHEN A SPECIAL SUBROUTINE MODULE *QLOSS* IS PRESENT)

MOP(16) = 2 *** PERMITS TO CHOOSE TIME STEP SELECTION OPTION
 = 0: USE TIME STEPS EXPLICITLY PROVIDED AS INPUT.
 > 0: INCREASE TIME STEP BY AT LEAST A FACTOR 2, IF CONVERGENCE OCCURS IN .LE. MOP(16) ITERATIONS.

MOP(17) = 7 *** HANDLES SCALING OPTIONS.
 = 0: NO SCALING.
 = 7: SCALING.

MOP(18) = 1 *** ALLOWS TO SELECT HANDLING OF INTERFACE DENSITY.
 = 0: PERFORM UPSTREAM WEIGHTING FOR INTERFACE DENSITY.
 > 0: COMPUTE INTERFACE DENSITY AS AVERAGE OF THE TWO GRID BLOCK DENSITIES.
 HOWEVER, WHEN ONE OF THE TWO PHASE SATURATIONS IS ZERO, DO UPSTREAM WEIGHTING.

MOP(22) = 0 *** WRITE LGM PARAMETERS ONTO DISK FILE *TRACE* AFTER EACH TIME STEP.
 = 0: NO DATA PRINTED ONTO *TRACE*.
 > 0: DATA PRINTED ONTO FILE *TRACE*.

MOP(23) = 9 *** SCREEN DATA PRINTING.
 = 0: NO DATA PRINTED ON THE SCREEN.
 = 9: MORE PRINTOUT

MOP(24) = 4 *** LFM COMPUTATION OPTIONS.
 = 0: NO METHANE, CARBON DIOXIDE OR HEAT PRODUCTION(NO CALLS TO CCHPR).
 = 4: LANDFILL GAS AND HEAT PRODUCTION (CCHPR).

 * LGMEOS3 : EQUATION OF STATE FOR WATER AND THREE-COMPONENT AIR MIXTURES *

OPTIONS SELECTED ARE: (NK,NEQ,NPH,NB) = (4,5,2, 6)

NK = 4 - NUMBER OF FLUID COMPONENTS
 NEQ = 5 - NUMBER OF EQUATIONS PER GRID BLOCK
 NPH = 2 - NUMBER OF PHASES THAT CAN BE PRESENT
 NB = 6 - NUMBER OF SECONDARY PARAMETERS (OTHER THAN COMPONENT MASS FRACTIONS)

AVAILABLE OPTIONS ARE: (NK,NEQ,NPH,NB) = (4,5,2,6) - WATER, THREE-COMP.AIR (CH4, CO2 and N2), NON-ISOTHERMAL
 (4,4,2,6) - WATER AND THREE-COMP.AIR (CH4, CO2 and N2) ISOTHERMAL
 CAN USE WITH OPTION MOP(24)=1
 (4,3,2,6) - WATER AND THREE-COMP.AIR (CONS.CH4&CO2FRACTION), ISOTHERMAL
 USE WITH THE OPTION MOP(24)=0

 THE PRIMARY VARIABLES ARE

1) P: PRESSURE 2) X: AIR MASS FRACTION 3) XCH4: CH4 MASS FRACTION IN AIR 4) XCO2: CO2 MASS FRACTION IN AIR 5) T: TEMPERATURE
 2) Sg+10.-(GAS SAT+10.)

PHASE CONDITION	PRIMARY VARIABLES
SINGLE-PHASE GAS	P, X, XCH4, XCO2, T
SINGLE-PHASE LIQUID	P, X, XCH4, XCO2, T
TWO-PHASE	P, S+10., XCH4, XCO2, T

```

*****
CHOICES BY WAY OF THE MOP-ARRAY ARE NOT ALLOWED IN LGMEOS3.

MOP(19) = 0 *** DOES NOT ALLOW INITIALIZATION WITH DIFFERENT SETS OF PRIMARY VARIABLES.
          = 0: (P,X,XCH4,XCO2,T) FOR SINGLE PHASE, (P,S+10,XCH4'XCO2,T) FOR TWO-XPHASE
          = 1: SAME PRIMARY VARIABLES BUT WARNING ISSUED

..... NEGLECT VAPOR PRESSURE LOWERING .....

*****
ELEMENT=AW 1 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=AW 2 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=AW 3 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=AW 4 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=AW 5 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=AW 6 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=AW 7 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=AW 8 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=AW 9 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=AW 10 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
...
ELEMENT=JW 9 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=JW 10 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=JW 11 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=JW 12 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=JW 13 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP 1 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP 2 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP 3 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP 4 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP 5 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP 6 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP 7 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP 8 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP 9 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP10 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP11 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP12 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
ELEMENT=BUP13 INITIALIZATION: TWO PHASE COND.
t= 20.000000000000 HCN2= 1.3759193938539D-10 HCCH4= 2.5295096064773D-10
HCCO2= 6.9055287194519D-09
ELEMENT=BDW 1 INITIALIZATION: ONE PHASE - LIQUID
XMOLH2O= 0.99999873713715 XMOLN2= 1.2628628472433D-06 XMOLCH4= 0.
XMOLCO2= 0. HCN2= 1.3759193938539D-10 HCCH4= 2.5295096064773D-10 HCCO2=
6.9055287194519D-09
pn2 9178.3199865079 pch4 0. pco2 0. pair 9178.3199865079 T
20.000000000000 ps 96005.680013492 psat 2336.5615495546
...
XMOLH2O= 0.99999873713715 XMOLN2= 1.2628628472433D-06 XMOLCH4= 0.
XMOLCO2= 0. HCN2= 1.3759193938539D-10 HCCH4= 2.5295096064773D-10 HCCO2=
6.9055287194519D-09
pn2 9178.3199865079 pch4 0. pco2 0. pair 9178.3199865079 T
20.000000000000 ps 96005.680013492 psat 2336.5615495546

```

***** VOLUME- AND MASS-BALANCES *****

[KCYC,ITER] = [0, 0] THE TIME IS 0.00000E+00 SECONDS, 0.00000E+00 DAYS, 0.00000 YEARS

INITIAL MASS IN PLACE : gas 0.961583E+05 kg; [(N2G 0.935159E+05 kg CH4G 0.000000E+00 kg CO2G 0.000000E+00 kg VAPOR 0.264239E+04 kg)]
liquid 0.716000E+09 kg; [(N2L 0.131000E+05 kg CH4L 0.000000E+00 kg CO2L 0.000000E+00 kg WATER 0.715987E+09 kg)]
TOTAL 0.716096E+09 kg; [(N2 0.106616E+06 kg CH4 0.000000E+00 kg CO2 0.000000E+00 kg WATER 0.715990E+09 kg)]

CURRENT MASS IN PLACE : gas 0.961583E+05 kg; [(N2G 0.935159E+05 kg CH4G 0.000000E+00 kg CO2G 0.000000E+00 kg VAPOR 0.264239E+04 kg)]
liquid 0.716000E+09 kg; [(N2L 0.131000E+05 kg CH4L 0.000000E+00 kg CO2L 0.000000E+00 kg WATER 0.715987E+09 kg)]
TOTAL 0.716096E+09 kg; [(N2 0.106616E+06 kg CH4 0.000000E+00 kg CO2 0.000000E+00 kg WATER 0.715990E+09 kg)]

Table with columns: WEL (well ID), (well number), (well number), SumTim (sum time), (unit), (year), (day), dT (delta T), (unit), T (temperature), (unit), P (pressure), (unit), Sg (saturation), (unit), CH4 (mass fraction), (unit), CO2 (mass fraction), (unit). Rows include well data for WEL 2, 9, and AW 7-13.

OUTPUT DATA AFTER (480, 2)-2-TIME STEPS THE TIME IS 0.36525E+03 D OR 1.0 Y

TOTAL TIME KCYC ITER ITERC KON DX1M DX2M DX3M DXM4 DXM5 MAX. RES. NER KER DELTEX
0.31558E+08 480 2 1421 2 0.50804E+00 0.10366E-03 0.49810E-04 0.11497E-03 0.11662E-01 0.22516E-05 112 4 0.72618E+05

Table with columns: ELEM. INDEX, P (PA), T (DEG-C), SG (%), X-AIRG (N2&CH4&CO2 MASS FR), X-AIRL (MOLE FRACT IN GASEOUS PHASE), M-N2G, M-CH4G, M-CO2G, M-H2OG, N2 (MASS FRACT IN X-AIRL), CH4, CO2, Dgas (kg/m3), PCAP (Pa), Krelg, Krell. Rows include well data for AW 1-4.

AW	5	5	100091.43	15.24	0.23E+00	0.99E+00	0.69E-03	0.23E+00	0.41E+00	0.34E+00	0.17E-01	0.81E-02	0.15E-01	0.98E+00	0.12E+01	-0.15E+05	0.47E+00	0.95E-04
AW	6	6	100103.43	15.30	0.23E+00	0.99E+00	0.71E-03	0.21E+00	0.42E+00	0.35E+00	0.17E-01	0.71E-02	0.15E-01	0.98E+00	0.12E+01	-0.15E+05	0.47E+00	0.95E-04
BUP13	151	100000.00	6.60	0.41E+00	0.99E+00	0.29E-04	0.99E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.97E-02	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.12E+01	-0.17E+06	0.65E+00	0.42E-06	
BDW	1	152	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW	2	153	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW	3	154	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW	4	155	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW	5	156	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW	6	157	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW	7	158	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW	8	159	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW	9	160	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW10	161	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW11	162	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW12	163	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	
BDW13	164	105184.00	20.00	0.00E+00	0.00E+00	0.20E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.10E+01	

