



HAL
open science

Analyse de la composition du biogaz en vue de l'optimisation de sa production et de son exploitation dans des centres de stockage des déchets ménagers

Matgorzata Meres

► **To cite this version:**

Matgorzata Meres. Analyse de la composition du biogaz en vue de l'optimisation de sa production et de son exploitation dans des centres de stockage des déchets ménagers. Sciences de l'environnement. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jagiellone Cracovie, 2009. Français. NNT: . tel-00793654

HAL Id: tel-00793654

<https://theses.hal.science/tel-00793654>

Submitted on 22 Feb 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

présentée à

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France

et

Université Jagiellone de Cracovie, Pologne

pour obtenir le grade de

Docteur

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

.....

**ANALYSE DE LA COMPOSITION DU BIOGAZ
EN VUE DE L'OPTIMISATION DE SA PRODUCTION
ET DE SON EXPLOITATION DANS
DES CENTRES DE STOCKAGE DES DÉCHETS MÉNAGERS**

.....

par

Małgorzata MERES

Soutenue le 19 septembre 2005

Jury :

M. Patrick GERMAIN	rapporteur
M. Adam JUSZKIEWICZ	rapporteur
M. Roman NEY	rapporteur
Mme Elżbieta SZCZEPANIEC-CIEĆCIAK	examineur
M. Pascal FORMISYN	examineur
M. Konrad SZAFNICKI	examineur
Mme Krystyna FLAK	invitée
M. Christian CYRKLEWSKI	invité

ISBN 2-9507146-4-1

Moim Rodzicom

A mes Parents

To my Parents

Je souhaite remercier :

Madame Elżbieta Szczepaniec-Cięciak
pour la qualité de son encadrement et sa disponibilité,

Monsieur Pascal Formisyn
pour le suivi régulier de cette étude,
l'intérêt et l'esprit critique qu'il a su manifester,

et Monsieur Konrad Szafnicki
pour la qualité de son encadrement,
sa disponibilité, sa sympathie et ses précieux conseils.

Monsieur Hervé Vaillant,

à la Sociétés Satrod et Elyo,
ainsi qu'à

Monsieur Krzysztof Piejko,
Miejskie Przedsiębiorstwo Oczyszczania Sp. z o.o.
pour la qualité de leur collaboration.

A tous les membres du Centre SITE
pour l'ambiance et l'accueil qu'ils m'ont réservé,
à tous les membres de Zespół Kriogeniki i Badań Powietrza
pour la chaleureuse ambiance de travail qu'ils ont su créer,
ainsi qu'à Madame Marta Tor et Madame Alicja Tardy
pour leur sympathie et hospitalité.

A mes Parents et mon Frère
pour l'amour, la patience, l'aide et leur confiance en moi,
et à mes Amies :

Basia G., Kasia S., Kasia F., Kasia B. et Patrycja S.
pour le soutien et la présence dans les moments difficiles.

RESUME



Ce travail résulte de la collaboration entre le Centre SITE de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France et la Faculté de Chimie de l'Université Jagiellone à Cracovie, Pologne (thèse en cotutelle), ainsi qu'avec deux partenaires industriels : sociétés Satrod et Elyo que gèrent le Centre de Stockage et la valorisation du biogaz à Borde-Matin, et Miejskie Przedsiębiorstwo Oczyszczania à Cracovie (l'Entreprise Municipale d'Assainissement) qui gère le Centre de Stockage Barycz.

Cette thèse a pour objectif essentiel de comprendre et d'expliquer la dynamique des processus liés à la production du biogaz. Le comportement du biogaz dans la masse des déchets (transferts, composition, variations...) et les relations vis-à-vis d'un ensemble de paramètres extérieurs (paramètres météorologiques et d'exploitation, interventions d'opérateurs) sont étudiés, afin de proposer une aide à l'optimisation de l'exploitation et de la valorisation du biogaz.

La valorisation du biogaz est une technologie permettant de recueillir et de traiter le biogaz issu des déchets organiques fermentescibles en vue de produire de l'énergie tout en préservant l'environnement grâce à la réduction des émissions de gaz à fort effet de serre tel que le méthane, l'élimination des odeurs et des risques d'explosion. Une des méthodes de la valorisation du biogaz est la production d'électricité dans des groupes électrogènes constitués des moteurs à biogaz couplés à des génératrices électriques. Pour une efficacité optimale de cette valorisation, il est très important que la production du biogaz et sa composition soient stables. Cependant, il y a beaucoup de facteurs qui influent sur la variation de la concentration de composants du biogaz, en particulier les paramètres météorologiques (précipitations, pression atmosphérique, température et humidité), l'âge et les types des déchets, les méthodes d'enfouissement.

L'ensemble de ce travail a permis une étude à trois niveaux (à court terme, à moyen terme et d'un point de vue global) de la dynamique des processus de production et de comportement du biogaz sur des Centres de Stockage (CDS) des déchets ménagers en fonction de différents paramètres extérieurs (météorologiques, d'exploitation). Plusieurs types de modèles ont été proposés, selon l'horizon de temps envisagé. Les modèles à court terme (heures, jours) peuvent avoir un intérêt dans la gestion « au jour le jour » alors que les modèles « globaux » peuvent constituer un outil d'aide à la décision dans la gestion des sites sur un horizon de plusieurs années.

Mots clés : Valorisation du biogaz, Centre de Stockage, Modélisation, Optimisation, Énergie renouvelable, Développement durable

This PhD thesis results from collaboration between Centre SITE, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France and Faculty of Chemistry, Jagiellonian University in Cracow, Poland (international thesis), as well as with two industrial partners: society Satrod and Elyo which manage landfill site and landfill gas utilization at Borde-Matin, and Miejskie Przedsiębiorstwo Oczyszczania in Cracow (Municipal Company of Purification) which manages landfill site Barycz.

This PhD thesis aims to understand and explain the process dynamics of the landfill gas (LFG). In order to propose an assistance to the optimisation of the LFG exploitation and using, the behaviour of LFG in the mass of the waste (transfer, composition, influences and variations...) and the relationships with external parameters (meteorological and exploitation parameters, operators interventions) have been investigated.

Landfill gas utilization implies collecting and processing of LFG generated during anaerobic fermentation of organic waste. LFG utilization aims at energy production and environment protection by reduction of greenhouse gas emissions (methane), elimination of odours and explosion hazard. One of the techniques of LFG utilization implies the production of electric energy in power units consisting of LFG engines coupled with electricity generators. In order to reach optimum efficiency of using the biogas it is of big importance that LFG production and composition be constant. However, a lot of factors are able to affect or afford the concentration of the different LFG components and the volume of its production. These are, among others, meteorological parameters (precipitation, atmospheric pressure, temperature and air humidity), the age and type of the waste as well as the method of its disposal.

This work investigates the LFG generation process dynamics at different landfill sites in relation to various external parameters (meteorological and operational). Various types of models have been studied according to the time horizon concerned: short-, mean-term and global view. The short-term models (hours, days) could have an interest in the management “from day-to-day” whereas the global models could provide a decision making assistance to the landfill management on the horizon of several years.

Key Words: Landfill gas utilization, Landfill site, Modelling, Optimization, Renewable energies, Sustainable development

Prezentowana rozprawa doktorska powstała w wyniku współpracy pomiędzy Centrum SITE Ecole Nationale Supérieure des Mines w Saint-Etienne, Francja i Wydziałem Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, Polska (doktorat międzynarodowy – *en cotutelle*), a także z dwoma partnerami przemysłowymi: spółkami Satrod i Elyo, które zarządzają składowiskiem odpadów komunalnych i utylizacją biogazu w Borde-Matin (Francja) oraz Miejskim Przedsiębiorstwem Oczyszczania Sp. z o.o. w Krakowie, które zarządza składowiskiem Barycz.

Głównym celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu różnych parametrów zewnętrznych (meteorologicznych i eksploatacyjnych, interwencji operatorów) na dynamikę procesu produkcji i utylizacji biogazu na składowiskach różniących się między innymi wielkością, ilością zdeponowanych odpadów i dostępnej do utylizacji mocy opałowej, intensywnością odgazowania a także warunkami klimatycznymi.

Utylizacja biogazu jest technologią pozwalającą na zbieranie i przetwarzanie biogazu pochodzącego z odpadów organicznych zdolnych do fermentacji w celu produkowania energii, redukcji emisji gazu cieplarnianego (metanu), eliminacji odorów oraz zagrożenia wybuchem. Jedną z metod utylizacji biogazu jest produkcja energii elektrycznej w zespołach prądotwórczych składających się z silników na biogaz połączonych z generatorami prądu. Aby uzyskać optymalną wydajność utylizacji bardzo ważne jest, aby produkcja i skład biogazu były stałe. Istnieje jednak wiele czynników wpływających na wahania stężeń składników biogazu, między innymi parametry meteorologiczne (opady, ciśnienie atmosferyczne, temperatura i wilgotność powietrza), wiek i typ odpadów oraz sposób ich składowania.

Celem szczegółowym dysertacji było opracowanie modeli dla trzech horyzontów czasowych (krótko, średnio i długoterminowych), przedstawiających dynamikę produkcji i zachowania się biogazu na składowiskach odpadów komunalnych w zależności od różnych parametrów zewnętrznych. Modele krótkoterminowe (godziny, dni) mogą mieć zastosowanie w codziennym zarządzaniu składowiskiem, natomiast modele globalne mogą stanowić pomoc w podejmowaniu decyzji przy kierowaniu składowiskiem na przestrzeni wielu lat.

Słowa kluczowe : Utylizacja biogazu, Składowisko odpadów komunalnych, Modelowanie, Optymalizacja, Energie odnawialne, Zrównoważony rozwój

SOMMAIRE



FIGURES, TABLEAUX, PHOTOS

GLOSSAIRE	XIII
INTRODUCTION ET CONTEXTE	1
1. POSITION DE LA PROBLÉMATIQUE	5
1.1. Les Centres de Stockage (CDS) : exploitation, problématique et risques	7
1.1.1. Introduction	7
1.1.2. Exploitation de Centre de Stockage (CDS)	16
1.1.2.1. Compactage	16
1.1.2.2. Dégazage	20
1.1.2.3. Valorisation du biogaz	22
1.1.3. Caractéristiques du biogaz	26
1.1.3.1. Étapes de production du biogaz	26
1.1.3.2. Compositions du biogaz	28
1.1.3.3. Paramètres influençant la production du biogaz	29
1.1.4. Risques induits par la présence du biogaz dans les CDS	32
1.2. Description des sites retenus	34
1.2.1. Caractéristiques des CDS étudiés	34
1.2.1.1. Localisation	34
1.2.1.2. Méthodes d'exploitation	36
1.2.1.3. Dégazage	40
1.2.1.4. Valorisation du biogaz	42
1.2.1.5. Résumé – comparaison	45
1.2.2. Caractéristiques climatiques des régions	46
1.2.2.1. Małopolska (Pologne)	46
1.2.2.2. Loire (France)	47
1.2.2.3. Résumé – comparaison	49
2. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE ET DE MODÉLISATION	51
2.1. Introduction à l'identification de modèles	53
2.1.1. Objectif	53
2.1.2. Identification d'un modèle de comportement	53
2.1.3. Protocole d'identification	53
2.1.4. Récapitulatif	60
2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)	61

2.3. Modèles globaux d'estimation d'émission du gaz	64
2.3.1. Présentation de différents modèles	64
2.3.2. Récapitulatif	68
2.4. Acquisition des données et des informations	70
2.5. Appareils de mesures	76
2.6. Contraintes et limites des équipements de mesure	83
3. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	85
3.1. Exploitation et analyse des données	87
3.1.1. Influence des paramètres d'exploitation sur la valorisation du biogaz	87
3.1.2. Influence des paramètres météorologiques sur la valorisation du biogaz	91
3.1.3. Stabilité de la production du biogaz	95
3.1.4. Bilan de fonctionnement de la valorisation	98
3.1.5. Récapitulatif opératoire	100
3.2. Analyses croisées des relations à court terme (heures, jours)	101
3.2.1. Modèles PLUIE → PCI _{dispo}	101
3.2.2. Modèle général PLUIE → PCI _{dispo}	113
3.2.3. Modèle DÉBIT → CH ₄	117
3.3. Étude des corrélations à moyen terme (mois, année)	122
3.4. Modèles globaux (années)	126
3.4.1. Modèle LANDGEM	126
3.4.2. Modèle « EPA-modifié »	128
3.4.3. Validation de modèle « EPA-modifié »	131
3.5. Récapitulatif des modèles	134
4. CONCLUSION – PERSPECTIVES	137
BIBLIOGRAPHIE	141
RÉFÉRENCES	155
ANNEXES	
1. Exemples des concentrations de plusieurs composants du biogaz	159
2. Les mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS Barycz de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003	163
3. Les mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS Barycz d'octobre 2003 à mai 2004	173
4. Exemples des graphes mensuels préparés avec les données récupérées à Borde-Matin (juillet 2003)	177

5. Exemples des graphes mensuels préparés avec les données récupérées à Barycz (mai 2003)	181
6. Code pour l'identification des modèles PLUIE → PCI _{dispo}	185
7. Code pour l'identification du modèle DEBIT → CH ₄	189
8. Résultats des calculs de corrélations annuelles (ACP), sous forme de la matrice des corrélations, pour les données de 2001, 2002, 2003 et 2004 à Borde-Matin	193
9. Résultats des calculs de corrélations (ACP), sous forme de la matrice des corrélations, pour les données de 2002 à 2004 à Borde-Matin	199
10. Résultats des calculs de corrélations (ACP), pour les données annuelles de 2002, 2003 et 2004, et pour toutes les données (de 2002 à 2004) pour les quatre saisons de l'année à Borde-Matin	203
11. Résultats des calculs de valeurs moyennes pour les données annuelles de 2002, 2003 et 2004, et pour toutes les données (de 2002 à 2004) pour les quatre saisons de l'année à Borde-Matin	207
12. Résultats des calculs de corrélations (ACP), sous forme de la matrice des corrélations, pour les données de mars à juin 2003 à Barycz	211
13. Les données spécifiques de Borde-Matin utilisées pour la simulation de la production du biogaz (écrans du logiciel LANDGEM)	215
14. Les données spécifiques de Barycz utilisées pour la simulation de la production du biogaz (écrans du logiciel LANDGEM)	219
15. Code de modèle « EPA-modifié »	223
16. Résumé des données spécifiques de Barycz et Borde-Matin utilisées pour la simulation de la production du biogaz	227

FIGURES**1. POSITION DE LA PROBLEMATIQUE**

Figure 1. <i>Évolution des quantités des déchets stockés en France</i>	7
Figure 2. <i>Quantités de déchets enfouis selon la nature des déchets, en France, en millions de tonnes</i>	8
Figure 3. <i>Évolution du nombre de CDS et de leur part (%) par rapport à l'ensemble des installations de traitement</i>	8
Figure 4. <i>La superficie totale des Centres de Stockage (CDS) en Pologne (ha)</i>	9
Figure 5. <i>La quantité de déchets municipaux produits dans différents pays (kg/habitant/an)</i>	12
Figure 6. <i>Force de compactage des compacteurs en fonction de leur poids</i>	17
Figure 7. <i>Efficacité de compactage pour un compacteur avec : (A) 2 ; (B) 3 et (C) 4 roues</i>	17
Figure 8. <i>Roues de compacteur : (A) Points de traction soudés : dédiés aux superficies gelées ou à pénétration difficile ; (B) Points « plus » : procurant une meilleure stabilité en terrains pentus. Auto-nettoyants</i>	18
Figure 9. <i>Conséquences des passages de compacteur</i>	18
Figure 10. <i>Techniques du compactage des déchets</i>	19
Figure 11. <i>Exemple de réseau de dégazage : (A) Schéma général ; (B) Photo – exemple réel en surface</i>	20
Figure 12. <i>Puits vertical de collecte du biogaz : (A) Schéma général ; (B) Photo – exemple réel</i>	21
Figure 13. <i>Puits horizontal de collecte du biogaz</i>	21
Figure 14. <i>Installation de collecte, transport et élimination du biogaz (Société Pro 2)</i>	22
Figure 15. <i>Exemple de station de cogénération : (A) Schéma général ; (B) Photo de la station de cogénération de Vienne (38) entourée d'une paroi insonorisante</i>	24
Figure 16. <i>Les phases de la décomposition des déchets</i>	27
Figure 17. <i>Influences des différents facteurs sur la production du gaz de décharge</i>	30
Figure 18. <i>Chemins possibles de la migration du biogaz</i>	33
Figure 19. <i>Progression de l'activité par nature de déchets (Borde-Matin, 1998-2002)</i>	37
Figure 20. <i>Evolution de la quantité des déchets stockés à Barycz (1992-2004)</i>	39
Figure 21. <i>Géographie: (A) situation de la région Małopolska ; (B) région Małopolska</i>	46
Figure 22. <i>Géographie : (A) situation de la région Rhône-Alpes ; (B) département de la Loire</i>	47

2. METHODOLOGIE D'ANALYSE ET DE MODELISATION

Figure 23. Schéma d'un modèle linéaire discret	55
Figure 24. Schéma d'évolution classique de $QN(nk)$ avec deux valeurs candidates pour nk_{opt}	57
Figure 25. Schéma d'évolution classique de $QN(nf)$ avec deux valeurs candidates pour nf_{opt}	57
Figure 26. Paramètres caractéristiques du modèle de 1 ^{er} ordre avec retard : K , τ , T_d illustrés en réponse à un échelon	59
Figure 27. Tableau $R(n,p)$ de mesures	61
Figure 28. Schéma du calcul de matrice de la corrélation C	62
Figure 29. Cercle des corrélations : 1 et 2 – corrélation directe ($C_{jj} \approx 1$), 1 (2) et 3 – corrélation inverse ($C_{jj} \approx -1$)	63
Figure 30. Schéma de la station de traitement du biogaz (d'après ELYO - BIOVALE)	70
Figure 31. Schéma de l'installation de dégazage et de collecte du biogaz à Barycz	72
Figure 32. Transmetteur du débit	77
Figure 33. Sonde de température	77
Figure 34. Hygromètre	78
Figure 35. Pluviomètre	78
Figure 36. Anémomètre	78
Figure 37. Girouette	78
Figure 38. Analyseur du biogaz GA 94 (Geotechnical Instruments Ltd., Angleterre) : (A) Vue général ; (B) Schéma	79
Figure 39. Senseur de la température	81
Figure 40. Débitmètre	81
Figure 41. Sonde de température	82
Figure 42. Hygromètre	82
Figure 43. Pluviomètre	82

3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Figure 44. Diminution de PCI_{dispo} provoquée par l'interruption de fonctionnement des groupes électrogènes (exemple de Barycz)	88
Figure 45. Changement de la concentration en CH_4 dans les puits étudiés à Barycz	89
Figure 46. Changement de la concentration en CO_2 dans les puits étudiés à Barycz	89
Figure 47. Changement de la concentration en CH_4 et en CO_2 dans les collecteurs ZR et ZB	90
Figure 48. Exemple d'influence de la température sur la PCI_{dispo} en juillet 2003 (exemple de Borde-Matin)	91

Figure 49. Exemple d'influence des précipitations longues (>12h) sur la PCI_{dispo} : (A) en mai 2002 à Borde-Matin ; (B) en mai 2003 à Barycz	92
Figure 50. Exemple d'influence des précipitations courtes (1-3 h) et intense sur la PCI_{dispo} à Barycz : (A) en mai 2003 ; (B) en juin 2003	93
Figure 51. Exemple d'influence de la température basse (<0°C) et les précipitations sur : (A) l'augmentation de PCI_{dispo} à Borde-Matin ; (B) l'augmentation de la concentration en méthane dans le biogaz à Barycz	94
Figure 52. Exemple d'influence de la pression atmosphérique sur la concentration en méthane dans le biogaz à Barycz	95
Figure 53. (A) Évolutions journalières de PCI_{dispo} ; (B) Détail de vanne d'un puits	96
Figure 54. Changement de la teneur en méthane dans le biogaz de la partie récultivée (ZR) et en exploitation (ZB) du CDS Barycz dans la période étudiée	97
Figure 55. Rapports CH_4/CO_2 pour la partie en exploitation (ZB) et récultivée (ZR) du CDS Barycz dans la période étudiée	97
Figure 56. Bilan d'utilisation de puissance disponible (%) à Borde-Matin dans la période de novembre 2000 à décembre 2004	98
Figure 57. Modélisation des relations entre précipitations et PCI_{dispo}	101
Figure 58. Schéma de principe d'un modèle comportemental	102
Figure 59. Visualisation de l'événement pluvieux : 22-23 mai 2002, Borde-Matin	103
Figure 60. Influence du choix de la valeur de coefficient a_F du filtre 1 ^{er} ordre sur l'allure de la courbe filtrée	104
Figure 61. Événement pluvieux du 22-23 mai 2002 après le filtrage et le centrage des données PCI_{dispo}	105
Figure 62. Recherche du nk_{opt} : 22-23 mai 2002, Borde-Matin	107
Figure 63. Recherche du nk_{opt} : 22-23 mai 2002, Borde-Matin	107
Figure 64. Recherche du nf_{opt} : 22-23 mai 2002, Borde-Matin	108
Figure 65. Position des pôles et zéros : (A) pour $nf = 5$ et $nk = 5$: (a) pôles négatifs, (b) pôles et zéros proches (compensation) ; (B) pour $nf=1$ et $nk=5$	109
Figure 66. PCI_{dispo} mesurée (rouge) et simulée pour $nk = 5$ (jaune : $nf = 0$, soit un lien de proportionnalité simple ; vert : $nf = 1$, soit 1 ^{er} ordre), données du 22-23 mai 2002	110
Figure 67. Variations de la température et de la PCI_{dispo} pendant l'événement pluvieux du 25-27 octobre 2004	112
Figure 68. Visualisation des huit événements pluvieux assemblés	114
Figure 69. Recherche du : (A) nk_{opt} ; (B) nf_{opt}	114
Figure 70. Position des pôles et zéros : (A) pour $nf=5$ et $nk=5$; (B) pour $nf=1$ et $nk=5$	115
Figure 71. PCI_{dispo} mesurée (rouge) et simulée pour $nk = 5$ (jaune : $nf = 0$, soit un lien de proportionnalité simple ; vert : $nf = 1$, soit 1 ^{er} ordre), modèle général	116
Figure 72. (A) Exemple de relation $[CH_4]$ vs. Q observé in situ ; (B) visualisation et calculs de K_s	118

Figure 73. <i>Graphe des relations entre les coefficients K_s et les valeurs initiales du débit Q_{init} et de la concentration du méthane $[CH_4]_{init}$</i>	120
Figure 74. <i>Graphe des relations entre les coefficients K_s et les amplitudes du débit ΔQ et de la concentration du méthane $\Delta [CH_4]$</i>	120
Figure 75. <i>Graphe de relation entre ΔQ calculés et mesurés in situ et $\Delta [CH_4]$</i>	121
Figure 76. <i>Exemple de corrélations trouvées pour les données de Borde-Matin : (A) PCI_{dispo} et débit, dépression (calcul pour toutes les données : de 2002 à 2004) ; (B) PCI_{dispo} et température (printemps 2004)</i>	124
Figure 77. <i>Corrélations trouvées pour les données de Barycz (période : mars – juin 2003)</i>	125
Figure 78. <i>Estimations de la quantité du méthane produit à Borde Matin – résultats du logiciel LANDGEM</i>	127
Figure 79. <i>Estimation de la quantité du méthane produit à Barycz – résultats du logiciel LANDGEM</i>	127
Figure 80. <i>Estimation de la production du biogaz et son évolution dans le temps pour le CDS Borde-Matin (année de fermeture : 2018)</i>	129
Figure 81. <i>Estimation de la production du biogaz et son évolution dans le temps pour la partie II de CDS Barycz (année de fermeture : 2004)</i>	129
Figure 82. <i>Estimation de la production du biogaz et son évolution dans le temps pour le CDS Borde-Matin avec diminution de la quantité de déchets stockés à partir de 2005 à 240 000 Mg/an</i>	131
Figure 83. <i>Estimation de la production du biogaz sur le CDS-B à Nontaburi</i>	132
Figure 84. <i>Estimation de la production du biogaz sur le CDS-C à Nontaburi</i>	133
Figure 85. <i>Estimation de la production du biogaz sur le CDS-A à Nontaburi</i>	133
Figure 86. <i>Illustration synthétique des modèles étudiés</i>	134

ANNEXES

Figure A-4.I. <i>Exemple des graphes mensuels de la variation des paramètres « météo » et des paramètres « biogaz » à Borde-Matin (juillet 2003)</i>	179
Figure A-4.II. <i>Exemple des graphes mensuels de la variation des paramètres « météo » et des paramètres « biogaz » à Borde-Matin (juillet 2003)</i>	180
Figure A-5.III. <i>Exemple des graphes mensuels de la variation des paramètres météorologiques et des paramètres « biogaz » à Barycz (mai 2003)</i>	183
Figure A-5.IV. <i>Exemple des graphes mensuels de la variation des paramètres « biogaz » à Barycz (mai 2003)</i>	184
Figure A-13.V. <i>Données spécifiques de Borde-Matin utilisées pour la simulation de la production du biogaz (écrans du logiciel LANDGEM)</i>	217
Figure A-14.VI. <i>Données spécifiques de Barycz utilisées pour la simulation de la production du biogaz (écrans du logiciel LANDGEM)</i>	221

TABLEAUX

1. POSITION DE LA PROBLEMATIQUE

Tableau 1. <i>Gestion du biogaz issu de CDS en France (2002)</i>	10
Tableau 2. <i>Production brute de biogaz (en milliers de tep) et taux de valorisation (en %) en énergie finale dans quelques pays de l'Union européenne en 2002</i>	11
Tableau 3. <i>Densité gravimétrique des déchets ménagers</i>	16
Tableau 4. <i>Répartition des déchets par nature (Borde-Matin, 2004)</i>	36
Tableau 5. <i>Répartition des déchets stockés à CDS Barycz (janvier 2001)</i>	38
Tableau 6. <i>Comparaison des Centres de Stockage Borde-Matin et Barycz</i>	45
Tableau 7. <i>Comparaison de climat de la Loire et de Małopolska</i>	49

2. METHODOLOGIE D'ANALYSE ET DE MODELISATION

Tableau 8. <i>Récapitulatif de modèles d'estimation d'émission du biogaz</i>	68
Tableau 9. <i>Incertitudes typiques influant sur la modélisation de génération du biogaz</i>	69
Tableau 10. <i>Extraits de données notées sous pilotage manuel de fonctionnement de l'onduleur (14 mai 2004)</i>	83

3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau 11. <i>Sommes mensuels d'énergie maximale et produite à Barycz</i>	99
Tableau 12. <i>Récapitulatif opératoire</i>	100
Tableau 13. <i>Valeurs des estimées des coefficients des polynômes A et B avec leurs écarts-types : 22-23 mai 2002</i>	109
Tableau 14. <i>Paramètres du modèle pour l'événement pluvieux du 22-23 mai 2002</i>	110
Tableau 15. <i>Caractéristiques des modèles des événements pluvieux étudiés</i>	111
Tableau 16. <i>Valeurs des estimées des coefficients des polynômes A et B avec leurs écarts-types</i>	115
Tableau 17. <i>Paramètres du modèle général</i>	115
Tableau 18. <i>Les valeurs K_s calculées, les amplitudes et les valeurs initiales de $[CH_4]$ et de Q</i>	118
Tableau 19. <i>Valeurs k et L_0 pour Borde-Matin, Barycz II et la littérature</i>	130
Tableau 20. <i>Paramètres utilisés pour l'estimation de la production du biogaz au CDS à Nontaburi</i>	132

ANNEXES

Tableau A-1.I. <i>Exemples des concentrations de plusieurs composants du biogaz</i>	161
Tableau A-2.II. <i>Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS Barycz de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003</i>	165
Tableau A-3.III. <i>Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS Barycz d'octobre 2003 à mai 2004</i>	175
Tableau A-8.IV. <i>Résultats des calculs de corrélations pour les données de 2001 – Borde-Matin</i>	195
Tableau A-8.V. <i>Résultats des calculs de corrélations pour les données de 2002 – Borde-Matin</i>	196
Tableau A-8.VI. <i>Résultats des calculs de corrélations pour les données de 2003 – Borde-Matin</i>	197
Tableau A-8.VII. <i>Résultats des calculs de corrélations pour les données de 2004 – Borde-Matin</i>	198
Tableau A-9.VIII. <i>Résultats des calculs de corrélations pour les données de 2001 à 2004</i>	201
Tableau A-10.IX. <i>Résultats des calculs de corrélations pour les données annuelles de 2002, 2003, 2004 et pour toutes les données (de 2002 à 2004) pour les quatre saisons de l'année à Borde-Matin</i>	205
Tableau A-11.X. <i>Résultats des calculs de valeurs moyennes pour les données annuelles de 2002, 2003, 2004 et pour toutes les données (de 2002 à 2004) pour les quatre saisons de l'année à Borde-Matin</i>	209
Tableau A-12.XI. <i>Résultats des calculs de corrélations pour les données de mars à juin 2003 à Barycz</i>	213
Tableau A-16.XII. <i>Résumé des données spécifiques de Barycz et Borde-Matin utilisées pour la simulation de la production du biogaz</i>	229

PHOTOS

1. POSITION DE LA PROBLEMATIQUE

Photo 1. <i>Compacteur</i>	16
Photo 2. <i>Voiture à biogaz</i>	25
Photo 3. <i>Vue « à vol d'oiseau » du Centre de Stockage Borde-Matin</i>	34
Photo 4. <i>Vue « à vol d'oiseau » du Centre de Stockage Barycz : I-partie récultivée; II-partie en exploitation; III-partie ouverte dernièrement</i>	35
Photo 5. <i>Compacteurs en action à CDS Borde-Matin : (A) CAT (poids ~37 tonnes) ; (B) Vandel (poids ~44 tonnes)</i>	38
Photo 6. <i>Stockage des déchets sur: (A) le CDS Borde-Matin ; (B) le CDS Barycz</i>	40
Photo 7. <i>(A) Compacteur BOMAG en action sur le CDS Barycz (poids ~ 32 tonnes) ; (B) évacuation des lixiviats</i>	40
Photo 8. <i>(A) Puits et (B) trois collecteurs principaux à CDS Borde-Matin</i>	41
Photo 9. <i>Dégazage de décharge Barycz : (A) puits en partie récultivée ; (B) station de collecte (pompage et compression)</i>	42
Photo 10. <i>(A) Station Biovale ; (B) Moteur Waukesha</i>	43
Photo 11. <i>Torchères</i>	43
Photo 12. <i>(A) Blocs énergétiques à CDS Barycz ; (B) Détail du moteur Deutz</i>	44