#####

#####

OUTPUT DATA AFTER (480, 2)-2-TIME STEPS

THE TIME IS 0.36525E+03 D OR 1.0 Y

ELEM1	ELEM2	INDEX	HFLUX (W)	GFLUX (kg/s)	LFLUX (kg/s)	N2TF (kg/s)	N2DF (kg/s)	CH4T (kg/s)	CH4DF (kg/s)	CO2TF (kg/s)	CO2DF (kg/s)	CH4LF (kg/s)	CO2LF (kg/s)	
BUP	1	AW 1	1	0.36846E+02	-1.13660E-03	0.29589E-03	-1.13949E-03	-4.44840E-05	0.12789E-05	0.12789E-05	0.23102E-05	0.23102E-05	0.67373E-09	0.46274E-07
BUP	2	AW 2	2	0.14775E+03	-2.26943E-03	0.99966E-03	-2.28644E-03	-2.2524E-04	0.63891E-05	0.63891E-05	0.11798E-04	0.11798E-04	0.33726E-08	0.23433E-06
BUP	3	AW 3	3	0.41053E+03	-1.15425E-03	0.23734E-02	-2.2825E-03	-9.6087E-04	0.25460E-04	0.25460E-04	0.48320E-04	0.48320E-04	0.13568E-07	0.94771E-06
BUP	4	AW 4	4	0.22751E+04	0.17718E-02	0.11163E-01	-6.4812E-04	-6.5840E-03	0.56288E-03	0.18492E-03	0.12483E-02	0.35429E-03	0.10016E-06	0.68160E-05
BUP	5	AW 5	5	0.40860E+04	0.48874E-02	0.18633E-01	-2.3652E-04	-1.2245E-02	0.14997E-02	0.34551E-03	0.33472E-02	0.66031E-03	0.18780E-06	0.12559E-04
BUP	6	AW 6	6	0.58919E+04	0.79680E-02	0.26102E-01	-1.13038E-04	-1.7668E-02	0.24360E-02	0.49906E-03	0.54424E-02	0.95365E-03	0.27155E-06	0.18068E-04
FW	5	GW 5	83	-8.3621E+03	0.19172E-02	-9.1129E-02	-2.28405E-10	-1.13210E-09	0.57369E-03	0.22910E-07	0.12880E-02	-3.5409E-09	-8.9546E-07	-4.8387E-05
FW	6	GW 6	84	-1.1296E+04	0.29060E-02	-1.2765E-01	-1.5223E-10	-1.2462E-09	0.86961E-03	0.31566E-07	0.19524E-02	0.40789E-09	-1.2557E-06	-6.7850E-05
FW	7	GW 7	85	-1.4067E+04	0.39791E-02	-1.6414E-01	-8.9188E-11	-1.2163E-09	0.11908E-02	0.40547E-07	0.26734E-02	0.10501E-08	-1.6157E-06	-8.7303E-05
FW	8	GW 8	86	-2.6091E+04	0.80614E-02	-3.1423E-01	-6.6465E-11	-1.8650E-09	0.24126E-02	0.77971E-07	0.54162E-02	0.27462E-08	-3.0947E-06	-1.6720E-04
FW	9	GW 9	87	-3.2391E+04	0.10483E-01	-3.9695E-01	-4.5439E-11	-2.0824E-09	0.31375E-02	0.98508E-07	0.70433E-02	0.38496E-08	-3.9105E-06	-2.1128E-04
FW	10	GW 10	88	-3.8662E+04	0.12872E-01	-4.7896E-01	-3.6037E-11	-2.3421E-09	0.38526E-02	0.11910E-06	0.86485E-02	0.49259E-08	-4.7192E-06	-2.5497E-04
FW	11	GW 11	89	-4.5024E+04	0.15224E-01	-5.6115E-01	-3.2271E-11	-2.6348E-09	0.45566E-02	0.13959E-06	0.10229E-01	0.59951E-08	-5.5294E-06	-2.9874E-04
FW	12	GW 12	90	-7.0009E+04	0.23914E-01	-8.7602E-01	-4.1366E-11	-4.0126E-09	0.71575E-02	0.21801E-06	0.16067E-01	0.95766E-08	-8.6325E-06	-4.6638E-04
FW	13	GW 13	91	-1.2659E+05	0.43497E-01	-1.5877E+00	-6.6273E-11	-7.1683E-09	0.13019E-01	0.39522E-06	0.29224E-01	0.17582E-07	-1.5646E-05	-8.4527E-04
GW	1	HW 1	92	-2.2233E+02	0.32374E-04	-2.1605E-03	-3.1307E-13	-2.3702E-12	0.96925E-05	0.66672E-09	0.21742E-04	-1.5642E-09	-2.0989E-08	-1.1352E-06
JW	12	JW 13	263	0.64421E+01	0.34568E-04	0.30078E-05	0.15383E-14	-7.2614E-17	0.10411E-04	0.35562E-11	0.23305E-04	0.45181E-11	0.31263E-10	0.17353E-08
WEL	2	BW 1	264	0.30121E+03	0.19007E-02	-1.7591E-05	0.71095E-03	0.16914E-08	0.34919E-03	-4.4818E-10	0.80133E-03	-4.2729E-10	-1.1458E-10	-6.7473E-09
WEL	3	CW 1	265	0.30904E+03	0.16881E-02	-3.3524E-05	0.57188E-04	0.12109E-09	0.48747E-03	0.20142E-09	0.10976E-02	0.45028E-09	-3.1700E-10	-1.7449E-08
WEL	4	DW 1	266	0.29434E+03	0.15564E-02	-3.9505E-05	0.10773E-05	0.20110E-11	0.46520E-03	0.11721E-09	0.10452E-02	0.26287E-09	-3.8051E-10	-2.0667E-08
WEL	5	EW 1	267	0.28227E+03	0.14802E-02	-4.1174E-05	0.34859E-07	0.62929E-13	0.44253E-03	0.94081E-10	0.99408E-03	0.21047E-09	-3.9521E-10	-2.1392E-08
WEL	6	FW 1	268	0.27215E+03	0.14293E-02	-4.2478E-05	0.17781E-08	0.28942E-14	0.42743E-03	0.71239E-10	0.95997E-03	0.15849E-09	-4.0857E-10	-2.2124E-08
WEL	7	GW 1	269	0.26447E+03	0.13911E-02	-4.2883E-05	0.11497E-09	0.18006E-15	0.41618E-03	0.66322E-10	0.93432E-03	0.14696E-09	-4.1328E-10	-2.2379E-08
WEL	8	HW 1	270	0.25920E+03	0.13668E-02	-4.2211E-05	0.86849E-11	0.12534E-16	0.40918E-03	0.75112E-10	0.91792E-03	0.16636E-09	-4.0783E-10	-2.2083E-08
WEL	9	IW 1	271	0.25906E+03	0.13886E-02	-3.9126E-05	0.78034E-12	0.99762E-18	0.41646E-03	0.97433E-10	0.93312E-03	0.21637E-09	-3.8220E-10	-2.0791E-08

#####

***** FLUX FOR MASS-BALANCES *****

OUTPUT DATA AFTER (480, 2)-2-TIME STEPS

THE TIME IS 0.36525E+03 D OR 1.0 Y

ELEM1	ELEM2	INDEX	T.HFLUX (J)	GFLUX kg	N2GF kg	CH4GF kg	CO2GF kg	VAPFLUX kg	LIQFLUX kg	N2LF kg	CH4LF kg	CO2LF kg	H2OF kg
BUP 1	AW 1	1	0.24844E+10	-.39459E+04	-.40817E+04	0.45145E+02	0.80144E+02	-.15526E+02	0.12215E+05	0.21186E+00	0.25557E-01	0.15292E+01	0.12213E+05
BUP 2	AW 2	2	0.90966E+10	-.73217E+04	-.80728E+04	0.22628E+03	0.40844E+03	-.15562E+02	0.41300E+05	0.63978E+00	0.12828E+00	0.76727E+01	0.41291E+05
BUP 3	AW 3	3	0.23368E+11	-.22805E+04	-.54023E+04	0.89338E+03	0.16450E+04	0.55665E+02	0.98150E+05	0.11526E+01	0.51121E+00	0.30222E+02	0.98118E+05
BUP 4	AW 4	4	0.12066E+12	0.64540E+05	-.12449E+04	0.19534E+05	0.41414E+05	0.13277E+04	0.46134E+06	0.35386E+01	0.35324E+01	0.19920E+03	0.46113E+06
BUP 5	AW 5	5	0.21006E+12	0.16452E+06	0.75746E+03	0.49335E+05	0.10497E+06	0.30996E+04	0.76971E+06	0.48874E+01	0.65235E+01	0.36123E+03	0.76933E+06
BUP 6	AW 6	6	0.29924E+12	0.26322E+06	0.19470E+04	0.79053E+05	0.16824E+06	0.48554E+04	0.10780E+07	0.64100E+01	0.94060E+01	0.51797E+03	0.10774E+07
BUP 7	AW 7	7	0.38766E+12	0.35672E+06	0.24029E+04	0.10741E+06	0.22853E+06	0.65318E+04	0.13862E+07	0.79981E+01	0.12247E+02	0.67272E+03	0.13855E+07
JW 6	BDW 6	136	-.18514E+12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.11590E+07	-.44892E+00	-.12154E+02	-.59896E+03	-.11583E+07
JW 7	BDW 7	137	-.23828E+12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.14921E+07	-.58621E+00	-.15659E+02	-.77123E+03	-.14913E+07
JW 8	BDW 8	138	-.45707E+12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.28627E+07	-.11375E+01	-.30060E+02	-.14797E+04	-.28612E+07
JW 9	BDW 9	139	-.57681E+12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.36136E+07	-.14454E+01	-.37957E+02	-.18680E+04	-.36117E+07
JW 10	BDW10	140	-.69627E+12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.43623E+07	-.17517E+01	-.45831E+02	-.22551E+04	-.43600E+07
JW 11	BDW11	141	-.81576E+12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.51112E+07	-.20565E+01	-.53705E+02	-.26423E+04	-.51085E+07
JW 12	BDW12	142	-.12736E+13	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.79800E+07	-.32150E+01	-.83854E+02	-.41254E+04	-.79758E+07
JW 13	BDW13	143	-.23083E+13	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.14464E+08	-.58316E+01	-.15199E+03	-.74772E+04	-.14456E+08

TOTAL MASS IN			0.00000E+00	0.13548E+05	0.18802E+05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.31088E+02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
TOTAL MASS OUT			-.17933E+14	-.10877E+08	-.96186E+05	-.32771E+07	-.69716E+07	-.19731E+06	-.82007E+08	-.23907E+03	-.79914E+03	-.41292E+05	-.81964E+08