2. METHODOLOGIE D'ANALYSE ET DE MODELISATION

Photo 13. <i>(A) la station de collecte intermédiaire avec des vannes de puits de la partie II de Barycz ; (B) les collecteurs ZB et ZR à Barycz</i>	73
Photo 14. <i>Panel de contrôle des analyseurs Binos et Oxynos</i>	81

GLOSSAIRE



Notation	Description	Unité
A, B	polynômes de degrés respectifs nf et m	-
a_i, b_j	coefficients des polynômes A, B ($a_0 = 1$)	-
a_F	coefficient du filtre de 1 ^{er} ordre	-
$[CH_4]$	teneur en méthane	% v/v
$[CH_4]_{init}$	teneur en méthane initiale (dans la relation $[CH_4]$ vs. Q)	% v/v
$\Delta[CH_4]$	amplitude de la teneur en méthane (dans la relation $[CH_4]$ vs. Q)	% v/v
$c_{jj'}$	coefficient de corrélation entre les variables j et j' (méthode ACP)	-
G	production totale de biogaz au temps t (équation SWANA)	m ³ /an
k	taux de génération du méthane	ans ⁻¹
K	gain statique	-
Ks	coefficient de la relation $\Delta[CH_4]$ sur ΔQ	-
$kWhe$	kilo-watt-heure électrique	-
L_0	capacité potentielle de génération du méthane	m ³ /Mg
m	ordre du polynôme $B(z^{-1})$	-
M_i	incrément annuel de la quantité de déchets (équation EPA)	Mg
n	ordre du filtre	-
nf	ordre du polynôme $A(z^{-1})$ (et du modèle)	-
nf_{opt}	ordre du modèle optimal	-
nf_{max}	ordre du modèle maximal	-
nk	retard pur discret (nombre d'échantillons de retard)	-
nk_{opt}	retard pur discret optimal	-
P_{atmo}	pression atmosphérique	hPa
P_N	pression atmosphérique dans des conditions normales	1013 hPa
P_c	pression du biogaz au compresseur à Barycz	kPa
pci	Pouvoir Calorifique Inférieur (volumique)	MJ/m ³
PCI_{dispo}	Puissance Calorifique Inférieure disponible (totale)	kW
PCI_M	PCI_{dispo} simulée (modélisée)	kW
Q	débit du biogaz	Nm ³ /h
Q_{init}	débit du biogaz initial (dans la relation $[CH_4]$ vs. Q)	Nm ³ /h
ΔQ	amplitude de débit du biogaz (dans relation $[CH_4]$ vs. Q)	Nm ³ /h
Q_m	débit du biogaz (valeur reçue des mesures à Barycz)	m ³ /h
Q_{CH_4}	taux de génération du méthane en temps (équation EPA)	m ³ /an
QN	critère quadratique normé	%
σ_i, σ_j	écarts-types respectifs de coefficients de polynômes a_i, b_j	-
$r_{ij}, r_{ij'}$	la durée moyenne de l'activité j (j') de l'observation i	-
$s_j, s_{j'}$	l'écart-type de la variable j (j')	-
s	constante de temps de croissance du 1 ^{er} ordre (équation SWANA)	ans ⁻¹

t	temps écoulé depuis le début du stockage (équation SWANA)	ans
t_a	temps entre le début du stockage et le début de la production de gaz	ans
t_i	age d'incrément i (équation EPA)	ans
T_c	température du biogaz au compresseur à Barycz	°C
T_d	retard pur (en temps)	h
T_{d+}	retard pur (avec la correction due à l'écart entre le temps universel et à Paris)	h
T_e	période d'échantillonnage	h
T_N	température dans des conditions normales	273 K
τ	constante de temps	h
U	mesures (signal) d'entrées du modèle	-
W	masse totale des déchets stockés (équation SWANA)	Mg
Y	mesures (signal) de sorties du modèle	-
z^{-1}	opérateur « retard » (d'un pas d'échantillonnage)	-
zp_i	un pôle (racine de $A(z^{-1})$)	-
.....		
ACP	Analyse en Composantes Principales	-
CAA	ang. Clean Air Act	-
CDS	Centre de Stockage	-
COV	composés organiques volatils	-
DB	données brutes	-
DF	données filtrées	-
DIB	déchets industriels banals	-
EPA	ang. Environmental Protection Agency	-
GE	groupe électrogène	-
LANDGEM	ang. Landfill Gas Emission Model	-
LIE	limite inférieure d'explosivité	%
LSE	limite supérieure d'explosivité	%
NMOC	ang. non-methane organic carbons	-
NSPS	ang. New Source Performance Standards	-
OM	ordures ménagères	-
R1, R2, R3	trois réseaux principaux de collecte du biogaz à Borde-Matin	-
STEP	station d'épuration	-
SWANA	ang. Solid Waste Association of North America	-
tep	tonne équivalent pétrole	-
ZB	collecteur du biogaz de la partie II (en exploitation) de CDS Barycz	-
ZR	collecteur du biogaz de la partie I (récultivée) de CDS Barycz	-

INTRODUCTION ET CONTEXTE



La mise en décharge de déchets ménagers et assimilés reste le mode d'élimination prédominant en raison de sa simplicité, mais aussi de son coût moindre que d'autres méthodes (par exemple incinération). Le coût de stockage en France varie entre 38 €/tonne et 90 €/tonne en fonction de la taille des sites, alors que le coût de l'incinération s'échelonne de 69 €/tonne à 137 €/tonne et varie en fonction de la capacité nominale de l'installation [ADEME 1998]. Le coût de stockage en Pologne varie entre 20€/tonne et 40€/tonne. Afin que des déchets ménagers puissent être incinérés ils doivent avoir une valeur calorifique suffisante. La valeur limite est de 5000 kJ/kg. La majorité des déchets en Pologne est difficilement, voire non incinérable (déchets organiques, cendres, gravats). La proportion de composants combustibles est en moyenne égale à 27,5%, et la valeur calorifique atteinte à peine d'environ 3500 kJ/kg, avec un taux d'humidité supérieur à 43%. Il est donc nécessaire d'augmenter le pouvoir calorifique en ajoutant des substances combustibles, par exemple l'huile combustible ou le mazout. Ceci explique, notamment les coûts plus élevés que ceux liés au stockage [OTZO 2003].

Dès leur mise en décharge commence la décomposition chimique et biologique des déchets ménagers qui aboutit, au bout d'un certain temps, à l'apparition du biogaz, essentiellement composé du méthane (CH₄) et du dioxyde de carbone (CO₂). Ce dernier doit être capté, collecté et brûlé. Le captage et la valorisation du biogaz des décharges est une problématique de plus en plus importante, compte tenu en particulier d'une législation de plus en plus restrictive. Les motivations essentielles en sont les suivantes :

- sécurité : étant donné sa haute teneur en méthane, le biogaz doit être capté efficacement sur les décharges afin d'éviter les risques d'inflammation et d'explosion,
- réduction de l'effet de serre : le CH₄ étant 35 fois plus influent sur l'effet de serre que le CO₂ [Bates 1998], il faut le capter et brûler,
- réduction des nuisances : olfactives et toxiques,
- contribution aux énergies renouvelables : le biogaz étant considéré comme une source d'énergie renouvelable, sa valorisation (en chaleur, énergie électrique, etc.) constitue une contribution au développement durable.

Les sociétés impliquées dans la valorisation du biogaz doivent prendre en compte des contraintes économiques « usuelles », i.e. par exemple l'amortissement le plus rapide possible de l'investissement en équipement de valorisation et le retour économique. Afin d'atteindre ce but, il est essentiel de disposer d'un biogaz de qualité et quantité les plus élevés et stables possible, i.e. de teneur en CH₄ et de débit – idéalement - constants. Toutefois, la production du biogaz et sa qualité sont sous l'influence significative des paramètres environnementaux, tels

que la météo (précipitation, température, pression,...) et la nature des déchets (proportion des composés organiques, humidité...). Ces paramètres sont d'autant plus variables que la décharge (Centre de Stockage, CDS) est en fonctionnement.

Ce travail a pour objectif essentiel de comprendre et d'expliquer la dynamique des processus liés à la production du biogaz. Le comportement du biogaz dans la masse des déchets (transfert, composition, ...) et les relations avec un ensemble de paramètres extérieurs (paramètres météorologiques et d'exploitation, interventions d'opérateurs) sont étudiés, afin de proposer des outils d'optimisation de l'exploitation et de la valorisation du biogaz.

Pour atteindre ces objectifs, des mesures, des informations et des connaissances acquises sur deux Centres de Stockage en fonctionnement (en France et en Pologne) ont été obtenues. Les aspects développés dans cette thèse focaliseront sur les points suivants :

- ◆ identification d'influence (tendances) des paramètres météorologiques et des paramètres d'exploitation après avoir pris en compte et/ou séparer les interventions des opérateurs;
- ◆ étude critique croisée des relations à court terme (heures, jours) entre les paramètres météorologiques et la production et le comportement du biogaz, ainsi qu'entre sa qualité (teneur en méthane) et sa quantité (débit) : estimation et identification de modèles quantitatifs, prise en compte de leurs contraintes et limites ;
- ◆ étude des relations à moyen terme (mois, année) : recherche des corrélations ;
- ◆ estimation de la production du biogaz (à long terme : années) ;
- ◆ mise en avant et explicitation des relations (corrélations) trouvées ;
- ◆ propositions des futures démarches d'optimisation et d'approfondissement des connaissances.

Ce manuscrit comporte quatre parties :

La première partie présente l'étude bibliographique du sujet en décrivant la problématique des Centres de Stockage, les caractéristiques du biogaz et les sites retenus.

La deuxième partie introduit la méthodologie d'analyse et de modélisation employée dans le cadre de la thèse, ainsi que les contraintes et les difficultés rencontrées.

La troisième partie du manuscrit montre les résultats des études réalisées et leurs interprétations.

La conclusion, récapitule l'ensemble des résultats et propose des perspectives.

1. POSITION DE LA PROBLÉMATIQUE

.....

1.1. Les Centres de Stockage (CDS) : exploitation, problématique et risques

1.1.1. Introduction

Situation en France

La quantité de déchets stockés en France est en légère diminution (de 24,9 millions de tonnes en 2000 à 23,7 millions de tonnes en 2002). En année 2002 près de 50% des déchets générés ont été stockés (mis en décharge). Cette année-là, 361 Centres de Stockage (CDS) ont reçu 23,7 millions de tonnes de déchets dont 42% d'ordures ménagères. Entre 2000 et 2002, on observe pour la première fois une diminution sensible des déchets enfouis (Figure 1). On observe également une diminution de la quantité d'ordures ménagères stockées (Figure 2) [ADEME(a) 2002, ADEME(b) 2002].

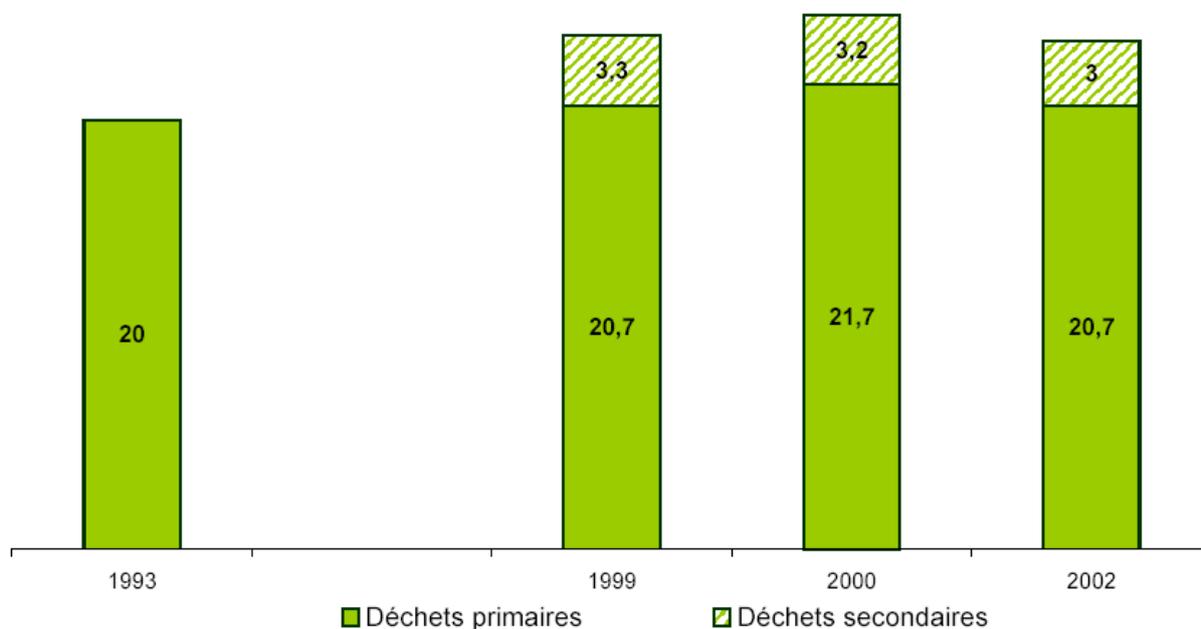


Fig. 1. Évolution des quantités des déchets stockés en France

Cette évolution est liée à la loi de juillet 1992 qui impose la possibilité de ne mettre en CDS que les déchets ultimes à partir de juillet 2002 [JO 1992]. Les déchets ultimes sont les déchets issus de différents modes de traitement, refus de compostage, refus de tri, ainsi que les déchets primaires qui n'ont pas pu être traités dans des conditions techniques ou économiques acceptables. On constate également la diminution du nombre de Centres de Stockage avec la fermeture de sites de petite taille non conformes (Figure 3).

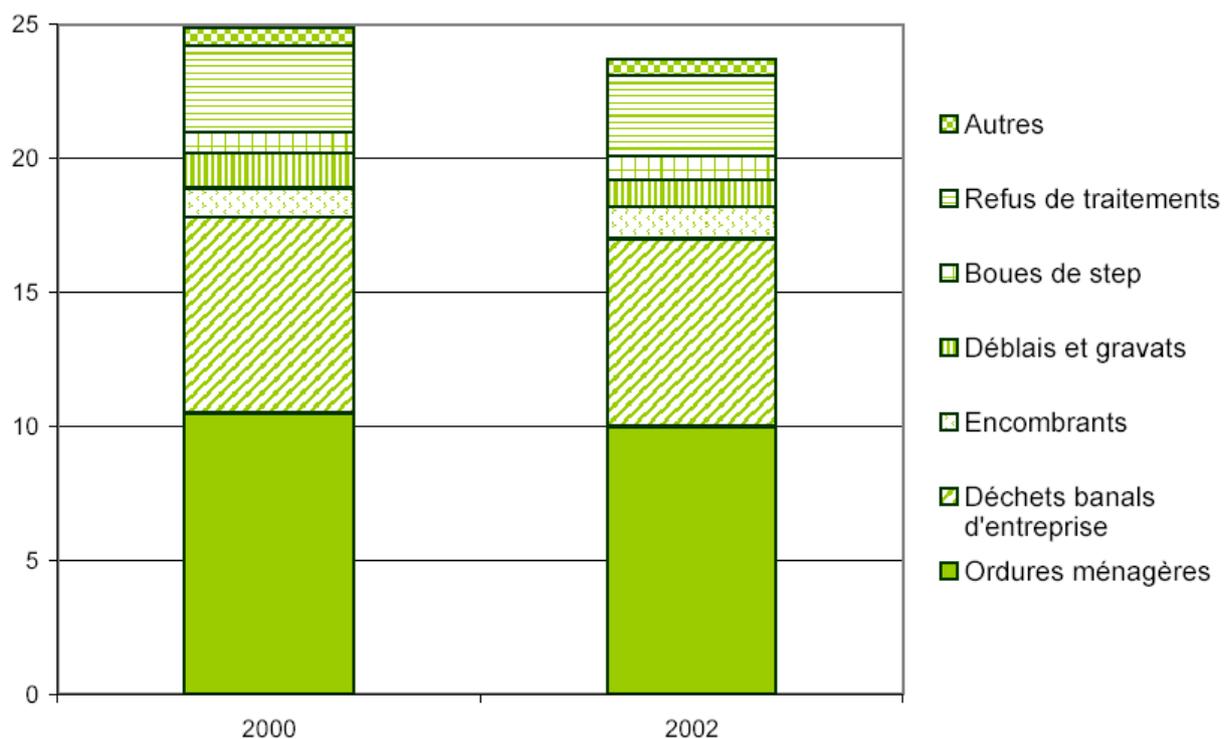


Fig. 2. Quantités de déchets enfouis selon la nature des déchets, en France, en millions de tonnes

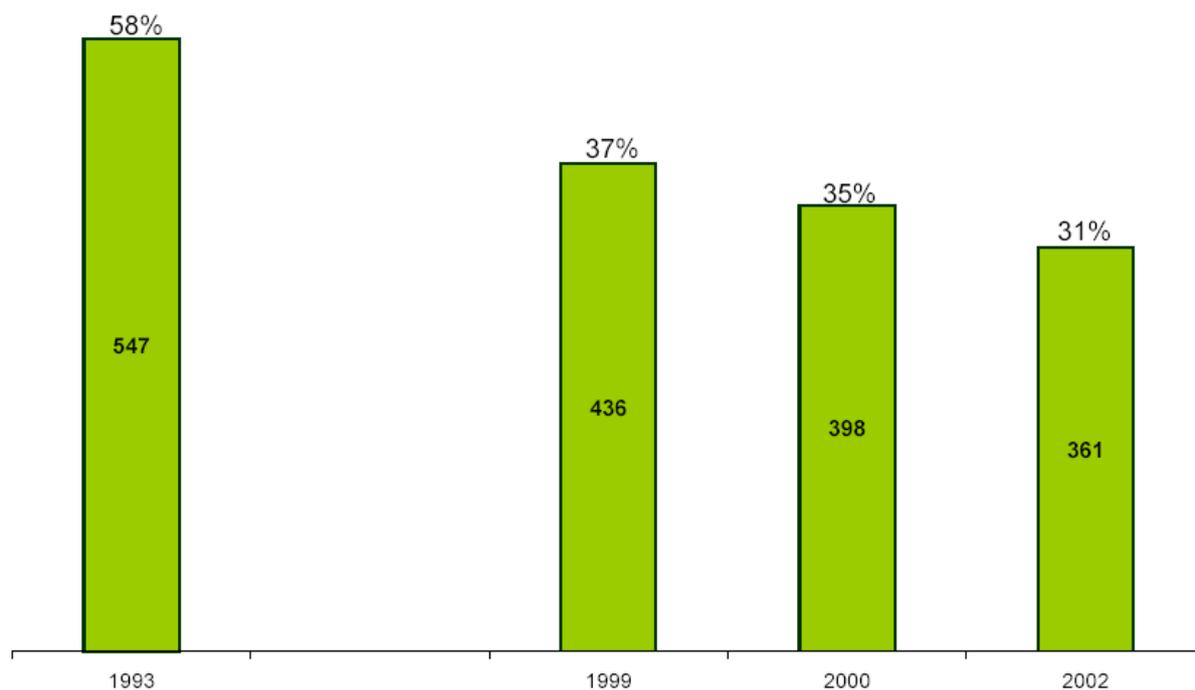


Fig.3. Évolution du nombre de CDS et de leur part (%) par rapport à l'ensemble des installations de traitement

Situation en Pologne

La quantité de déchets produits en Pologne a augmenté de 10% dans des années 1990-2001 (de 10,2 millions tonnes à 11,1 millions tonnes). Actuellement 95% de ces déchets sont stockés dans des Centres de Stockage (CDS). En 2001 seulement 2,8% de déchets ont été compostés et 3,1% ont été triés, dont : papier (0,4%), verre (0,77%), plastique (0,12%), métal (0,06%) et d'autres matériaux (0,04%) [GIOS 2003]. Récemment on a estimé que, sur un millier de CDS actuellement existants, environ 300 seront fermés jusqu'à 2006. On observe la tendance d'ouverture des grandes décharges et en même temps de diminution du nombre total. Jusqu'en 2006 il sera créé 50 nouvelles décharges et à partir de 2007 jusqu'en 2014 il y aura 50 CDS nouveaux tandis que d'autres seront fermés [Sieja 2004]. Au cours des dernières années (1996-2001) le nombre de CDS a augmenté de 884 à 1036. A la fin d'année 2001, les CDS en exploitation avaient une superficie totale de 3206,8 ha soit 580 ha de plus qu'en 1990 (Figure 4) [GIOS 2003].

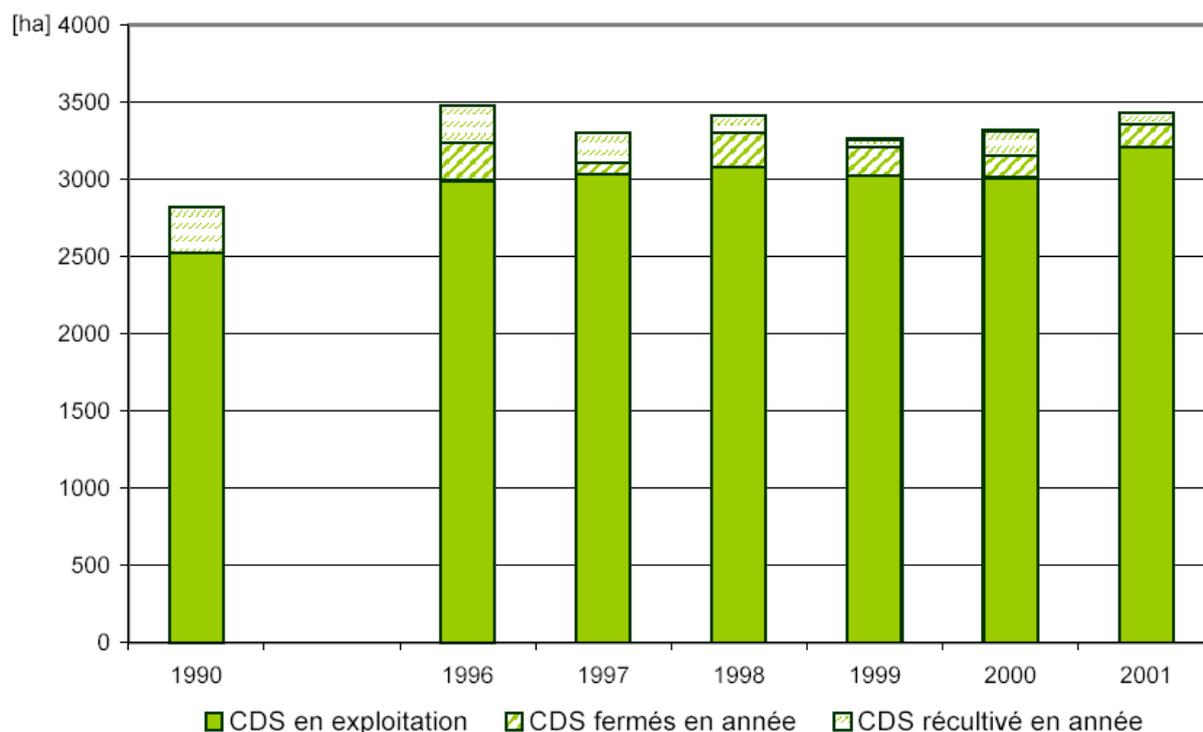


Fig. 4. La superficie totale des Centres de Stockage (CDS) en Pologne (ha)

Gestion des CDS

En même temps, on observe l'amélioration des conditions de stockage (mise aux normes) et le développement de la valorisation du biogaz. En Pologne, en 2000, seulement 96 (moins de 10%) des CDS en exploitation avaient une installation de dégazage, dont 75 émettaient le biogaz dans l'atmosphère sans valorisation, 5 le brûlaient dans des brûleurs

individuels et 2 dans des torchères. Le biogaz était valorisé en énergie thermique sur 2 décharges, et en énergie électrique sur 11 [Grabowski 2002]. La situation de la gestion du biogaz issu de CDS en France en 2002 est illustrée par le Tableau 1 [ADEME(a) 2002].

Tableau 1. Gestion du biogaz issu de CDS en France (2002)

(données de base : 361 sites et 23,7 Mt de déchets ménagers et assimilés) [ADEME(a) 2002]

CAPTAGE BIOGAZ		
« OUI »	« NON »	« SANS-REPONSE »
201 sites soit 55,7%	131 sites soit 36,3%	29 sites soit 8%
19,3 Mt soit 81,4%	3,4 Mt soit 14,3%	1,0 Mt soit 4,3%

BRÛLAGE TORCHÈRE	VALORISATION BIOGAZ
178 sites soit 89%	30 sites soit 15%
18,4 Mt soit 96%	7,0 Mt soit 36%
	238 GWh vendus

En 2002, la France se positionnait au troisième rang européen de la production de biogaz renforcée par un taux de progression spectaculaire de 58,5 % par rapport à 2001. Cela s'explique par la mise en service de plusieurs nouveaux sites, notamment 12 Centres de Stockage contrôlés entre 2001 et 2002. En revanche, le taux de valorisation en énergie finale du biogaz en France est au-dessous de la moyenne des pays de l'Union européenne (30% contre 37%). Les pays qui présentent le meilleur taux de valorisation sont le Danemark et l'Allemagne avec plus de 50% chacun (Tableau 2). La France s'illustre surtout par la sous-valorisation de son potentiel qui est estimé à 3,5 millions de tep*, soit le plus important d'Europe. Signalons la position de la Pologne, le nouveau membre de l'Union européenne, qui avec 62 ktep se situe au niveau du Danemark soit au 8^e rang européen [EurObserv'ER 2003].

* tep – tonne équivalent pétrole

Tableau 2. Production brute de biogaz (en milliers de tep) et taux de valorisation (en %) en énergie finale dans quelques pays de l'Union européenne en 2002

Pays	Production (2001)	Production (2002)	Croissance, %	Taux valorisation, %
Grande-Bretagne	904	952	5,2	31
Allemagne	600	659	9,9	55
France	196	310	58,5	30
Espagne	134	168	25,2	26
Italie	153	155	1,2	33
Pays-Bas	161	134	-17,0	43
Suède	112	115	2,5	21
Danemark	73	62	-14,5	59
Pologne	57	62	8,0	31
Autriche	56	59	5,0	40
Belgique	45	56	25,0	21
Grèce	33	42	28,7	15
Irlande	28	28	0,0	33
Finlande	18	18	0,0	30
Luxembourg	2	2	0,0	*
Portugal	1	2	100	*
Total	2653	2824		

* le détail des données recueillies n'était pas suffisant

La mise en décharge de déchets municipaux reste encore le principal mode d'élimination dans le monde. En même temps l'augmentation préoccupante de la quantité de déchets municipaux produits explique les problèmes croissants pour trouver des localisations pour les Centres de Stockage (CDS). La Figure 5 indique la quantité de déchets municipaux produits dans différents pays en 2000/2001 [Krajewski 2002, EPA 2004(a), Recy.net 2000].

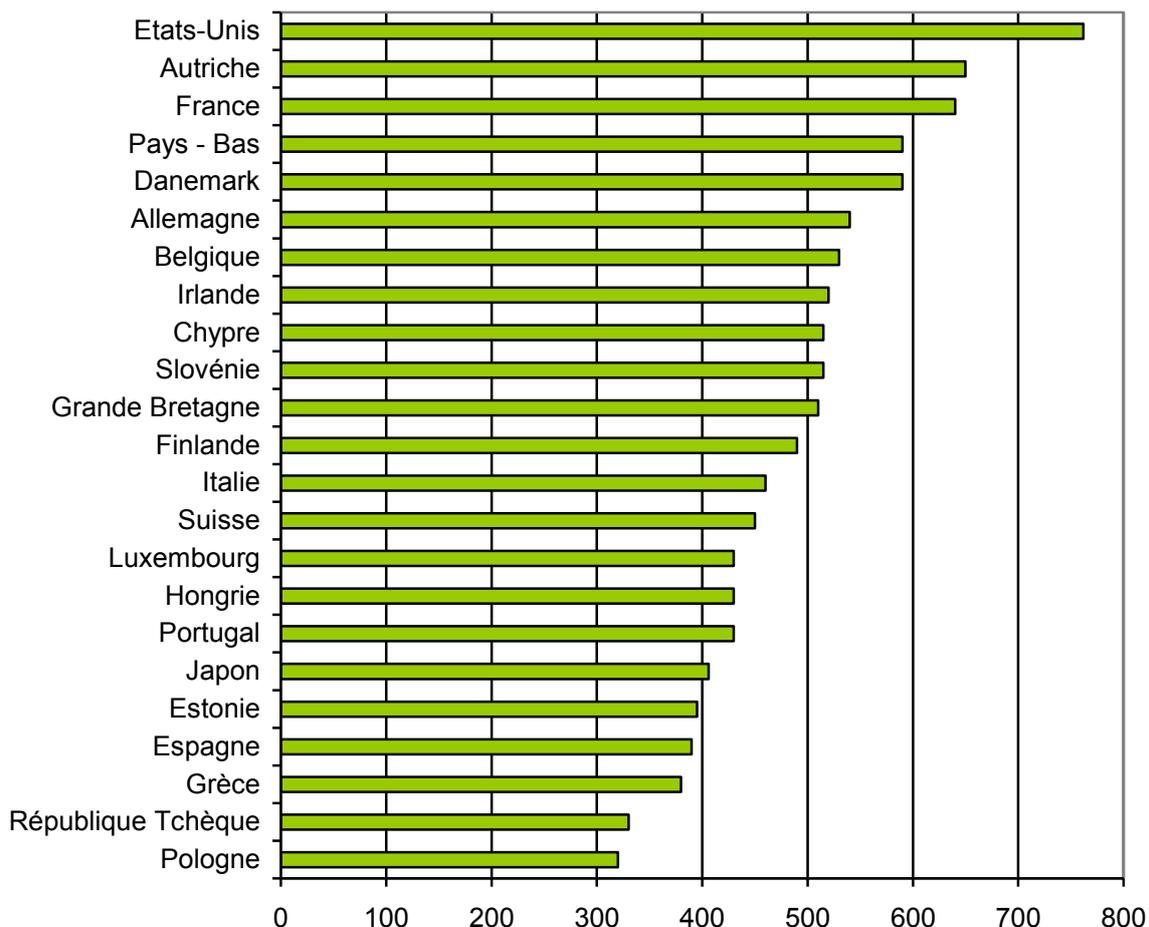


Fig. 5. La quantité de déchets municipaux produits dans différents pays (kg/habitant/an)

Il est donc nécessaire, d'abord de réduire la production des déchets, ensuite de les recycler, puis de les composter et enfin de récupérer et valoriser l'énergie issue du traitement des déchets. Cela permettra de préserver les ressources naturelles, de limiter les impacts négatifs sur l'environnement et de maîtriser les charges financières liées à la gestion des déchets.