***** MASS EXTRACTED/INJECTED BY WELLS *****

OUTPUT DATA AFTER (480, 2)-2-TIME STEPS

THE TIME IS 0.36525E+03 D OR 1.0 Y

ELEMENT	SOURCE	INDEX	GENERATION RATE (kg/s) OR (W)	ENTHALPY (J/kg)	FRACTIONAL FF(gas)	FLOWS FF(liq)	P (WB) (Pa)	***** UP TO DATE EXTRACTED/INJECTED MASS IN (kg) *****					
								TOTAL	N2	CH4	CO2	H2O	
AW 1	SIN 1	1	0.31930E-03	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.10076E+05
AW 2	SIN 2	2	0.10780E-02	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.34019E+05
AW 3	SIN 3	3	0.25550E-02	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.80630E+05
AW 4	SIN 4	4	0.11980E-01	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.37806E+06
AW 5	SIN 5	5	0.19960E-01	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.62989E+06

AW 12	SIN12	12	0.19160E+00	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.60464E+07
AW 13	SIN13	13	0.34730E+00	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.10960E+08
WEL 2	GAS 2	14	Gas-0.19031E-02	0.15994E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98000E+05	-0.55386E+05	-0.19677E+05	-0.10718E+05	-0.23616E+05	-0.13744E+04	
WEL 3	GAS 3	15	Gas-0.16900E-02	0.18385E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98100E+05	-0.48590E+05	-0.17302E+04	-0.14467E+05	-0.31028E+05	-0.13658E+04	
WEL 4	GAS 4	16	Gas-0.15581E-02	0.18957E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98200E+05	-0.44800E+05	-0.49209E+03	-0.13723E+05	-0.29290E+05	-0.12951E+04	
WEL 5	GAS 5	17	Gas-0.14818E-02	0.19114E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98300E+05	-0.42774E+05	-0.46986E+03	-0.13115E+05	-0.27926E+05	-0.12630E+04	
WEL 6	GAS 6	18	Gas-0.14308E-02	0.19079E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98400E+05	-0.41534E+05	-0.47586E+03	-0.12763E+05	-0.27087E+05	-0.12077E+04	
WEL 7	GAS 7	19	Gas-0.13926E-02	0.19052E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98500E+05	-0.40674E+05	-0.47383E+03	-0.12522E+05	-0.26497E+05	-0.11821E+04	
WEL 8	GAS 8	20	Gas-0.13683E-02	0.19013E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98600E+05	-0.40213E+05	-0.47179E+03	-0.12414E+05	-0.26151E+05	-0.11756E+04	
WEL 9	GAS 9	21	Gas-0.13901E-02	0.18726E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98700E+05	-0.41097E+05	-0.47107E+03	-0.12754E+05	-0.26686E+05	-0.11855E+04	

&&&& TOTAL (IN/OUT) ENERGY (in J): 0.82992E+12 TOTAL (IN/OUT) GAS MASS (in kg):-0.35507E+06 -0.24261E+05 -0.10248E+06 -0.21828E+06 -0.10049E+05
TOTAL (IN/OUT) LIQUID MASS (in kg): 0.32250E+08 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.32250E+08

ZAPOCNUVA SUBROTINE PLOT

***** VOLUME- AND MASS-BALANCES *****

[KCYC,ITER] = [480, 2] THE TIME IS 0.31558E+08 SECONDS, 0.36525E+03 DAYS, 1.00000 YEARS

INITIAL MASS IN PLACE : gas 0.961583E+05 kg; [(N2G 0.935159E+05 kg CH4G 0.000000E+00 kg CO2G 0.000000E+00 kg VAPOR 0.264239E+04 kg)]
liquid 0.716000E+09 kg; [(N2L 0.131000E+05 kg CH4L 0.000000E+00 kg CO2L 0.000000E+00 kg WATER 0.715987E+09 kg)]
TOTAL 0.716096E+09 kg; [(N2 0.106616E+06 kg CH4 0.000000E+00 kg CO2 0.000000E+00 kg WATER 0.715990E+09 kg)]

CURRENT MASS IN PLACE : gas 0.153510E+06 kg; [(N2G 0.445165E+04 kg CH4G 0.446432E+05 kg CO2G 0.100566E+06 kg VAPOR 0.384902E+04 kg)]
liquid 0.666447E+09 kg; [(N2L 0.303116E+03 kg CH4L 0.671174E+04 kg CO2L 0.374357E+06 kg WATER 0.666065E+09 kg)]
TOTAL 0.666600E+09 kg; [(N2 0.475477E+04 kg CH4 0.513549E+05 kg CO2 0.474923E+06 kg WATER 0.666069E+09 kg)]

MASS PRODUCED (IN) : gas 0.111379E+08 kg; [(N2G 0.000000E+00 kg CH4G 0.343174E+07 kg CO2G 0.770616E+07 kg VAPOR 0.000000E+00 kg)]

MASS TO WELLS (IN/OUT) : gas -0.355067E+06 kg; [(N2G-0.242612E+05 kg CH4G-0.102476E+06 kg CO2G-0.218281E+06 kg VAPOR-0.100492E+05 kg)]
liquid 0.322504E+08 kg; [(N2L 0.000000E+00 kg CH4L 0.000000E+00 kg CO2L 0.000000E+00 kg WATER 0.322504E+08 kg)]

MASS FROM LIMITS (IN) : gas 0.188328E+05 kg; [(N2G 0.188017E+05 kg CH4G 0.000000E+00 kg CO2G 0.000000E+00 kg VAPOR 0.310877E+02 kg)]
liquid 0.000000E+00 kg; [(N2L 0.000000E+00 kg CH4L 0.000000E+00 kg CO2L 0.000000E+00 kg WATER 0.000000E+00 kg)]
TOTAL 0.188328E+05 kg; [(N2 0.188017E+05 kg CH4 0.000000E+00 kg CO2 0.000000E+00 kg WATER 0.310877E+02 kg)]

MASS TO LIMITS (OUT) : gas -0.105422E+08 kg; [(N2G-0.961864E+05 kg CH4G-0.327709E+07 kg CO2G-0.697162E+07 kg VAPOR-0.197306E+06 kg)]
liquid -0.820066E+08 kg; [(N2L-0.239067E+03 kg CH4L-0.799137E+03 kg CO2L-0.412917E+05 kg WATER-0.819643E+08 kg)]
TOTAL -0.925488E+08 kg; [(N2 -0.964255E+05 kg CH4 -0.327789E+07 kg CO2 -0.701291E+07 kg WATER-0.821616E+08 kg)]

DIFFERENCE IN MASS : TOTAL -0.721874E+03 kg; [(N2 -0.238342E+02 kg CH4 0.127584E+02 kg CO2 0.519828E+02 kg WATER-0.762781E+03 kg)]
DIFFERENCE IN % : TOTAL -0.000099 %; [(N2 -0.019004 % CH4 0.000372 % CO2 0.000675 % WATER -0.000107 %)]

ENERGY (HEAT) : in: 0.000000E+00 J out: -.179326E+14 J produced: 0.524369E+13 J to wells: 0.829920E+12 J BALLANCE: -.118590E+14 J (-.226157E+03 %)

WEL 9(481, 2) SumTim=.31652003E+08 s [1 y 1.09 d] dT=0.94403E+05 s T=30.46 (oC) P= 98749.7 (Pa) Sg=0.112 % CH4=.34417E+07 CO2=.77286E+07 (kg)
AW 1(482, 3) SumTim=.31774727E+08 s [1 y 2.51 d] dT=0.12272E+06 s T=14.29 (oC) P= 99893.0 (Pa) Sg=0.224 % CH4=.34547E+07 CO2=.77577E+07 (kg)
AW 3(483, 3) SumTim=.31897451E+08 s [1 y 3.93 d] dT=0.12272E+06 s T=14.76 (oC) P= 99996.8 (Pa) Sg=0.225 % CH4=.34677E+07 CO2=.77869E+07 (kg)
WEL 9(484, 2) SumTim=.32020175E+08 s [1 y 5.35 d] dT=0.12272E+06 s T=30.46 (oC) P= 98749.6 (Pa) Sg=0.112 % CH4=.34806E+07 CO2=.78160E+07 (kg)
AW 1(485, 3) SumTim=.32179716E+08 s [1 y 7.20 d] dT=0.15954E+06 s T=14.23 (oC) P= 99892.8 (Pa) Sg=0.224 % CH4=.34975E+07 CO2=.78539E+07 (kg)
AW 2(486, 3) SumTim=.32339257E+08 s [1 y 9.05 d] dT=0.15954E+06 s T=14.43 (oC) P= 99942.9 (Pa) Sg=0.224 % CH4=.35144E+07 CO2=.78917E+07 (kg)
AW 1(487, 3) SumTim=.32498798E+08 s [1 y 10.89 d] dT=0.15954E+06 s T=14.18 (oC) P= 99892.7 (Pa) Sg=0.224 % CH4=.35312E+07 CO2=.79295E+07 (kg)
...
WEL 8(1065, 3) SumTim=.43122878E+09 s [13 y 242.82 d] dT=0.21994E+07 s T=29.92 (oC) P= 98631.5 (Pa) Sg=0.223 % CH4=.33876E+08 CO2=.76070E+08 (kg)
WEL 2(1066, 3) SumTim=.43342819E+09 s [13 y 268.28 d] dT=0.21994E+07 s T=14.89 (oC) P= 98048.2 (Pa) Sg=0.218 % CH4=.33991E+08 CO2=.76330E+08 (kg)
WEL 7(1067, 3) SumTim=.43562760E+09 s [13 y 293.74 d] dT=0.21994E+07 s T=30.79 (oC) P= 98532.1 (Pa) Sg=0.229 % CH4=.34107E+08 CO2=.76589E+08 (kg)
WEL 4(1068, 3) SumTim=.43782701E+09 s [13 y 319.19 d] dT=0.21994E+07 s T=25.49 (oC) P= 98236.6 (Pa) Sg=0.229 % CH4=.34221E+08 CO2=.76846E+08 (kg)
WEL 8(1069, 3) SumTim=.44002642E+09 s [13 y 344.65 d] dT=0.21994E+07 s T=29.84 (oC) P= 98631.4 (Pa) Sg=0.223 % CH4=.34336E+08 CO2=.77103E+08 (kg)
WEL 9(1070, 2) SumTim=.44180640E+09 s [14 y 0.00 d] dT=0.17800E+07 s T=27.77 (oC) P= 98732.4 (Pa) Sg=0.203 % CH4=.34428E+08 CO2=.77310E+08 (kg)

OUTPUT DATA AFTER (1070, 2)-2-TIME STEPS

THE TIME IS 0.51135E+04 D OR

14.0 Y

Separator line of asterisks

TOTAL TIME KCYC ITER ITERC KON DX1M DX2M DX3M DX4M DX5M MAX. RES. NER KER DELTEX
0.44181E+09 1070 2 3180 2 0.17695E+01 0.49427E-04 0.74703E-03 0.16540E-02 0.24675E-01 0.88424E-05 112 4 0.17800E+07

Separator line of asterisks

Table with columns: ELEM. INDEX, P (PA), T (DEG-C), SG %, X-AIRG, X-AIRL, M-N2G, M-CH4G, M-CO2G, M-H2OG, N2 (MASS FRACT IN X-AIRL), CH4, CO2, Dgas (kg/m3), PCAP (Pa), Krelg, Krell. Rows include AW 1-7 and BDW10-13.