Les déchets contiennent la biomasse et participent donc à la production des énergies renouvelables. Le recours aux énergies renouvelables est une partie intégrante de la stratégie de l'Union européenne pour réduire de 8% ses émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990 (conformément au protocole de Kyoto). Produire de l'électricité à partir du biogaz pourrait aider la France à satisfaire l'objectif fixé par la directive sur la production de l'électricité à partir des énergies renouvelables. La France devrait passer de 15% d'électricité d'origine renouvelable actuellement (hydroélectricité, marémotrice, éolienne, biogaz, ...) à 21% en 2010, selon les prévisions [ADEME(c) 2002, Dossier 2001, Solagro 2000]. Pour adapter les normes en Pologne aux recommandations de la Commission européenne, une

Stratégie du Développement de l'Énergie Renouvelable a été élaborée. Elle a été adoptée par le Gouvernement en septembre 2000 et votée par le Parlement en août 2001 [Oniszk–Popławska 2003]. Actuellement, l'énergie électrique qui provient des sources renouvelables constitue environ 2,5% de la consommation en Pologne. Cette contribution provient surtout de l'énergie hydraulique et de la biomasse. Le but de la stratégie est l'augmentation de la proportion des ressources d'énergie électrique renouvelables jusqu'à 7,5% en 2010 et jusqu'à 14% en 2020. Ces valeurs ont été estimées sur la base de potentiel des sources d'énergie renouvelable en Pologne et l'utilisation de ces sources jusqu'à présent [Ciupryk 2004, Paczosa 2003].

Réglementation

Le développement de « l'industrie des CDS » (récupération et drainage du biogaz et des lixiviats, valorisation du biogaz, ...) a impliqué l'apparition de plusieurs réglementations qui s'appliquent aux décharges et particulièrement au biogaz, aussi bien en Pologne qu'en France :

1. Pologne [Ustawa 2001a, Ustawa 2001b, Ustawa 2001c, Ustawa 1997, Rozporządzenie 2003(a), Rozporządzenie 2003(b)]

La loi sur l'énergie du 10 avril 1997 (après mises à jour)

Cette loi fixe les règles de mise en application de la politique énergétique en Pologne, les règles et les modalités d'alimentation et d'exploitation des carburants et de l'énergie, dont la chaleur, et d'activité des entreprises énergétiques. Elle introduit, entre autres, l'obligation d'acheter l'électricité produite à partir des sources d'énergie renouvelable par des entreprises énergétiques qui produisent l'électricité et qui la vendent aux consommateurs.

La loi sur les déchets du 27 avril 2001 (après mises à jour)

Elle contient des recommandations concernant : la prévention et la réduction de la production des déchets, la récupération des matériaux valorisables, l'élimination des déchets (sauf stockage), le stockage des déchets dans les conditions minimalisant leur influence sur l'environnement et sur la santé des hommes.

La loi sur la protection de l'environnement du 27 avril 2001 (après mises à jour)

Cette loi fixe les règles de la protection de l'environnement et les modalités d'exploitation des ressources naturelles, en tenant compte des exigences du développement

durable. Elle fixe, en particulier, les règles de la protection des ressources naturelles (air, eau, terre, minéraux, animaux et plantes), de l'introduction des substances ou de l'énergie à l'environnement (entre autres : le stockage de déchets) et des coûts d'exploitation de l'environnement.

La loi sur les emballages et les déchets d'emballage du 11 mai 2001 (après mises à jour)

Cette loi, appliquée aux fabricants et importateurs, induit l'obligation de réduire le volume et la masse des emballages au minimum indispensable et de concevoir et mettre en place des emballages réutilisables ou recyclables, tels que définis dans la Loi sur les déchets ci-dessus. Les emballages doivent être produits en utilisant des technologies qui minimisent l'utilisation des substances nocives, surtout des métaux lourds.

L'arrêté du 24 mars 2003 au domaine d'exigences détaillées concernant la localisation, la construction, l'exploitation et la fermeture des décharges de différents types

Cet arrêté induit, entre autres, l'obligation de mise en place sur des Centres de Stockage des déchets biodégradables une installation de dégazage et de valorisation énergétique du biogaz ou des torchères pour le brûler.

L'arrêté du 30 mai 2003 relatif au domaine détaillé d'obligation d'achat de l'électricité et de la chaleur issus des sources de l'énergie renouvelable et de l'électricité produite en cogénération de chaleur.

Il précise les sources de l'énergie renouvelable (notamment l'énergie issue du biogaz), les obligations de rachat de l'électricité et de la chaleur issus des sources de l'énergie renouvelable et la proportion minimale de l'énergie renouvelable dans l'énergie totale vendue aux utilisateurs.

2. France [ADEME 1999, ADEME 2001, CUE 1999, JO 1992, JO 1997, JO 2000, JO 2001, MEDD 2002]

La loi sur les déchets du 13 juillet 1992

Cette loi impose la possibilité de ne mettre en CDS que les déchets ultimes à partir de juillet 2002. Or, puisque jusqu'à cette date, toutes les conditions n'ont pas été remplies, le Ministre de l'écologie et du développement durable a donné pour instruction aux préfets de ne pas interdire la mise en décharge de déchets n'entrant pas dans cette catégorie, et de faire le point sur les actions engagées en vue d'atteindre l'objectif fixé par la loi.

L'arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés (après mises à jour)

Cet arrêté confirme l'obligation de captage du biogaz déjà prévue dans la circulaire et l'instruction technique du 11 mars 1987. Il impose la recherche des solutions de valorisation de cette énergie, oblige sa destruction par voie thermique pour des raisons de nuisances olfactives, de sécurité et de prévention de pollution atmosphérique, notamment de l'effet de serre.

Directive du Conseil de l'Union européenne du 26 avril 1999

Selon cette directive seules les activités de mise en décharges sûres et contrôlées doivent être menées dans la Communauté. Elle précise plusieurs dispositions concernant le biogaz, en particulier la réduction de la quantité de déchets biodégradables stockés en décharge, l'obligation de capter et valoriser ou brûler en torchère le biogaz sur les sites qui reçoivent des déchets biodégradables, la maîtrise du gaz pour éviter la migration.

La loi du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité (après mises à jour)

Cette loi appliquée à EDF (Électricité de France) induit l'obligation d'acheter l'électricité produite par les installations qui valorisent des déchets ménagers ou assimilés (prix d'achat de l'électricité produite par la valorisation du biogaz de décharge : de 4,5 à 5,7 c€/kWh HT selon la puissance, prix de vente aux particuliers en janvier 2003 : ~9,5 c€/kWh HT).

Arrêté du 3 octobre 2001 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent des déchets ménagers ou assimilés en utilisant le biogaz de décharge

Cet arrêté fixe les conditions d'achat de l'électricité produite par des installations concernées par la loi du 10 février 2000, qui valorisent, en utilisant le biogaz de décharge, des déchets ménagers ou assimilés.

1.1.2. Exploitation de Centre de Stockage (CDS)

1.1.2.1. Compactage

Les fermetures des décharges non conformes à la réglementation ont entraîné une augmentation des quantités stockées dans les sites autorisés. De plus, les ouvertures de nouveaux sites de taille importante conformes aux normes en vigueur sont difficiles en raison de l'opposition des populations riveraines (attitude NIMBY – Not In My Back Yard). Cette situation provoque la nécessité de croissance de capacités annuelles des Centres de Stockage en activité. Les conditions du terrain qui limitent la superficie des Centres de Stockage obligent l'amélioration des technologies de la valorisation et du stockage de déchets. En conséquence le stockage de déchets devient une activité industrielle à part entière d'un degré de technicité toujours croissant.

Une des méthodes pour prolonger la durée de vie d'un Centre de Stockage en gagnant de la place pour des déchets est le compactage qui réduit le volume de déchets stockés (Tableau 3) [Wilson 2003]. Pour le compactage des déchets sur un Centre de Stockage on utilise des compacteurs (Photo 1).

Tableau 3. Densité gravimétrique des déchets ménagers

Lieu de placement des déchets	Densité, Mg/m ³
Poubelle	0,15
Camion	0,35
Centre de Stockage (après compactage)	0,65 – 0,80
CDS Borde-Matin	1,10 – 1,20



Photo 1. Compacteur (© Photo K.Szafnicki, ENSM.SE)

Les paramètres suivants influent sur l'efficacité de compactage :

1. Force de compactage [Vandel 2003]

La qualité de compactage est directement liée au poids de chaque machine et à la largeur cumulée de ses rouleaux. Le rapport : poids en kG sur largeur totale des rouleaux en cm donne la force de compactage (Figure 6).

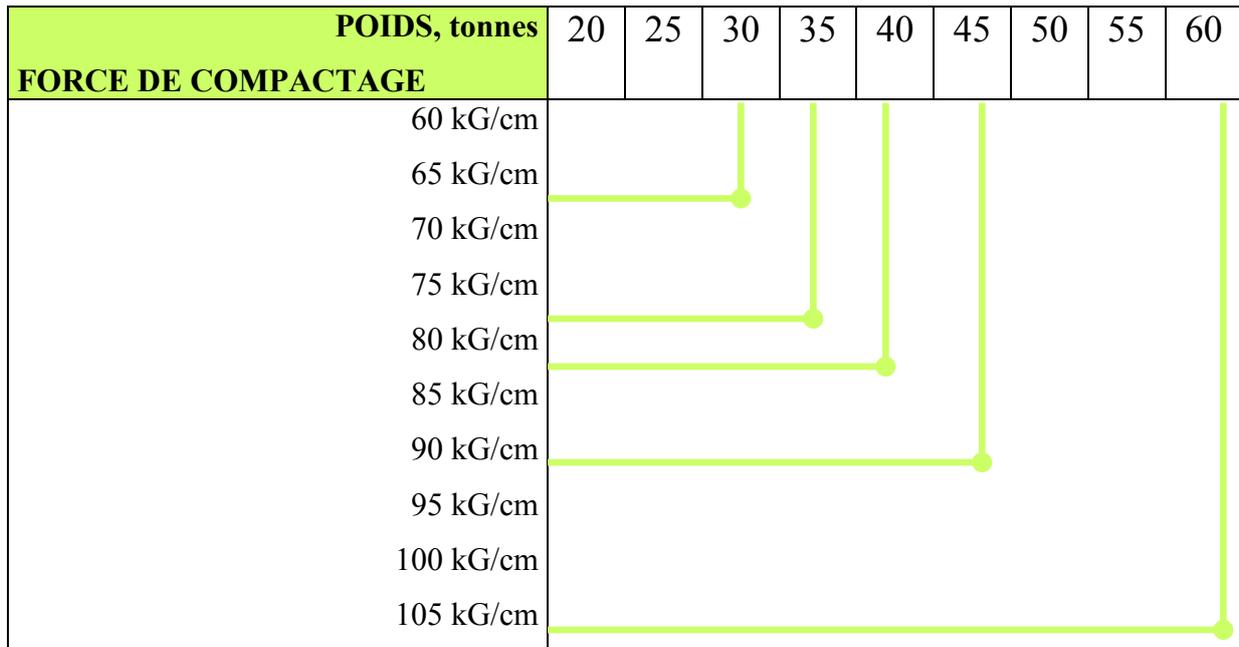


Fig. 6. Force de compactage des compacteurs en fonction de leur poids (note : 1 kG ~ 9,8 N)

2. Construction de compacteur [Tana 2003, CAT 2004]

Pour obtenir un compactage efficace il est indispensable de maximiser la superficie de contact : roues de compacteur – déchets. On distingue trois types de compacteurs en fonction de nombre de roues : 2-, 3- et 4-rouleurs. Des compacteurs avec deux roues peuvent avoir l'efficacité de compactage plus grande de 100% que des compacteurs avec quatre roues (Figure 7).

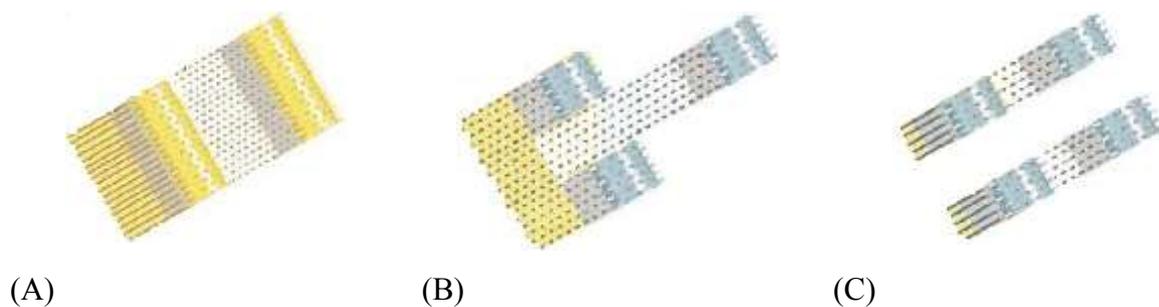


Fig. 7. Efficacité de compactage pour un compacteur avec : (A) 2 ; (B) 3 et (C) 4 roues

La Figure 8 montre deux exemples des points de roues de compacteur.



(A) Spécification :

Largeur de tambour	1200 mm
Diamètre de tambour	1532 mm
Diamètre avec des points	1732 mm
Points par roue	45

(B) Spécification :

Largeur de tambour	1200 mm
Diamètre de tambour	1532 mm
Diamètre avec des points	1850 mm
Points par roue	25

Fig. 8. Roues de compacteur (© CAT) :

(A) Points de traction soudés : dédiés aux superficies gelées ou à pénétration difficile ;

(B) Points « plus » : procurant une meilleure stabilité en terrains pentus. Auto-nettoyants

3. Nombre de passages [TANA 2003]

Les différents types des déchets exigent différent nombre de passages pour atteindre le meilleur compactage. La Figure 9 présente des fonctions générales des passages de compacteur.



(A) Étalement et compactage de la nouvelle couche des déchets

(B) Étalement et compactage complet des déchets

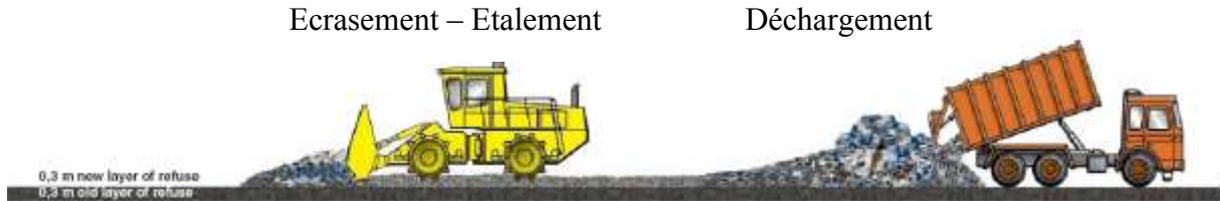
(C) Blocage de la surface compactée grâce aux points de traction

Fig. 9. Conséquences des passages de compacteur (© TANA)

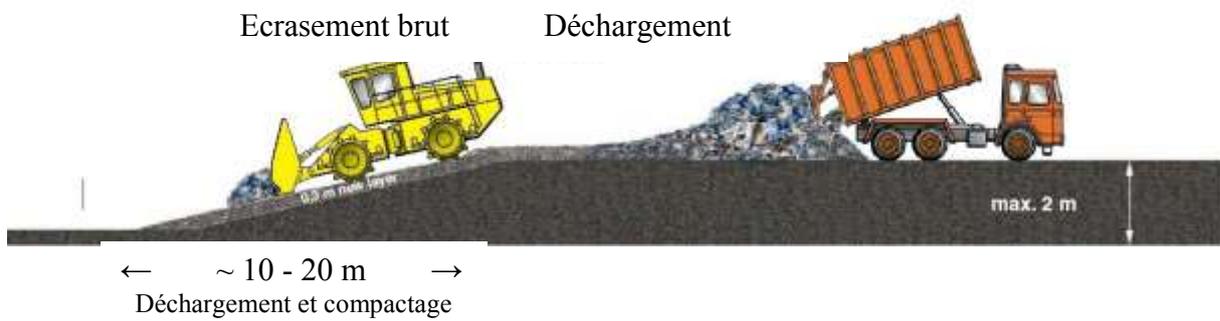
4. Technique de compactage [BOMAG 2004]

La Figure 10 illustre différentes techniques du compactage de déchets.

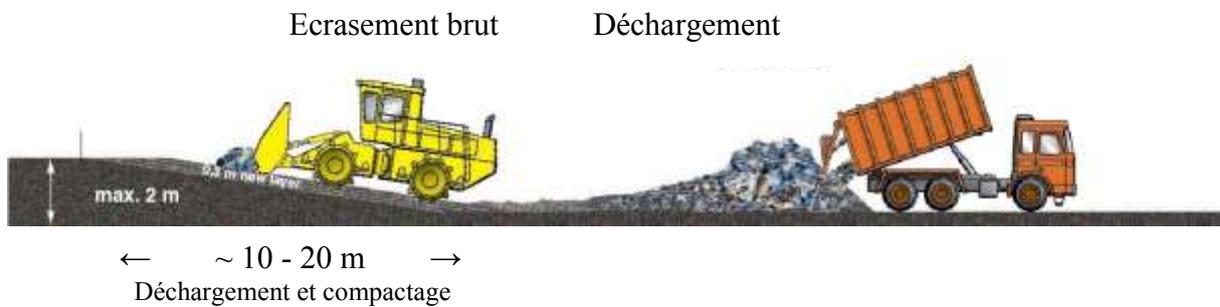
A. Étalement en couche fine horizontale (max. 30 cm) = maximum de compactage



B. Étalement en pente descendante = bon compactage



C. Étalement en pente montante = bon compactage



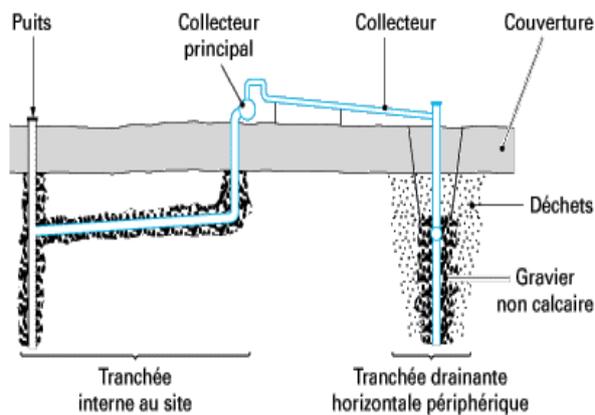
D. Comblement (alvéole, fosse) = compactage faible



Fig. 10. Techniques du compactage des déchets (© BOMAG)

1.1.2.2. Dégazage

En raison des risques, des migrations possibles de gaz et de la pollution de l'environnement, le captage du biogaz (c'est-à-dire un système de drainage des gaz interne au massif de déchets) et son élimination contrôlée sont obligatoires [JO 1997, Rozporządzenie 2003(a)]. Lors du dégazage, un système adapté de captage du gaz de décharge force une aspiration du gaz en provoquant une légère dépression à l'intérieur du corps de décharge. La conception générale d'un réseau de collecte du biogaz est présentée sur la Figure 11 [Billard 2001].



(A)

(B)

Fig. 11. Exemple de réseau de dégazage : (A) Schéma général, (B) Photo – exemple réel en surface (© Photo K.Szafnicki, ENSM.SE)

On distingue deux catégories de collecte du biogaz : un système à puits verticaux et un système à puits horizontaux [ADEME 2001, Billard 2001, Lemański 1992].

Système à puits verticaux

Un puits vertical de collecte du biogaz est présenté sur la Figure 12.

Les puits d'extraction horizontaux sont installés pendant le dépôt des déchets, donc ils doivent pouvoir résister à la masse d'un compacteur ou d'un bulldozer. Pour résister à la pression verticale ces tubes sont entourés d'une épaisse couche de gravier. Ils peuvent remplir deux fonctions : soit ils constituent le système « principal » de collecte du gaz, soit ils constituent des « auxiliaires » des drains verticaux auxquels ils sont connectés.

Les puits sont connectés aux collecteurs qui permettent de transporter le gaz drainé, vers la station de pompage puis la station de traitement. Ces collecteurs doivent résister aux agressions chimiques et aux rayonnements ultraviolets, et ils doivent être flexibles.

La station de pompage aspire le gaz dans le massif de déchets et le refoule vers l'unité de valorisation ou d'élimination. L'élément central est le compresseur, capable de créer une dépression en amont et une surpression en aval.

Avant de valoriser ou éliminer du biogaz il est nécessaire d'éliminer les condensats. Ils sont éliminés dans un séparateur, stockés dans une cuve de réception, le plus souvent enterrée, et soit envoyés vers une station d'épuration, soit mis en recirculation dans le massif de déchets [ADEME 2001].

1.1.2.3. Valorisation du biogaz

Le biogaz collecté de la masse de déchets, épuré de condensats est enfin acheminé vers l'unité d'élimination (torchères) ou/et de valorisation. La Figure 14 présente l'ensemble d'une installation de collecte, transport et élimination du biogaz [Pro2 2003].

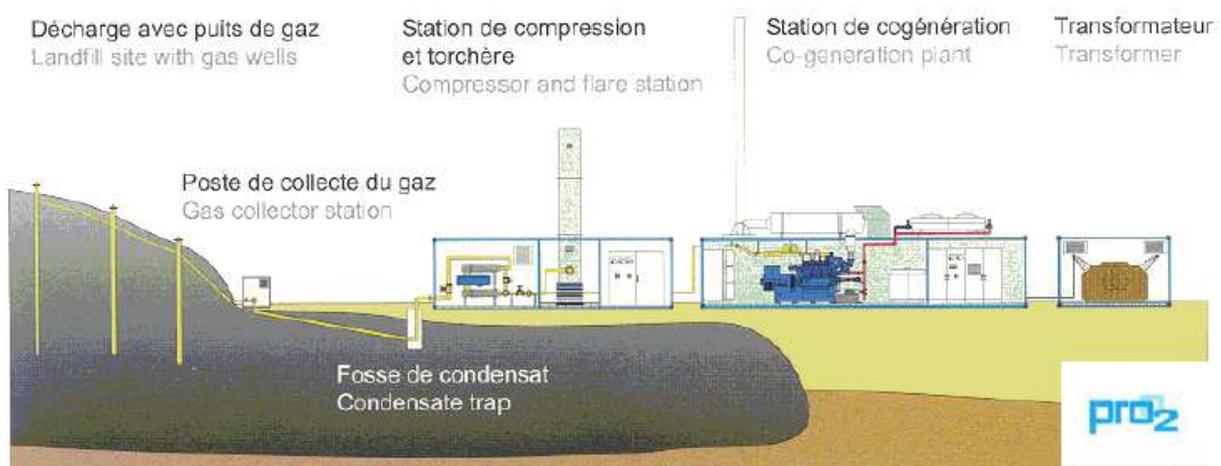


Fig. 14. Installation de collecte, transport et élimination du biogaz (© Pro 2)

L'élimination du biogaz est réalisée par la combustion dans des torchères. Elle a pour fonction de convertir les composés inflammables ou toxiques du gaz en composés inertes ou peu toxiques. Il existe deux types de torchères : les torchères ouvertes (à flamme visible) et les torchères fermées (à flamme invisible) [ADEME 2001, Billard 2001].

Torchère ouverte

La flamme est visible de l'extérieur et le bon déroulement de la combustion est constaté par l'inspection visuelle de cette flamme. La température de flamme est basse et la qualité de combustion est médiocre. Ce type de torchère accepte d'importantes variations de débit et de qualité du biogaz (e.g. teneur en CH₄).

Torchère fermée

La combustion s'effectue dans une chambre de combustion, la flamme n'est pas visible de l'extérieur. La qualité de la combustion se mesure par le taux de monoxyde de carbone dans les gaz de combustion. La température de combustion est plus élevée (minimum 900°C) et la durée de brûlage plus longue que dans une torchère ouverte, donc la combustion est meilleure.

Les torchères peuvent être utilisées pour l'incinération de la totalité du gaz produit (sans valorisation), mais aussi pour l'incinération de gaz non consommés par l'utilisateur final (si valorisation).

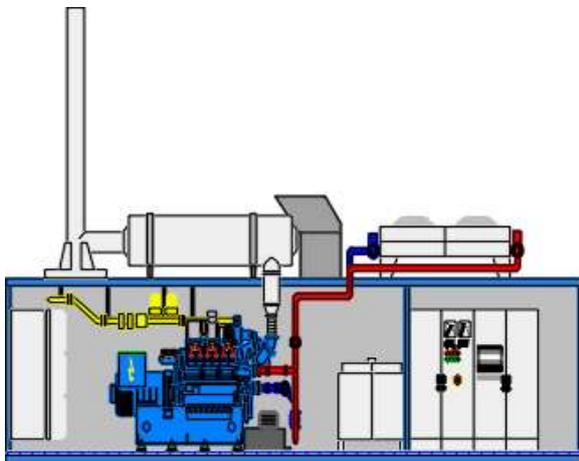
La valorisation du gaz procure une image positive aux installations de stockage de déchets, qui deviennent ainsi des sites de valorisation énergétique d'une énergie renouvelable. Différents types de valorisation sont possibles : la production de chaleur, la production d'électricité, la purification du gaz en vue de son utilisation comme carburant pour les véhicules automobiles, la purification du gaz en vue de l'injection dans le réseau de transport ou de distribution de gaz naturel [ADEME 1999, Bereza 1999, Mortgat 1998].

La production de chaleur

La combustion est un moyen de valorisation le mieux adapté au biogaz. Le procédé est simple et n'exige pas un grand investissement. La composition du biogaz importe peu, à condition qu'il comporte au moins 20% de méthane. Ce type d'application s'accommode bien de gaz à haute teneur en H₂S, à condition que les matériaux constituant les équipements soient suffisamment résistants.

La production d'électricité

Cette voie nécessite des investissements plus lourds, mais les groupes électrogènes peuvent aussi fournir de la chaleur (cogénération) ce qui permet d'améliorer nettement la rentabilité de l'opération. L'efficacité maximale en électricité des groupes électrogènes fonctionnant au biogaz atteint actuellement 40%. La Figure 15 présente une station de cogénération [Pro2 2003]. L'électricité ainsi produite peut être revendue. La composition du biogaz nécessite au moins 40% de méthane. Le traitement du biogaz à envisager dépend de la solution retenue (« moteurs à biogaz », « turbine à vapeur », ...). En général il est suffisant de le désulfurer et de déshydrater.



(A) Société Pro 2



(B)

Fig. 15. Exemple de station de cogénération : (A) Schéma général, (B) Photo de la station de cogénération de Vienne (38) entourée d'une paroi insonorisante (© Photo K.Szafnicki, ENSM.SE)

La production de biogaz carburant

Les investissements à réaliser sont onéreux liés à la nécessité d'une purification plus poussée, mais peuvent être rapidement (~10 ans) amortis pour les grandes agglomérations. Composition du biogaz nécessite au moins 50% de méthane. Il est nécessaire de le débarrasser, en particulier, de l'eau, du H₂S et du gaz carbonique. La Photo 2 présente l'exemple d'une voiture à biogaz pour le transport en commun [Bucksch 1999, Murphy 2004, Sortir du Nucléaire 2003].



Photo 2. Voiture à biogaz (© Photo Sortir du Nucléaire)

L'injection dans le réseau de gaz naturel

Le biogaz peut être injecté dans le réseau de gaz naturel à condition qu'il réponde aux spécifications de qualité du gaz distribué. Il doit donc être épuré de l'eau, de l'hydrogène sulfuré, des composés organo-halogénés tels que dérivés chlorés et fluorés, qui peuvent se transformer en acides très corrosifs et avoir un impact sanitaire négatif lors de la combustion. Vu les surcoûts générés par ce niveau d'épuration, cette solution est peu répandue.

1.1.3. Caractéristiques du biogaz

Le biogaz est un gaz combustible, composé principalement de méthane et de gaz carbonique, qui provient de la décomposition des matières organiques selon un processus de fermentation anaérobie. Il existe plusieurs sources possibles de biogaz [Mortgat 1998]:

- les boues des stations d'épuration (STEP). Le biogaz provient des matières organiques contenues dans les eaux usées. C'est un gaz riche en méthane, en hydrogène sulfuré mais aussi en composés organiques volatils (COV) et en métaux lourds, provenant du recueil des eaux polluées par le lessivage des routes par la pluie;
- les biogaz industriels ou agricoles (des industries agroalimentaires, le lisier de porc) ;
- les biogaz des unités spécifiques de méthanisation liée au compostage. Normalement, il n'y a pas de biogaz en cas de compostage, puisque ce dernier nécessite, au contraire de la méthanisation, un traitement avec apport d'air. Mais il existe aujourd'hui des procédés mixtes qui permettent de produire à la fois de l'engrais organique et du biogaz ;
- le biogaz des Centres de Stockage (CDS). Les décharges produisent spontanément du biogaz car des déchets fermentescibles y sont déposés, mais ce gaz est très aléatoire dans sa composition en raison des irrégularités des apports de déchets en quantité et en qualité. Le biogaz peut être produit à des rythmes différents, pendant plusieurs (dizaines) d'années.

1.1.3.1. Étapes de production du biogaz

La décomposition de la matière organique (biomasse) se déroule en deux étapes essentielles. La première étape est aérobie et la seconde anaérobie. La décomposition aérobie se produit dès l'enfouissement des déchets, en présence d'oxygène, suivie de la décomposition anaérobie en absence d'oxygène, pendant une période de temps plus longue. Cette dernière peut être subdivisée en quatre phases.