Separator line of asterisks

Separator line of asterisks

OUTPUT DATA AFTER (1070, 2)-2-TIME STEPS

THE TIME IS 0.51135E+04 D OR

14.0 Y

Table with columns: ELEM1, ELEM2, INDEX, HFLUX (W), GFLUX (kg/s), LFLUX (kg/s), N2TF (kg/s), N2DF (kg/s), CH4T (kg/s), CH4DF (kg/s), CO2TF (kg/s), CO2DF (kg/s), CH4LF (kg/s), CO2LF (kg/s). Rows include BUP 1-5 and WEL 2-9.

Separator line of asterisks

Separator line of asterisks

OUTPUT DATA AFTER (1070, 2)-2-TIME STEPS

THE TIME IS 0.51135E+04 D OR 14.0 Y

ELEM1	ELEM2	INDEX	T.HPLUX (J)	GFLUX kg	N2GF kg	CH4GF kg	CO2GF kg	VAPFLUX kg	LIQFLUX kg	N2LF kg	CH4LF kg	CO2LF kg	H2OF kg
BUP 1	AW 1	1	0.69756E+10	-.70497E+05	-.71253E+05	0.34323E+03	0.60583E+03	-.40028E+03	0.13398E+06	0.31072E+01	0.20114E+00	0.13814E+02	0.13396E+06
BUP 2	AW 2	2	0.32989E+11	-.15488E+06	-.15980E+06	0.16870E+04	0.30469E+04	-.84269E+03	0.45248E+06	0.99022E+01	0.98882E+00	0.68974E+02	0.45240E+06
BUP 3	AW 3	3	0.10285E+12	-.15739E+06	-.18053E+06	0.68403E+04	0.12758E+05	-.71272E+03	0.10735E+07	0.20326E+02	0.40309E+01	0.28626E+03	0.10732E+07
BUP 4	AW 4	4	0.61962E+12	0.34670E+06	-.70549E+05	0.11892E+06	0.25663E+06	0.45849E+04	0.50405E+07	0.65566E+02	0.35054E+02	0.25155E+04	0.50379E+07
BUP 5	AW 5	5	0.11569E+13	0.14276E+07	-.17884E+05	0.41972E+06	0.92929E+06	0.15138E+05	0.84071E+07	0.73563E+02	0.78850E+02	0.55159E+04	0.84014E+07
BUP 6	AW 6	6	0.16969E+13	0.25083E+07	-.70308E+04	0.73544E+06	0.16328E+07	0.25791E+05	0.11773E+08	0.88458E+02	0.11879E+03	0.82307E+04	0.11765E+08
JW 5	BDW 5	135	-.54581E+12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.21413E+07	-.31261E+00	-.22632E+02	-.12181E+04	-.21401E+07
JW 6	BDW 6	136	-.76491E+12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.30026E+07	-.44892E+00	-.31768E+02	-.17092E+04	-.30009E+07
JW 7	BDW 7	137	-.98367E+12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.38627E+07	-.58621E+00	-.40896E+02	-.21997E+04	-.38604E+07
JW 8	BDW 8	138	-.18845E+13	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.73968E+07	-.11375E+01	-.78356E+02	-.42134E+04	-.73926E+07
JW 9	BDW 9	139	-.23800E+13	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.93610E+07	-.14454E+01	-.99201E+02	-.53346E+04	-.93556E+07
JW 10	BDW10	140	-.28730E+13	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.11307E+08	-.11307E+01	-.11985E+03	-.64450E+04	-.11300E+08
JW 11	BDW11	141	-.33660E+13	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.13250E+08	-.20565E+01	-.14046E+03	-.75531E+04	-.13242E+08
JW 12	BDW12	142	-.52548E+13	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.20687E+08	-.32150E+01	-.21931E+03	-.11793E+05	-.20675E+08
JW 13	BDW13	143	-.95237E+13	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-.37495E+08	-.58316E+01	-.39752E+03	-.21376E+05	-.37473E+08
#####													
& TOTAL MASS IN &			0.00000E+00	0.38277E+06	0.52664E+06	0.00000E+00	0.00000E+00	0.19557E+04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
& TOTAL MASS OUT&			-.93152E+09	-.11163E+09	-.96896E+05	-.32859E+08	-.73055E+08	-.11257E+07	-.54121E+09	-.28535E+04	-.57456E+04	-.37731E+06	-.54083E+09
#####													

MASS EXTRACTED/INJECTED BY WELLS

OUTPUT DATA AFTER (1070, 2)-2-TIME STEPS

THE TIME IS 0.51135E+04 D OR 14.0 Y

ELEMENT	SOURCE	INDEX	GENERATION RATE (kg/s) OR (W)	ENTHALPY (J/kg)	FRACTIONAL FP(gas)	FLOWS FF(liq)	P (WB) (Pa)	##### UP TO DATE EXTRACTED/INJECTED MASS IN (kg) #####					
								TOTAL	N2	CH4	CO2	H2O	
AW 1	SIN 1	1	0.31930E-03	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.14107E+06
AW 2	SIN 2	2	0.10780E-02	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.47627E+06
AW 3	SIN 3	3	0.25550E-02	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.11288E+07
AW 4	SIN 4	4	0.11980E-01	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.52928E+07
AW 5	SIN 5	5	0.19960E-01	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.88185E+07
AW 6	SIN 6	6	0.27940E-01	0.27800E+05	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.12344E+08
WEL 2	GAS 2	14	Gas-0.18136E-02	0.12074E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98000E+05	-0.83895E+06	-0.42916E+06	-0.12065E+06	-0.27763E+06	-0.11506E+05	
WEL 3	GAS 3	15	Gas-0.16758E-02	0.14203E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98100E+05	-0.76959E+06	-0.85287E+05	-0.20534E+06	-0.46353E+06	-0.15433E+05	
WEL 4	GAS 4	16	Gas-0.15916E-02	0.16260E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98200E+05	-0.71808E+06	-0.72015E+04	-0.21373E+06	-0.47889E+06	-0.18252E+05	
WEL 5	GAS 5	17	Gas-0.14969E-02	0.17797E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98300E+05	-0.67820E+06	-0.99507E+03	-0.20307E+06	-0.45442E+06	-0.19714E+05	
WEL 6	GAS 6	18	Gas-0.14235E-02	0.18683E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98400E+05	-0.65049E+06	-0.53936E+03	-0.19461E+06	-0.43532E+06	-0.20024E+05	
WEL 7	GAS 7	19	Gas-0.13692E-02	0.18874E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98500E+05	-0.63043E+06	-0.48389E+03	-0.18865E+06	-0.42185E+06	-0.19441E+05	
WEL 8	GAS 8	20	Gas-0.13297E-02	0.18388E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98600E+05	-0.61723E+06	-0.47372E+03	-0.18507E+06	-0.41361E+06	-0.18079E+05	
WEL 9	GAS 9	21	Gas-0.13207E-02	0.17352E+06	0.10000E+01	0.00000E+00	0.98700E+05	-0.62156E+06	-0.47153E+03	-0.18705E+06	-0.41774E+06	-0.16294E+05	
##### TOTAL (IN/OUT) ENERGY (in J):				0.11583E+14	TOTAL (IN/OUT) GAS MASS (in kg):			-0.55245E+07	-0.52462E+06	-0.14982E+07	-0.33630E+07	-0.13874E+06	
ZAPOCNUVA SUBROUTINE PLOT					TOTAL (IN/OUT) LIQUID MASS (in kg):			0.45151E+09	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.45151E+09	

VOLUME- AND MASS-BALANCES

[KCYC,ITER] = [1070, 2]

THE TIME IS 0.44181E+09 SECONDS, 0.51135E+04 DAYS, 14.00000 YEARS

INITIAL MASS IN PLACE : gas 0.961583E+05 kg; [(N2G 0.935159E+05 kg CH4G 0.000000E+00 kg CO2G 0.000000E+00 kg VAPOR 0.264239E+04 kg)]
liquid 0.716000E+09 kg; [(N2L 0.131000E+05 kg CH4L 0.000000E+00 kg CO2L 0.000000E+00 kg WATER 0.715987E+09 kg)]
TOTAL 0.716096E+09 kg; [(N2 0.106616E+06 kg CH4 0.000000E+00 kg CO2 0.000000E+00 kg WATER 0.715990E+09 kg)]

CURRENT MASS IN PLACE : gas 0.202157E+06 kg; [(N2G 0.828578E+04 kg CH4G 0.581960E+05 kg CO2G 0.131272E+06 kg VAPOR 0.440313E+04 kg)]
liquid 0.625791E+09 kg; [(N2L 0.624404E+03 kg CH4L 0.657633E+04 kg CO2L 0.383798E+06 kg WATER 0.625400E+09 kg)]
TOTAL 0.625993E+09 kg; [(N2 0.891018E+04 kg CH4 0.647724E+05 kg CO2 0.515070E+06 kg WATER 0.625404E+09 kg)]