La dégradation aérobie de la matière organique [Chiriack 2001, Gourdon 2002, Lisk 1991]

Cette étape, durant quelques semaines ou mois, implique la décomposition aérobie avec la consommation de l'oxygène présent dans des déchets au moment du dépôt. La matière organique polymérique est d'abord décomposée par des microorganismes en oligomères et monomères qui sont ensuite dégradés avec production de CO₂, d'H₂O et d'énergie. L'énergie

libérée pendant cette étape est utilisée pour l'accroissement exponentiel du nombre de microorganismes (loi de Monod, 1942).

La dégradation anaérobie de la matière organique [ADEME 1999, Chiriac 2001, Gourdon 2002]

Cette étape est le métabolisme prédominant dans les décharges parce que la pénétration d'oxygène dans la masse de déchets est très faible surtout après leur recouvrement. On peut distinguer quatre phases dans la dégradation anaérobie : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse qui sont présentées sur la Figure 16.

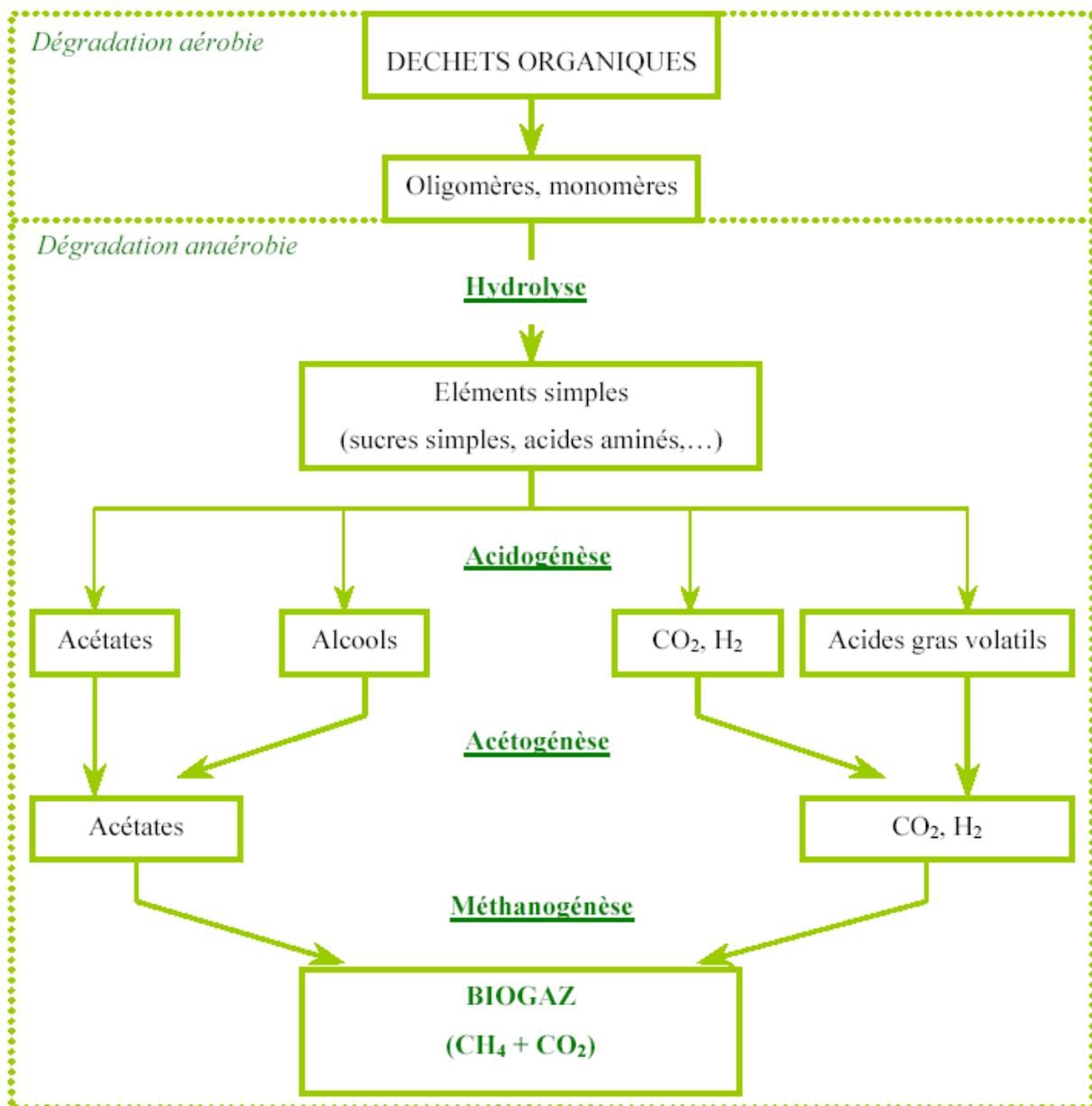


Fig. 16. Les phases de la décomposition des déchets

Hydrolyse – les macromolécules organiques (polysaccharides, protéines, composés lipidiques) sont hydrolysées en éléments plus simples, tels que sucres simples, acides aminés, acides gras à courtes chaînes, glycérol.

Acidogénèse – les substrats issus de la phase d'hydrolyse sont transformés par les bactéries en acides gras volatils, alcools, ammoniac, gaz carbonique et hydrogène.

Acétogénèse – les acides gras volatils (autres que l'acide acétique) sont transformés par les bactéries réductrices acétogènes en acétate, hydrogène et gaz carbonique.

Méthanogénèse – les substrats issus de la phase d'hydrolyse sont réduits par les bactéries en méthane et dioxyde de carbone.

1.1.3.2. Compositions du biogaz

Provenant de la fermentation anaérobie de la matière organique, le gaz de décharge est composé principalement du méthane (~55%) et du gaz carbonique (~40%), et est généralement saturé en vapeur d'eau. Il contient également d'autres gaz issus de la fermentation présents en traces, (H_2S , H_2 , mercaptans, ...) ou les composés qui se trouvent dans des déchets et qui sont aspirés avec le biogaz (hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, composés halogénés, siloxanes, métaux sous forme volatile, ...) [ADEME 2001, Allen 1997, Christensen 1996] :

Méthane (CH_4) – c'est un gaz inodore et incolore, plus léger que l'air. Il est inflammable : entre 5% et 15% de concentration volumique (v/v) dans l'air le mélange gazeux est explosif. pci^* volumique du méthane = $35,88 MJ/m^3$, pci massique = $50,04 MJ/kg$.

Dioxyde de carbone (CO_2) – c'est un gaz inodore et incolore, plus lourd que l'air. Il n'est ni inflammable ni toxique. En revanche, il diminue la teneur en oxygène ce qui peut provoquer l'asphyxie.

Hydrogène sulfuré (H_2S) – c'est un gaz avec une odeur caractéristique dite « d'œuf pourri » (détectable à partir de 0,7 ppm, à partir de 150 ppm il inhibe l'odorat), plus lourd que l'air. Il est inflammable et très toxique. Il provoque nausées, céphalées et vomissements. A haute concentration (>700 ppm) il affecte le système nerveux central et provoque la mort.

* **Pouvoir Calorifique Inférieur**

Le pouvoir calorifique massique ou volumique représente la quantité d'énergie dégagée par unité de masse ou de volume du carburant lors de la réaction chimique de combustion complète conduisant à la formation de CO_2 et H_2O . On distingue le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI) selon que l'eau obtenue par combustion se trouve à l'état liquide ou à l'état gazeux [Guibet 2000].

Mercaptans (S_xH_y) – ce sont des composées organiques soufrés qui sont très malodorants et souvent toxiques.

Composés organiques volatils (COV : hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, composés halogénés) – certains COV sont toxiques, en particulier le benzène qui est cancérigène.

En ce qui concerne l'influence sur l'environnement, les composés halogénés sont les composants traces les plus nocifs. Les composés chlorés provoquent la corrosion accélérée des moteurs.

Les exemples des concentrations de plusieurs composants du biogaz sont présentés en *Annexe I* [Allen 1996, Bergier 1999, Gaj 1999].

1.1.3.3. Paramètres influençant la production du biogaz

Il y a beaucoup de facteurs qui influent sur la production du biogaz. Selon l'EPA (USA : Environmental Protection Agency) la production du méthane dans une décharge dépend de cinq facteurs principaux [EPA 1999] :

1. Quantité de matière organique

La quantité de matière organique, telle que les déchets de papier, alimentaires et de jardin, disponibles pour des micro-organismes qui produisent le méthane, est le facteur le plus significatif pour la génération du méthane dans une décharge. La capacité de production du méthane dans une décharge est directement proportionnelle à la quantité des déchets organiques. La génération du méthane augmente puis se stabilise pendant que la décharge continue à recevoir les déchets et diminue graduellement après que la décharge cesse de recevoir des ordures. Cependant, les décharges peuvent continuer à produire du méthane pendant de nombreuses années après la fermeture.

2. Substances nutritives

Les bactéries qui produisent du méthane ont besoin de l'azote, du phosphore, du soufre, du potassium, du sodium et du calcium pour la croissance des cellules. Ces substances nutritives proviennent principalement des déchets.

3. Niveau d'humidité

Les bactéries ont également besoin d'eau pour la croissance des cellules et pour les réactions métaboliques. Les décharges peuvent recevoir de l'eau de différentes provenances : de la précipitation, des déchets, de l'infiltration d'eau de surface, de l'infiltration d'eau souterraine et de l'eau produite par décomposition ainsi que par la récirculation des lixiviats.

4. La température

Les températures élevées (en général dans la masse des déchets : 30-40°C) dans une décharge facilitent la croissance des bactéries qui produisent le méthane. La température des déchets dans une décharge dépend de la profondeur de la décharge, du nombre de couches couvrant la décharge, et du climat (près de la surface).

5. pH

Le méthane est produit dans un milieu neutre (près de pH 7). Le pH de la plupart des décharges est entre 6,8 et 7,2. Au-dessus du pH 8, la production du méthane est très faible.

Farquhar et Rovers (1973) ont développé une représentation schématique des facteurs qui influent sur la production des gaz dans des décharges. Ceci est décrit sur la Figure 17, et illustre comment des facteurs divers peuvent interagir en affectant finalement l'émission des gaz des déchets décomposés [Farquhar 1973].

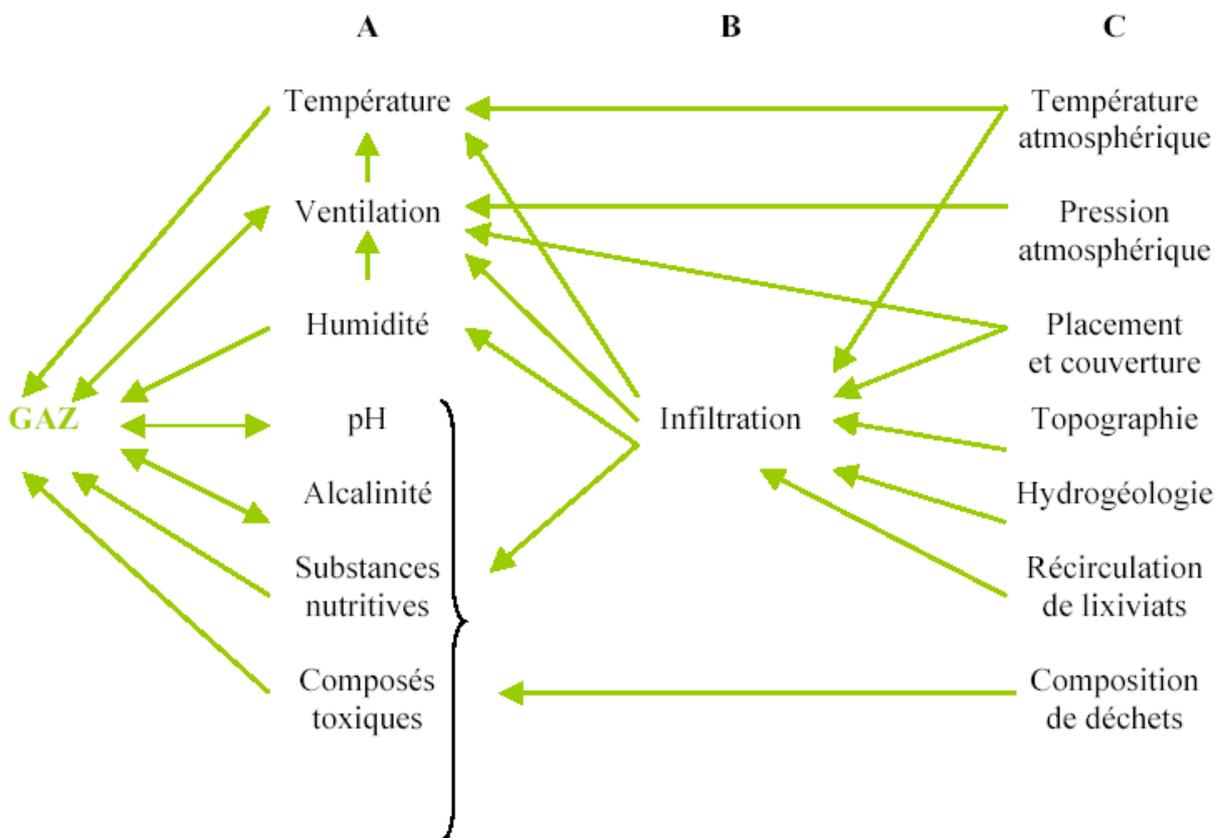


Fig. 17. Influences des différents facteurs sur la production du gaz de décharge

Par exemple, avec les facteurs du groupe A, qui concernent l'environnement microbien immédiat, les auteurs expliquent que la diminution de la température réduirait la production du CH₄. Ceci mènerait à l'accumulation des acides organiques qui diminuerait l'alcalinité et

le pH. Ces conditions réduiraient la production du CH₄. Le facteur du groupe B : l'infiltration, influe sur la plupart des facteurs dans le groupe A. Plusieurs facteurs du groupe C peuvent être influencés par la préparation et le fonctionnement de la décharge, et aussi ils peuvent interagir avec les facteurs d'autres groupes. Par exemple : des échanges entre l'air et les gaz présents dans des déchets seront influencés par la pression atmosphérique, le cheminement des gaz et de l'eau dans la décharge sera influencé par la disposition et la porosité des déchets et par des matériaux et des procédures utilisées pour couvrir des déchets.

La plus grande variation de la concentration de gaz peut être attribuée à l'aération et aux facteurs environnementaux tels que, des variations de la pression atmosphérique, des précipitations, de la température et de l'humidité du sol.

Une augmentation de l'émission du gaz dans une décharge avec la diminution de la pression atmosphérique a été observée [Boltze 1997, Christensen 1996, Christophersen 2001, Galle 2001]. La pression du gaz dans la décharge dépend du rapport entre le débit de production du gaz et le débit d'extraction de ce gaz. Lors d'une chute de pression atmosphérique, le déséquilibre avec la pression du biogaz peut favoriser des fuites de biogaz. En revanche, il a été constaté que lorsque la pression atmosphérique était haute le débit du biogaz pouvait baisser, jusqu'à 50% de la production habituelle [L'art du dégazage 1996].

La précipitation, l'irrigation, la glace et la couverture de neige, la terre gelée et la rosée peuvent diminuer la perméabilité à la surface, réduisant les fuites de gaz [Boltze 1997]. Cependant, les précipitations durant plusieurs jours peuvent également provoquer une augmentation de la production du méthane par une stimulation directe de la croissance des bactéries et par le rinçage des inhibiteurs [Wreford 2000].