MASS PRODUCED (IN) : gas 0.111738E+09 kg; [(N2G 0.000000E+00 kg CH4G 0.344280E+08 kg CO2G 0.773100E+08 kg VAPOR 0.000000E+00 kg)]

MASS TO WELLS (IN/OUT) : gas -0.552452E+07 kg; [(N2G-0.524617E+06 kg CH4G-0.149817E+07 kg CO2G-0.336299E+07 kg VAPOR-0.138744E+06 kg)]
liquid 0.451505E+09 kg; [(N2L 0.000000E+00 kg CH4L 0.000000E+00 kg CO2L 0.000000E+00 kg WATER 0.451505E+09 kg)]

MASS FROM LIMITS (IN) : gas 0.528594E+06 kg; [(N2G 0.526639E+06 kg CH4G 0.000000E+00 kg CO2G 0.000000E+00 kg VAPOR 0.195569E+04 kg)]
liquid 0.000000E+00 kg; [(N2L 0.000000E+00 kg CH4L 0.000000E+00 kg CO2L 0.000000E+00 kg WATER 0.000000E+00 kg)]
TOTAL 0.528594E+06 kg; [(N2 0.526639E+06 kg CH4 0.000000E+00 kg CO2 0.000000E+00 kg WATER 0.195569E+04 kg)]

MASS TO LIMITS (OUT) : gas -0.107136E+09 kg; [(N2G-0.968962E+05 kg CH4G-0.328593E+08 kg CO2G-0.730546E+08 kg VAPOR-0.112567E+07 kg)]
liquid -0.541215E+09 kg; [(N2L-0.285354E+04 kg CH4L-0.574558E+04 kg CO2L-0.377314E+06 kg WATER-0.540829E+09 kg)]
TOTAL -0.648351E+09 kg; [(N2 -0.997497E+05 kg CH4 -0.328650E+08 kg CO2 -0.734319E+08 kg WATER-0.541955E+09 kg)]

DIFFERENCE IN MASS : TOTAL -0.722355E+03 kg; [(N2 -0.220865E+02 kg CH4 0.120458E+02 kg CO2 0.502884E+02 kg WATER-0.762603E+03 kg)]
DIFFERENCE IN % : TOTAL -0.000087 %; [(N2 -0.003488 % CH4 0.000035 % CO2 0.000065 % WATER -0.000107 %)]

ENERGY (HEAT) : in: 0.000000E+00 J out: -.931517E+14 J produced: 0.526059E+14 J to wells: 0.115826E+14 J BALLANCE: -.289632E+14 J (-.550568E+02 %)

#####

#####

TU AS FAIT UN BON TRAVAIL MON PIPO PREFERE

WRITE FILE *SAVE* AFTER 1392 TIME STEPS --- THE TIME IS 0.189345E+10 SECONDS

*
* SUMMARY OF PROGRAM UNITS USED *
*

UNIT VERSION DATE COMMENTS

IO	1.0	MARCH	1995	OPEN FILES VERS, MESH, INCON, GENER, SAVE, LINEQ, TABLE, XAMD, XAMDF, PLOT, TRACE
TOUGH-LGM1.1		31 OCTOBER	1993	MAIN PROGRAM FROM TOUGH2 VERSION 1.0 (29 MARCH 1991)
INPUT	1.0	MARCH	1995	READ ALL DATA PROVIDED THROUGH FILE *INPUT*
FLOP	1.0	11 APRIL	1991	CALCULATE NUMBER OF SIGNIFICANT DIGITS FOR FLOATING POINT ARITHMETIC
RFILE	1.2	MARCH	1995	INITIALIZE DATA FROM FILES *MESH* OR *MINC*, *GENER*, *INCON* AND *XAMD*
INDATA	1.2	29 SEPTEMBER	1993	PROVIDE PRINTOUT OF MOST DATA PROVIDED THROUGH FILE *INPUT*
CYCIT	1.0	MARCH	1995	EXECUTIVE ROUTINE FOR MARCHING IN TIME
EOS	1.0	MARCH	1995	*LGMEOS3 * ... THERMOPHYSICAL PROPERTIES MODULE FOR WATER/THREE-COMPONENT AIR
SAT	1.0	22 JANUARY	1990	STEAM TABLE EQUATION: SATURATION PRESSURE AS FUNCTION OF TEMPERATURE
HENRY	1.0	25 FEBRUARY	1993	HENRY'S LAW TO CALCULATE NCG BUBBLING PRESSURE OR DISSOLVED NCG MASS FRACTION
COWAT	1.0	22 JANUARY	1990	LIQUID WATER DENSITY AND INT. ENERGY AS FUNCTION OF TEMPERATURE AND PRESSURE
SUPST	1.0	29 JANUARY	1990	VAPOR DENSITY AND INTERNAL ENERGY AS FUNCTION OF TEMPERATURE AND PRESSURE
VISW	1.0	22 JANUARY	1990	VISCOSITY OF LIQUID WATER AS FUNCTION OF TEMPERATURE AND PRESSURE
VISCOSITY1.0		26 MARCH	1995	VISCOSITY OF GAS MIXTURE H2O, CO2, CH4 & N2, FOR GIVEN TEMPERATURE
RELP	1.1	MARCH	1995	LIQUID AND GAS PHASE RELATIVE PERMEABILITIES AS FUNCTIONS OF SATURATION
PCAP	1.0	4 MARCH	1991	CAPILLARY PRESSURE AS FUNCTION OF SATURATION
SHEAT	1.0	13 JUNE	1995	CALCULATES SPECIFIC HEAT Cv VALUES FOR GASES FOR GIVEN TEMP.
BALLAN	1.0	AVRIL	1995	PERFORM SUMMARY BALANCES FOR VOLUME, MASS, AND ENERGY
TSTEP	1.0	MARCH	1995	ADJUST TIME STEPS TO COINCIDE WITH USER-DEFINED TARGET TIMES
MULTI	1.2	4 OCTOBER	1993	ASSEMBLE ALL ACCUMULATION AND FLOW TERMS
CCHPR	1.0	MARCH	1995	*LGM SUBROUTINE: CH4, CO2 and HEAT PRODUCTION RATES
QU	1.0	22 JANUARY	1990	ASSEMBLE ALL SOURCE AND SINK TERMS
DIFF	1.0	22 MARCH	1995	DIFFUSION COEFFICIENTS FOR BINARY GAS MIXTURES AS FUNCTION OF TEMPERATURE
LINEQ	1.0	22 JANUARY	1990	INTERFACE FOR THE LINEAR EQUATION SOLVER MA28
MC19A				HARWELL SUBROUTINE FOR SCALING MATRIX
LGBAL	1.0	29 DECEMBER	1995	PRINT RESULTS FOR ELEMENTS, CONNECTIONS, AND SINKS/SOURCES
CONVER	1.0	4 MARCH	1991	UPDATE PRIMARY VARIABLES AFTER CONVERGENCE IS ACHIEVED
OUT	1.2	29 SEPTEMBER	1993	PRINT RESULTS FOR ELEMENTS, CONNECTIONS, AND SINKS/SOURCES
PLOT	1.0	20 OCTOBER	1993	WRITES SCALAR AND VECTOR DATA ONTO DISK FILE *PLOT*
WRIFI	1.0	22 JANUARY	1990	AT THE COMPLETION OF A TOUGH2 RUN, WRITE PRIMARY VARIABLES ON FILE *SAVE*

Annexe C

**Fichiers d'entrée pour l'abaque de la qualité des biogaz
(crépine de 4/5^{ème} de hauteur du site pour 1,5 kPa de succion
dans le puits)**

Fraction molaire CH4 p16m

r 10m				Rayon site 10m	Fraction Molaire total	
Sans				m3/ton		
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser			
wel2	0.17	0.000041964	7.13388E-06	7.215935171	42.46371274	
wel3	0.32	0.000056801	1.81763E-05	5.481023199	39.95682182	
wel4	0.46	0.000060826	2.798E-05	3.162275295	34.59258184	
wel5	0.51	0.000047509	2.42296E-05	1.824474132	27.83442318	
wel6	0.52	0.000030763	1.59968E-05	1.052630004	20.63493929	
wel7	0.52	0.000011725	0.000006097	0.607314681	14.09457758	
wel8	0.52	0.000025408	1.32122E-05	0.35039009	7.612653588	
wel9	0.53	0.000037469	1.98586E-05			
Total	3.55	0.000312465	42.46371274			

10 ans						
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser			
wel2	0.13	0.000031038	4.03494E-06			
wel3	0.27	0.000044417	1.19926E-05			
wel4	0.43	0.0000514	0.00002102			
wel5	0.5	0.000040296	0.000020148			
wel6	0.52	0.000023177	1.2052E-05			
wel7	0.52	2.6952E-06	1.4015E-06			
wel8	0.52	0.000016513	8.58676E-06			
wel9	0.52	0.000028283	1.47072E-05			
Total	42.625	0.000237819	39.95682182			

20ans						
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser			
wel2	0.078	0.000017499	1.36492E-06			
wel3	0.19	0.000027428	5.21132E-06			
wel4	0.36	0.000036132	1.30075E-05			
wel5	0.47	0.000028829	1.35496E-05			
wel6	0.51	0.000011133	5.67783E-06			
wel7	0.51	-1.418E-07	-7.2318E-08			
wel8	0.52	2.8864E-06	1.39693E-06			
wel9	0.53	0.000014172	7.51116E-06			
Total	39.6	0.000137738	34.59258184			

30ans						
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser			
wel2	0.047	0.000010069	4.73243E-07			
wel3	0.13	0.000017199	2.23587E-06			
wel4	0.29	0.000025488	7.39152E-06			
wel5	0.43	0.000020683	8.89369E-06			
wel6	0.49	2.8005E-06	1.37225E-06			
wel7	0.5	-8.1889E-08	-4.09445E-08			
wel8	0.52	-7.7507E-08	-4.03038E-08			
wel9	0.53	3.5411E-06	1.87678E-06			
Total	36.7125	7.96212E-05	27.83442318			

40ans						
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser			
wel2	0.027	5.7876E-06	1.58265E-07			
wel3	0.084	0.000010509	8.82756E-07			
wel4	0.22	0.000016756	3.68632E-06			
wel5	0.37	0.000013106	4.84922E-06			
wel6	0.44	-4.7329E-08	-2.08248E-08			
wel7	0.47	-4.7254E-08	-2.22094E-08			
wel8	0.49	-4.4698E-08	-2.1902E-08			
wel9	0.51	-4.4678E-08	-2.27858E-08			
Total	32.6375	4.59746E-05	20.63493929			

50ans						
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser			
wel2	0.016	3.3272E-06	5.32352E-08			
wel3	0.052	6.2371E-06	3.24329E-07			
wel4	0.15	0.000010138	1.5207E-06			
wel5	0.27	7.0281E-06	1.89759E-06			
wel6	0.35	-2.7448E-08	-9.60715E-09			
wel7	0.4	-2.7389E-08	-1.09556E-08			
wel8	0.43	-2.5897E-08	-1.11357E-08			
wel9	0.45	-2.587E-08	-1.16415E-08			
Total	26.475	2.66238E-05	14.09457758			

60ans						
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser			
wel2	0.0094	1.9263E-06	1.81072E-08			
wel3	0.032	8.0782E-06	2.58502E-07			
wel4	0.095	3.6993E-06	3.51339E-07			
wel5	0.19	3.7729E-06	7.16851E-07			
wel6	0.26	-1.5903E-08	-4.13478E-09			
wel7	0.3	-1.5908E-08	-4.7724E-09			
wel8	0.33	-1.5067E-08	-4.97211E-09			
wel9	0.35	-1.5058E-08	-5.2703E-09			
Total	19.58	1.74138E-05	7.612653588			

r 20m

Reyon site 20m

Sains	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser	Fraction Molaire total
Puits				7.215935171
we2	0.4	0.00013798	0.000055192	50.3615493
we3	0.52	0.00015272	7.94144E-05	48.21976872
we4	0.52	0.00013383	6.95911E-05	45.57732957
we5	0.52	0.00011704	6.08609E-05	1.864474132
we6	0.52	0.00010127	5.28604E-05	1.052630004
we7	0.52	0.000083398	4.33977E-05	0.607314881
we8	0.52	9.87839E-05	5.13676E-05	0.350390009
we9	0.53	0.00011522	6.10666E-05	15.6426399
Total	50.625	0.000840242	50.3615493	

10 ans

Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.32	0.00010291	3.29312E-05
we3	0.5	0.00013625	0.000068125
we4	0.52	0.00011976	6.22752E-05
we5	0.52	0.00010122	5.26344E-05
we6	0.52	0.000083173	4.325E-05
we7	0.52	0.000062826	3.26695E-05
we8	0.53	0.00007776	4.12213E-05
we9	0.53	0.000082079	4.92789E-05
Total	49.5	0.00076864	49.21976872

20ans

Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.18	0.000056501	9.05018E-06
we3	0.38	0.000066779	3.2978E-05
we4	0.48	0.000089852	4.3129E-05
we5	0.51	0.000075813	3.86648E-05
we6	0.52	0.000057136	2.977107E-05
we7	0.53	0.00003439	1.82267E-05
we8	0.53	0.000047732	2.5298E-05
we9	0.53	0.00005894	3.17692E-05
Total	45.75	0.000502143	45.57732957

30ans

Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.095	0.000024353	2.31354E-06
we3	0.23	0.000045052	1.0362E-05
we4	0.35	0.000054806	1.91821E-05
we5	0.43	0.000050925	2.18977E-05
we6	0.47	0.000037697	1.71178E-05
we7	0.49	0.00016824	8.24378E-06
we8	0.51	0.00028877	1.47783E-05
we9	0.52	0.00003978	2.06856E-05
Total	38.687E	0.00028414	38.59757418

40ans

Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.052	0.000012856	6.38512E-07
we3	0.14	0.000024387	3.41418E-06
we4	0.24	0.000032552	7.74048E-06
we5	0.32	0.000032154	1.02893E-05
we6	0.38	0.000023485	8.9243E-06
we7	0.42	0.000006679	2.90518E-06
we8	0.45	0.000016636	7.4862E-06
we9	0.47	0.000025914	1.21786E-05
Total	30.9	0.000174563	30.68753807

50ans

Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.03	7.1187E-06	2.13561E-07
we3	0.082	0.000013833	1.19431E-06
we4	0.15	0.000019116	2.8674E-06
we5	0.23	0.000019837	4.58251E-06
we6	0.29	0.000014282	4.14178E-06
we7	0.33	1.9137E-06	6.31521E-07
we8	0.36	0.000009086	3.27096E-06
we9	0.38	0.000016081	6.11078E-06
Total	23.15	0.000101267	22.64480607

60ans

Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.017	4.0462E-06	8.8764E-08
we3	0.049	0.000006009	3.82431E-07
we4	0.097	0.000011395	1.1052E-06
we5	0.15	0.000012109	1.81635E-06
we6	0.2	8.5916E-06	1.71832E-06
we7	0.24	0.000001349	3.2376E-07
we8	0.26	4.8832E-06	1.26963E-06
we9	0.28	9.6026E-06	2.68873E-06
Total	16.1625	5.98855E-05	15.6426399

r 30m				Rayon site 30m	
Sans				m3/ton	
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser	Fraction Molaire total	
we2	0.45	0.00017221	7.74945E-05	7.215935171	51.43387522
we3	0.53	0.00017704	9.38312E-05	5.481023199	50.98190631
we4	0.53	0.0001626	0.000086178	3.162275295	49.20249846
we5	0.52	0.00015105	0.000078546	1.824474132	46.38633328
we6	0.52	0.00013976	7.26752E-05	1.052630004	39.69545477
we7	0.52	0.00012558	6.53016E-05	0.607314681	30.61193789
we8	0.52	0.00014426	7.50152E-05	0.35039009	21.60621421
we9	0.53	0.00016516	8.75348E-05		
total	51.5	0.00123766	51.43387522		

10 ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.41	0.00014574	5.97534E-05
we3	0.52	0.00016212	8.43024E-05
we4	0.53	0.00014552	7.71256E-05
we5	0.53	0.0001307	0.000069271
we6	0.52	0.00011637	6.05124E-05
we7	0.52	0.00009283	5.16272E-05
we8	0.53	0.00011723	6.21319E-05
we9	0.53	0.00013683	7.25199E-05
total	51.125	0.001053793	50.98190631

20ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.28	0.00008768	2.4855E-05
we3	0.49	0.00013251	6.49299E-05
we4	0.52	0.00011918	6.19736E-05
we5	0.53	0.0001013	0.000053689
we6	0.53	0.000083064	4.40239E-05
we7	0.53	0.000061836	3.27731E-05
we8	0.53	0.000077044	4.08333E-05
we9	0.53	0.000091642	4.85703E-05
total	49.25	0.000755344	49.20249846

30ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.17	0.000048356	8.22052E-06
we3	0.4	0.000093275	0.00003731
we4	0.49	0.000095585	4.68367E-05
we5	0.51	0.000081079	4.13503E-05
we6	0.52	0.000062347	3.24204E-05
we7	0.53	0.000039395	2.08794E-05
we8	0.53	0.000053026	2.81038E-05
we9	0.53	0.000065252	3.45836E-05
total	46	0.000538315	46.38633328

40ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.089	0.000023211	2.06578E-06
we3	0.24	0.000049928	1.19827E-05
we4	0.37	0.000062131	2.29885E-05
we5	0.43	0.000057882	2.48807E-05
we6	0.47	0.000044669	2.09944E-05
we7	0.49	0.000024342	1.19276E-05
we8	0.5	0.000036862	0.000018431
we9	0.51	0.000047952	2.44555E-05
total	38.7375	0.000346957	39.69545477

50ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.048	0.000011971	5.74608E-07
we3	0.14	0.000026403	3.69642E-06
we4	0.24	0.000035641	8.55384E-06
we5	0.31	0.000035632	1.10459E-05
we6	0.36	0.000028126	1.01254E-05
we7	0.39	0.000013455	5.24745E-06
we8	0.42	0.000023439	9.84438E-06
we9	0.44	0.000032723	1.43981E-05
total	29.35	0.00020739	30.61193789

60ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.027	6.5725E-06	1.77458E-07
we3	0.082	0.00001467	1.20294E-06
we4	0.15	0.000020618	3.0927E-06
we5	0.21	0.000021362	4.48602E-06
we6	0.25	0.000016935	4.23375E-06
we7	0.28	0.000007157	2.00396E-06
we8	0.31	0.000014005	4.34155E-06
we9	0.33	0.000020651	6.81483E-06
total	20.4875	0.000121971	21.60621421

r 40m				Rayon site 40m	
5ans				m3/ton	Fraction Molaire total
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser		
wel2	0.46	0.000184	0.00008464	7.215935171	51.7144784
wel3	0.53	0.00018645	9.88185E-05	5.481023199	51.28327677
wel4	0.53	0.00017451	9.24903E-05	3.162275295	50.076533
wel5	0.53	0.00016558	8.77468E-05	1.824474132	48.12561535
wel6	0.52	0.00015655	0.000081406	1.052630004	44.34775994
wel7	0.52	0.00014433	7.50516E-05	0.607314681	37.56649242
wel8	0.52	0.00016479	8.56908E-05	0.35039009	27.62897166
wel9	0.53	0.00018798	9.96294E-05		
total	51.75	0.00136417	51.7144784		

10 ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.43	0.00015858	6.81894E-05
wel3	0.52	0.00017081	8.88212E-05
wel4	0.53	0.00015589	8.26217E-05
wel5	0.53	0.00014325	7.58225E-05
wel6	0.52	0.00013095	0.000068094
wel7	0.52	0.00011565	0.000060138
wel8	0.53	0.00013526	7.16878E-05
wel9	0.53	0.00015649	8.29397E-05
total	51.375	0.00116688	51.28327677

20ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.32	0.0001051	0.000033632
wel3	0.51	0.00014343	7.31493E-05
wel4	0.53	0.00012811	6.78983E-05
wel5	0.53	0.00011109	5.88777E-05
wel6	0.53	0.000094142	4.98953E-05
wel7	0.53	0.000074173	3.93117E-05
wel8	0.53	0.000090538	4.79851E-05
wel9	0.53	0.0001065	0.000056445
total	50.125	0.000853083	50.076533

30ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.21	0.000062026	1.30255E-05
wel3	0.45	0.00011228	0.000050517
wel4	0.51	0.00010766	5.49066E-05
wel5	0.53	0.000090992	4.82258E-05
wel6	0.53	0.00007206	3.81918E-05
wel7	0.53	0.00004954	2.62562E-05
wel8	0.53	0.00006397	3.39041E-05
wel9	0.53	0.000077107	4.08667E-05
total	47.75	0.000635615	48.12561535

40ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.12	0.000033337	4.00044E-06
wel3	0.33	0.000073594	2.4288E-05
wel4	0.45	0.000083748	3.76866E-05
wel5	0.49	0.000073585	3.60567E-05
wel6	0.51	0.000056612	2.88721E-05
wel7	0.52	0.000034209	1.77887E-05
wel8	0.52	0.000047625	0.000024765
wel9	0.53	0.000059376	3.14693E-05
total	43.375	0.000462086	44.34775994

50ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.067	0.000017333	1.16131E-06
wel3	0.2	0.000041205	0.000008241
wel4	0.33	0.000054583	1.80124E-05
wel5	0.4	0.000052501	2.10004E-05
wel6	0.44	0.000041275	0.000018161
wel7	0.46	0.00002761	1.27006E-05
wel8	0.48	0.000034769	1.66891E-05
wel9	0.49	0.000045408	2.22499E-05
total	35.8375	0.000314684	37.56649242

60ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.037	9.2918E-06	3.43797E-07
wel3	0.12	0.000022551	2.70612E-06
wel4	0.21	0.000031732	6.66372E-06
wel5	0.28	0.000032285	9.0398E-06
wel6	0.32	0.000026054	8.33728E-06
wel7	0.35	0.000013443	4.70505E-06
wel8	0.37	0.000022447	8.30539E-06
wel9	0.39	0.000030766	1.19987E-05
total	25.9625	0.00018857	27.62897166

r 50m				Rayon site 50m	
5ans				m3/ton	
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser	Fraction Molaire total	
wel2	0.47	0.00018883	8.87501E-05	7.215935171	51.73504334
wel3	0.53	0.00019043	0.000100928	5.481023199	51.57615104
wel4	0.53	0.00017963	9.52039E-05	3.162275295	50.29711146
wel5	0.52	0.00017185	0.000089362	1.824474132	48.59125726
wel6	0.52	0.00016387	8.52124E-05	1.052630004	45.8650421
wel7	0.52	0.00015256	7.93312E-05	0.607314681	40.59878323
wel8	0.52	0.00017384	9.03968E-05	0.35039009	31.62847146
wel9	0.53	0.00019809	0.000104988		
total	51.75	0.0014191	51.73504334		

10 ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.44	0.00016347	7.19268E-05
wel3	0.53	0.00017443	9.24479E-05
wel4	0.53	0.00016037	8.49961E-05
wel5	0.53	0.00014873	7.88269E-05
wel6	0.52	0.00013736	7.14272E-05
wel7	0.52	0.00012291	6.39132E-05
wel8	0.53	0.0001433	0.000075949
wel9	0.53	0.0001655	0.000087715
total	51.825	0.00121607	51.57615104

20ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.34	0.00011173	3.79882E-05
wel3	0.51	0.00014729	7.51179E-05
wel4	0.53	0.00013176	6.98328E-05
wel5	0.53	0.00011529	6.11037E-05
wel6	0.53	0.000098966	5.24626E-05
wel7	0.53	0.000079629	4.22034E-05
wel8	0.53	0.00009655	5.11715E-05
wel9	0.53	0.00011316	5.99748E-05
total	50.375	0.000894395	50.29711146

30ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.23	0.00006771	1.55733E-05
wel3	0.46	0.00011916	5.48136E-05
wel4	0.52	0.00011202	5.82504E-05
wel5	0.53	0.000094927	5.03113E-05
wel6	0.53	0.000076195	4.03834E-05
wel7	0.53	0.000054026	2.86338E-05
wel8	0.53	0.000068859	3.64953E-05
wel9	0.53	0.000082452	4.36996E-05
total	48.25	0.000675349	48.59125726

40ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.14	0.000038866	5.44124E-06
wel3	0.37	0.000084738	3.13531E-05
wel4	0.47	0.000091599	4.30515E-05
wel5	0.51	0.00007913	4.03563E-05
wel6	0.52	0.000061162	3.18042E-05
wel7	0.53	0.000038386	2.03446E-05
wel8	0.53	0.000052147	2.76379E-05
wel9	0.53	0.00006422	3.40366E-05
total	45	0.000510248	45.8650421

50ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.08	0.000021009	1.68072E-06
wel3	0.25	0.000051071	1.27678E-05
wel4	0.38	0.000065711	2.49702E-05
wel5	0.44	0.000061136	2.68999E-05
wel6	0.47	0.000047638	2.23899E-05
wel7	0.49	0.000027376	1.34142E-05
wel8	0.5	0.000040094	0.000020047
wel9	0.51	0.000051194	2.61089E-05
total	39	0.000365229	40.59878323

60ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.046	0.00001579	7.2634E-07
wel3	0.15	0.000029354	4.4031E-06
wel4	0.26	0.000041265	1.07289E-05
wel5	0.33	0.000041333	1.36399E-05
wel6	0.38	0.000033179	1.2608E-05
wel7	0.4	0.000018068	7.2272E-06
wel8	0.42	0.000028551	1.19914E-05
wel9	0.43	0.000037962	1.63237E-05
total	30.2	0.000245502	31.62847146

r 65m				Rayon site 65m	
Sans				m3/ton	Fraction Molaire total
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser		
wel2	0.47	0.00019145	8.99815E-05	7.215935171	51.73892587
wel3	0.53	0.00019261	0.000102083	5.481023199	51.58227227
wel4	0.53	0.00018246	9.67039E-05	3.162275295	50.57304617
wel5	0.52	0.00017532	9.11664E-05	1.824474132	48.83399641
wel6	0.52	0.00016794	8.73288E-05	1.052630004	46.31509268
wel7	0.52	0.00015714	8.17128E-05	0.607314681	42.04117746
wel8	0.52	0.00017889	9.30228E-05	0.35039009	34.90304953
wel9	0.53	0.00020374	0.000107982		
total	51.75	0.00144955	51.73892587		

10 ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.44	0.00016608	7.30752E-05
wel3	0.53	0.0001764	0.000093492
wel4	0.53	0.00016282	8.62946E-05
wel5	0.53	0.00015176	8.04329E-05
wel6	0.52	0.00014092	7.32784E-05
wel7	0.52	0.00012695	0.000066014
wel8	0.53	0.00014779	7.83297E-05
wel9	0.53	0.00017053	9.03809E-05
total	51.625	0.00124325	51.58227227

20ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.35	0.00011549	4.04215E-05
wel3	0.52	0.00014941	7.76932E-05
wel4	0.53	0.00013383	7.09299E-05
wel5	0.53	0.0001177	0.000062381
wel6	0.53	0.00010179	5.39487E-05
wel7	0.53	0.000082798	4.38829E-05
wel8	0.53	0.00010005	5.30265E-05
wel9	0.53	0.00011705	6.20365E-05
total	50.625	0.000918118	50.57304617

30ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.24	0.000070746	1.6979E-05
wel3	0.47	0.00012263	5.76361E-05
wel4	0.52	0.00011422	5.93944E-05
wel5	0.53	0.000097006	5.14132E-05
wel6	0.53	0.000078438	4.15721E-05
wel7	0.53	0.000056492	2.99408E-05
wel8	0.53	0.000071558	3.79257E-05
wel9	0.53	0.000085413	4.52699E-05
total	48.5	0.000696503	48.83399641

40ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.15	0.00004246	0.000006369
wel3	0.39	0.000090527	3.53055E-05
wel4	0.48	0.000095443	4.58126E-05
wel5	0.51	0.000081941	4.17899E-05
wel6	0.52	0.000063602	3.3073E-05
wel7	0.53	0.000040735	2.15896E-05
wel8	0.53	0.000054694	2.89878E-05
wel9	0.53	0.000069964	3.54909E-05
total	45.5	0.000536366	46.31509268

50ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.089	0.000023404	2.08296E-06
wel3	0.27	0.000057257	1.54594E-05
wel4	0.4	0.000071939	2.87756E-05
wel5	0.46	0.000065827	3.02804E-05
wel6	0.49	0.00005113	2.50537E-05
wel7	0.5	0.00003002	0.00001501
wel8	0.51	0.0000431	0.000021981
wel9	0.52	0.000054448	2.8313E-05
total	40.4875	0.000397125	42.04117746

60ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.052	0.000013326	6.92952E-07
wel3	0.17	0.000034496	5.86432E-06
wel4	0.29	0.000048139	1.39603E-05
wel5	0.37	0.000047445	1.75547E-05
wel6	0.41	0.000037816	1.55046E-05
wel7	0.43	0.00002108	9.0644E-06
wel8	0.45	0.000032371	1.4567E-05
wel9	0.46	0.000042353	1.94824E-05
total	32.9	0.000277026	34.90304953

r 80m				Rayon site 80m	
Sans				m3/ton	Fraction Molaire total
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser		
wei2	0.47	0.00019199	9.02353E-05	7.215935171	51.73989205
wei3	0.53	0.00018307	0.000102327	5.481023199	51.58375244
wei4	0.53	0.00018306	9.70218E-05	3.182275295	50.5726972
wei5	0.52	0.00017608	9.15618E-05	1.824474132	48.83625063
wei6	0.52	0.00016884	8.77968E-05	1.052630004	46.31173597
wei7	0.52	0.00015817	8.22484E-05	0.607314681	42.04211014
wei8	0.52	0.00018004	9.36208E-05	0.35039009	35.43367244
wei9	0.53	0.00020503	0.000108666		
total	51.75	0.00145628	0.000108666		

10 ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wei2	0.44	0.00016656	7.3264E-05
wei3	0.53	0.00017677	9.36881E-05
wei4	0.53	0.0001633	0.000086549
wei5	0.53	0.00015235	8.07455E-05
wei6	0.52	0.00014163	7.36476E-05
wei7	0.52	0.00012777	6.64404E-05
wei8	0.53	0.00014872	7.88216E-05
wei9	0.53	0.00017158	9.09374E-05
total	51.625	0.00124868	51.58375244

20ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wei2	0.35	0.00011593	4.05755E-05
wei3	0.52	0.00014967	7.78284E-05
wei4	0.53	0.0001341	0.000071073
wei5	0.53	0.00011802	6.25506E-05
wei6	0.53	0.00010218	5.41554E-05
wei7	0.53	0.000093256	4.41257E-05
wei8	0.53	0.00010057	5.33021E-05
wei9	0.53	0.00011763	6.23439E-05
total	50.625	0.000921356	50.5726972

30ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wei2	0.24	0.000071096	1.7063E-05
wei3	0.47	0.00012304	5.78288E-05
wei4	0.52	0.0001154	0.000060008
wei5	0.53	0.000097276	5.15563E-05
wei6	0.53	0.000078742	4.17333E-05
wei7	0.53	0.000056839	3.01247E-05
wei8	0.53	0.000071949	3.8133E-05
wei9	0.53	0.00008585	4.55005E-05
total	48.5	0.000700192	48.83625063

40ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wei2	0.15	0.000042664	6.3996E-06
wei3	0.39	0.000090928	3.54619E-05
wei4	0.48	0.000095752	4.5961E-05
wei5	0.51	0.000082182	4.19128E-05
wei6	0.52	0.000063814	3.31833E-05
wei7	0.53	0.000040939	2.16977E-05
wei8	0.53	0.000054928	2.91118E-05
wei9	0.53	0.000067223	3.56282E-05
total	45.5	0.00053843	46.31173597

50ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wei2	0.089	0.000023541	2.09515E-06
wei3	0.27	0.000057733	1.55879E-05
wei4	0.4	0.000072556	2.90224E-05
wei5	0.46	0.00006635	0.000030521
wei6	0.49	0.00005152	2.52448E-05
wei7	0.5	0.000030276	0.000015138
wei8	0.51	0.000043421	2.21447E-05
wei9	0.52	0.000054813	2.85028E-05
total	40.4875	0.00040021	42.04211014

60ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wei2	0.053	0.000013505	7.15765E-07
wei3	0.18	0.000035135	6.3243E-06
wei4	0.3	0.000049172	1.47516E-05
wei5	0.37	0.000048474	1.79354E-05
wei6	0.42	0.00003863	1.62246E-05
wei7	0.44	0.000021556	9.48464E-06
wei8	0.45	0.000033048	1.48721E-05
wei9	0.46	0.000043182	1.98637E-05
total	33.4125	0.000282703	35.43367244

r 95m				Rayon site 95m	
5ans				m3/ton	Fraction Molaire total
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser		
				7.215935171	51.74033376
wel2	0.47	0.00018228	9.03716E-05	5.481023199	51.48531443
wel3	0.53	0.00018331	0.000102454	3.162275295	50.57070137
wel4	0.53	0.00018338	9.71914E-05	1.824474132	48.82898778
wel5	0.52	0.00017648	9.17698E-05	1.052630004	46.81951558
wel6	0.52	0.0001693	0.000088038	0.607314681	42.44690251
wel7	0.52	0.00015869	8.25188E-05	0.35039009	36.02652963
wel8	0.52	0.00018061	9.39172E-05		
wel9	0.53	0.00020567	0.000109005		
total	51.75	0.00145972	0.000145972		

10 ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.44	0.0001669	0.000073436
wel3	0.53	0.00017703	9.38259E-05
wel4	0.53	0.00016362	8.67186E-05
wel5	0.53	0.00015275	8.09575E-05
wel6	0.52	0.0001421	0.000073892
wel7	0.52	0.0001283	0.000066716
wel8	0.52	0.00014931	7.76412E-05
wel9	0.53	0.00017224	9.12872E-05
total	51.5	0.00125225	51.46531443

20ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.35	0.00011649	4.07715E-05
wel3	0.52	0.00014998	7.79896E-05
wel4	0.53	0.0001344	0.000071232
wel5	0.53	0.00011838	6.27414E-05
wel6	0.53	0.0001026	0.000054378
wel7	0.53	0.000083726	4.43748E-05
wel8	0.53	0.00010109	5.35777E-05
wel9	0.53	0.00011821	6.26513E-05
total	50.625	0.000924876	50.57070137

30ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.24	0.000071397	1.71353E-05
wel3	0.47	0.00012339	5.79933E-05
wel4	0.52	0.00011472	5.96544E-05
wel5	0.53	0.000097481	5.16649E-05
wel6	0.53	0.000078964	4.18509E-05
wel7	0.53	0.000057085	3.02551E-05
wel8	0.53	0.00007222	3.82766E-05
wel9	0.53	0.000086149	4.5659E-05
total	48.5	0.000701406	48.82898778

40ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.16	0.000043208	6.91328E-06
wel3	0.39	0.000091765	3.57884E-05
wel4	0.49	0.000096289	4.71816E-05
wel5	0.52	0.000082577	4.294E-05
wel6	0.53	0.000064164	3.40069E-05
wel7	0.53	0.000041283	2.188E-05
wel8	0.53	0.000055301	2.93095E-05
wel9	0.53	0.000067626	3.58418E-05
total	46	0.000542213	46.81951558

50ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.091	0.000023958	2.18018E-06
wel3	0.27	0.00005877	1.58679E-05
wel4	0.41	0.000073518	3.01424E-05
wel5	0.47	0.000067062	3.15191E-05
wel6	0.49	0.000052059	2.55089E-05
wel7	0.51	0.0000307	0.000015657
wel8	0.51	0.000043899	2.23885E-05
wel9	0.52	0.00005533	2.87716E-05
total	40.8875	0.000405296	42.44690251

60ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
wel2	0.054	0.000013818	7.46172E-07
wel3	0.18	0.000036059	6.49062E-06
wel4	0.31	0.000050379	1.56175E-05
wel5	0.38	0.000049498	1.88092E-05
wel6	0.42	0.000038397	1.65487E-05
wel7	0.44	0.000022054	9.70376E-06
wel8	0.46	0.000033675	1.54905E-05
wel9	0.47	0.000043899	2.06325E-05
total	33.925	0.000288779	36.02652963

r 110m				Rayon site 110m	
5ans				m3/ton	
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser	Fraction Molaire total	
we2	0.47	0.00019238	9.04186E-05	7.215935171	51.74042279
we3	0.53	0.00019338	0.000102491	5.491023199	51.46561914
we4	0.53	0.00018347	9.72391E-05	3.162275295	50.5700327
we5	0.52	0.00017659	9.18268E-05	1.824474132	48.82731784
we6	0.52	0.00016944	8.81088E-05	1.052630004	46.8123489
we7	0.52	0.00015884	8.25968E-05	0.607314681	42.43444973
we8	0.52	0.00018079	9.40108E-05	0.35039009	36.01807263
we9	0.53	0.00020587	0.000109111		
total	51.75	0.00146076	0.000109111		

10 ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.44	0.00016704	7.34976E-05
we3	0.53	0.00017714	9.38842E-05
we4	0.53	0.00016376	8.67928E-05
we5	0.53	0.00015292	8.10476E-05
we6	0.52	0.0001423	0.000073996
we7	0.52	0.00012852	6.68304E-05
we8	0.52	0.00014955	0.000077766
we9	0.53	0.00017252	9.14356E-05
total	51.5	0.00125375	51.46561914

20ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.35	0.00011867	4.08345E-05
we3	0.52	0.00015008	7.80418E-05
we4	0.53	0.0001345	0.000071285
we5	0.53	0.0001185	0.000062805
we6	0.53	0.00010273	5.44469E-05
we7	0.53	0.000083876	4.44543E-05
we8	0.53	0.00010125	5.36625E-05
we9	0.53	0.00011839	6.27467E-05
total	50.625	0.000925996	50.5700327

30ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.24	0.000071551	1.71722E-05
we3	0.47	0.00012356	5.80732E-05
we4	0.52	0.00011482	5.97064E-05
we5	0.53	0.000097585	5.17201E-05
we6	0.53	0.000079078	4.19113E-05
we7	0.53	0.000057211	3.03218E-05
we8	0.53	0.000072358	3.83497E-05
we9	0.53	0.000086301	4.57395E-05
total	48.5	0.000702464	48.82731784

40ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.16	0.000043399	6.94384E-06
we3	0.39	0.000092057	3.59022E-05
we4	0.49	0.000096475	4.72728E-05
we5	0.52	0.000082713	4.30108E-05
we6	0.53	0.000064286	3.40716E-05
we7	0.53	0.000041403	2.19436E-05
we8	0.53	0.000055431	2.93784E-05
we9	0.53	0.000067766	3.5916E-05
total	46	0.00054353	46.8123489

50ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.091	0.000024122	2.1951E-06
we3	0.27	0.000059168	1.59754E-05
we4	0.41	0.000073865	3.02847E-05
we5	0.47	0.000067319	3.16399E-05
we6	0.49	0.000052254	2.56045E-05
we7	0.51	0.000030855	1.57361E-05
we8	0.51	0.000044073	2.24772E-05
we9	0.52	0.00005517	2.88688E-05
total	40.8875	0.000407173	42.43444973

60ans			
Puits	Fraction molaire	Débit CH4 (Kg/s)	Frac.m. compenser
we2	0.054	0.000013924	7.51896E-07
we3	0.18	0.000036381	6.54858E-06
we4	0.31	0.000050803	1.57489E-05
we5	0.38	0.000049861	1.89472E-05
we6	0.42	0.000038668	1.66606E-05
we7	0.44	0.000022229	9.78076E-06
we8	0.46	0.000033896	1.55922E-05
we9	0.47	0.000044153	2.07519E-05
total	33.925	0.000290915	36.01807263