L'humidité fournit l'eau qui est essentielle pour le processus de la production du gaz (digestion anaérobie) et elle sert de support pour le transport de masse dans la distribution des éléments nutritifs et des bactéries. Il a été suggéré que la production du biogaz est plus élevée dans les conditions de saturation d'humidité avec la récirculation des lixiviats, les boues de station d'épuration ou avec la fertilisation (azote et phosphore) dans le cas où l'on a seulement saturation en humidité [Komilis 1999]. La récirculation des lixiviats implique la réduction de leur quantité à épurer, l'augmentation de la vitesse de dégradation des déchets et l'accroissement de la production du biogaz [Barlaz 1990, Chan 2002, Christensen 1996, Lisk 1991, Mata-Alvarez 2003 Moreau-Le Golvan 2000].

1.1.4. Risques induits par la présence du biogaz dans les CDS

Les dangers principaux liés à la production du gaz de décharge sont : les nuisances et les odeurs, l'influence sur le climat global, pollution de l'eau et du sol, le risque d'incendie et d'explosion.

Nuisances et odeurs [ADEME 2001, Brosseau 1994, Christensen 1996, Lisk 1991]

Le gaz de décharge contient de nombreux composés malodorants, en particulier les composés soufrés: hydrogène sulfuré (H_2S) et mercaptans, tels que le méthyl-mercaptan (CH_3SH), l'éthyl-mercaptan (CH_3CH_2SH), etc.

Le biogaz contient également des composés toxiques : hydrogène sulfuré, les mercaptans et les composés organiques volatils (COV : benzène, chlorure de vinyle, toluène etc.). Les COV peuvent (avec la présence des oxydes d'azote issus, par exemple, des véhicules) mener aux conditions favorables à la formation locale de l'ozone - un gaz d'irritant.

Le gaz carbonique n'est pas toxique, mais il peut provoquer l'asphyxie à des concentrations élevées du fait de la diminution du taux d'oxygène.

Influence sur le climat global [Christensen 1996, West 1998]

Le méthane est un gaz à fort effet de serre et peut influencer la couche d'ozone. Il a le potentiel d'effet de serre global à long terme (*ang. global warming potential – GWP*) 35 fois plus grand que celui du CO_2 . Ce potentiel d'effet de serre plus élevé est dû à une plus grande capacité du méthane et de ses dérivés d'absorption de l'énergie infrarouge. Des estimations suggèrent que les émissions du méthane issu des décharges comptent pour 6 à 13% d'émissions anthropogènes globales de méthane (340 millions tonnes par an).

Des composants de trace du biogaz, en particulier chlorofluorohydrocarbures, peuvent influencer le climat global par la destruction de la couche d'ozone.

Pollution de l'eau [Christensen 1996]

Le biogaz migrant par le sol peut diffuser dans des eaux souterraines. Certains de ses composants (CO_2 , benzène) sont hydrosolubles et peuvent polluer ces eaux.

Pollution du sol [ADEME 2001, Christensen 1996]

Le biogaz migrant par le sol peut provoquer l'asphyxie des racines et l'assèchement du sol. Certains des composants de biogaz sont toxiques pour des plantes (p.ex. H_2S , composés halo-organiques).

Incendie et explosion [ADEME 2001, Christensen 1996, Lisk 1991, Żygadło 1999]

La plage d'explosivité du méthane pur dans l'air est de 5% (Limite inférieure d'explosivité, LIE) à 15% (Limite supérieure d'explosivité, LSE). Elle varie légèrement lorsque d'autres gaz sont présents (CO₂, H₂O, ...). En général le gaz de décharge contient plus de 30% de méthane et ne constitue donc pas un mélange explosif lui-même. Il peut néanmoins former un mélange explosif par exemple dans la canalisation et à l'intérieur des puits collectant du biogaz mélangé à l'air, mais aussi en dehors du système de dégazage (fuites de gaz dans des locaux mal ventilés, migration du gaz en sous-sol). La Figure 18 présente les chemins possibles de la migration du biogaz.

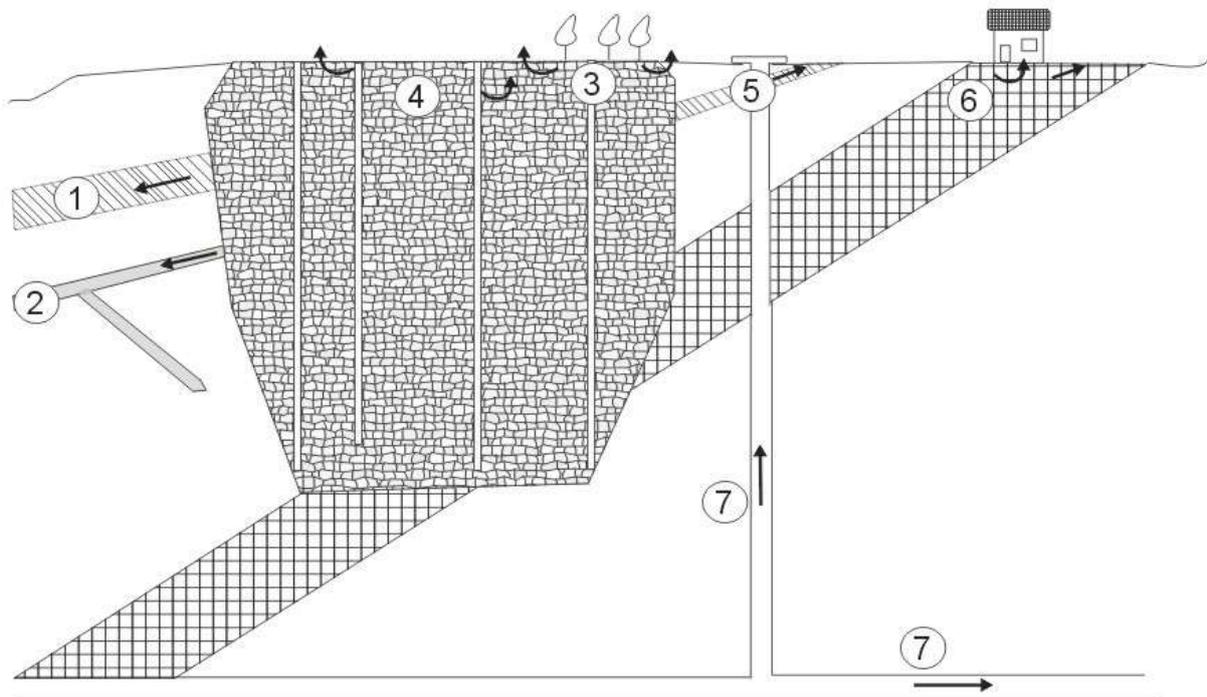


Fig. 18. Chemins possibles de la migration du biogaz

- 1- vers le bas par des couches perméables ;
- 2- par des cavernes et grottes ;
- 3- le long des racines des arbres ;
- 4- le long de l'installation sur la décharge ;
- 5- vers le haut par des couches perméables à l'air ou aux bâtiments ;
- 6- par des couches fissurées à l'air ou aux bâtiments (par exemple pièces en sous-sol) ;
- 7- par des puits.

1.2. Description des sites retenus

1.2.1. Caractéristiques des CDS étudiés

1.2.1.1. Localisation

Borde-Matin (France)

Le Centre de Stockage du Vallon de Borde-Matin est situé au sud-ouest de la commune de Roche-la-Molière, en limite communale de Firminy et du Chambon-Feugerolles, dans le département de la Loire (Photo 3) [Rapport 2003]. Il a une emprise foncière de 92,2 ha dont 62,5 ha sont classés en Installation Classée pour la Protection de l'Environnement [Satrod 2000]. Actuellement, la partie en exploitation a une superficie de 35 ha et est située entre 526 et 533 m d'altitude. La couche de déchets stockés a une épaisseur de 30 à 50 mètres. Les premiers secteurs urbanisés se trouvent au Nord à 500 mètres (quartier de Beaulieu-Pontin) et au sud-ouest à 1 km (quartier Bas-Mas) [Rapport 2003]. Le Centre de Stockage Borde-Matin a été ouvert en 1972, est géré par SATROD (Société Anonyme TRaitement Ordures Déchets), spécialisée dans le transfert et le traitement des déchets ménagers et assimilés par stockage [Satrod 2000].



Photo 3. Vue « à vol d'oiseau » du Centre de Stockage Borde-Matin (© Photo Satrod)

Barycz (Pologne)

Le Centre de Stockage Barycz à Cracovie est situé au sud de la ville, sur la frontière avec Wieliczka. Il a été localisé dans des affaissements restés après l'exploitation de saumure (Mine „Barycz”). Ce Centre de Stockage est situé en partie sur des élévations et en partie dans des affaissements, dans le bassin du torrent de Malinówka. Les altitudes de terrain de CDS Barycz sont : de 250 mètres d'altitude dans la partie nord-est à 280 mètres d'altitude dans la partie sud-ouest [Chwastek 1995]. Il a une emprise foncière de 36 ha divisée en trois parties (Photo 4) : (I) recultivée (exploitée dans les années 1974-1991), (II) en exploitation dans les années 1992-2004 et (III) ouverte dernièrement (en exploitation depuis février 2005). La couche de déchets stockés a une épaisseur : de 8 à 20 mètres sur la partie I et de 5 à 20 mètres sur la partie II. Les premiers secteurs urbanisés se trouvent à 500 mètres de décharge et ils sont placés dans une zone de la protection, qui est égale à 500 m pour les terrains de la commune Wieliczka et 300 m pour la commune Cracovie [Chwastek 1999]. Le Centre de Stockage Barycz est géré par Miejskie Przedsiębiorstwo Oczyszczania (MPO : Entreprise Municipale d'Assainissement).



Photo 4. Vue « à vol d'oiseau » du Centre de Stockage Barycz (© Photo MPO, Kraków)
I-partie recultivée; II-partie en exploitation; III-partie ouverte dernièrement

1.2.1.2. Méthodes d'exploitation

Borde-Matin (France)

Le volume résiduel des déchets enfouis est de l'ordre de 9000 Mm³, avec une moyenne de dix dernières années de 380 000 m³ de déchets enfouis par an. La prévision de fin d'exploitation a été estimée pour 2017, en tenant compte des incertitudes concernant la durée de vie du site. Seuls les déchets conformes à l'arrêté préfectoral d'autorisation sont admis, leur nature est vérifiée par caméra et un portique de radio-détection, ainsi que par un contrôle visuel au cours du déchargement sur site.

Depuis 2002 les déchets sont admis en provenance de seulement cinq départements : Loire, Haute-Loire, Puy-de-Dôme, Rhône et Isère. Le Tableau 4 présente la répartition par nature des déchets enfouis à Borde-Matin en 2004.

Tableau 4. Répartition des déchets par nature (Borde-Matin, 2004)

Catégories de déchets	Tonnages reçus en 2004	Répartition par nature, %
Ordures Ménagères (OM)	239 095	49,5
Déchets Industriels Banals (DIB)	110 876	23,0
Boues	33 324	6,9
Encombrants	23 191	4,9
Déchets de voirie	7 200	1,5
Refus de tri OM	3 647	0,8
Refus de tri DIB	58 353	12,0
Déchets divers (gravats, mâchefers)	1 037	0,2
Déchets d'amiante	5 798	1,2
Total	482 521	100,0

La Figure 19 présente l'évolution de la quantité déposée cumuleusement à Borde-Matin de 1998 à 2002, par nature des déchets [Rapport 2003].

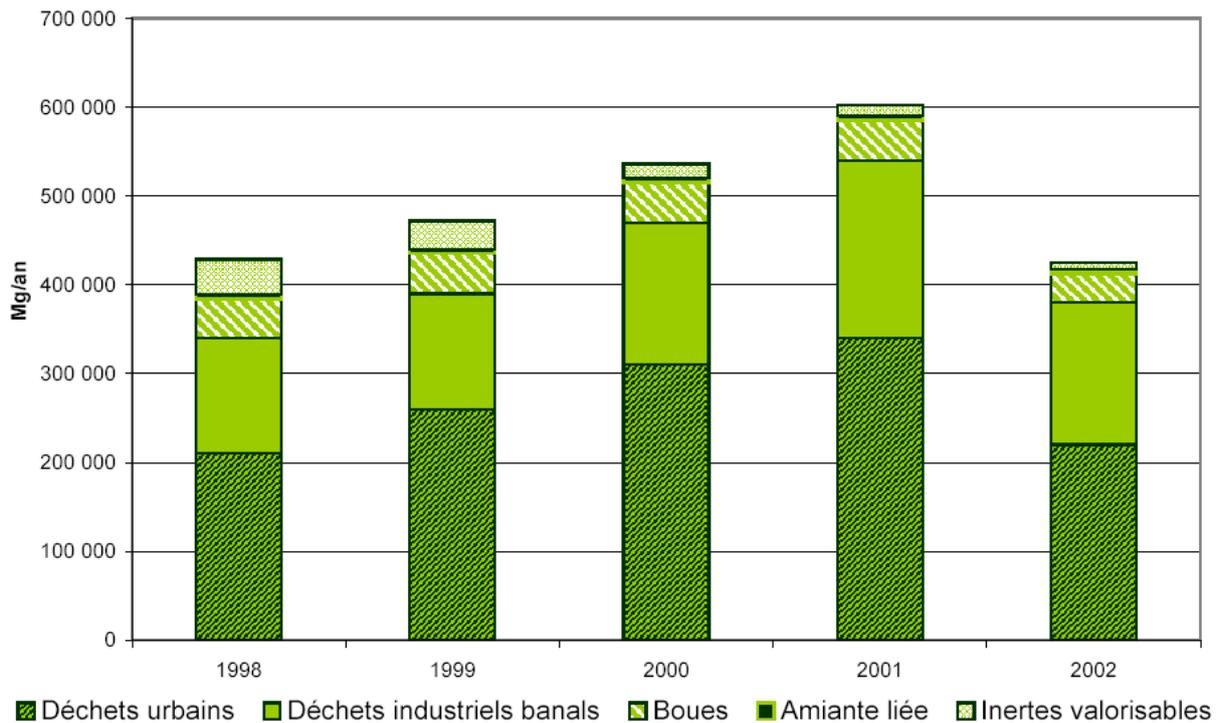


Fig. 19. Progression de l'activité par nature de déchets (Borde-Matin, 1998-2002)

Au début, des déchets ont été stockés sur toute la superficie de décharge. En 1995 le fond a été étanchéifié et le terrain de décharge a été divisé en alvéoles. Actuellement, le principe d'exploitation du Centre de Stockage Borde-Matin se base sur le comblement des vallons par strates successives de déchets déposés dans les alvéoles de surface limitée à 5 000 m² chacune. Une seule alvéole est ouverte à l'exploitation, la création de l'alvéole nouvelle suivant la fermeture de la précédente. Les déchets sont tassés par des compacteurs (Photo 5) et recouverts quotidiennement à l'aide de matériaux inertes et lourds (gravats, terres, mâchefers, ...). Ce procédé permet d'éviter l'envol des matériaux légers (papiers, plastiques...), de limiter les dégagements nauséabonds et de respecter l'intégration paysagère. La compaction élimine les poches d'oxygène donc les risques d'incendie et empêche la nidification des rongeurs. Au comblement de l'alvéole, exploitée à sa hauteur maximale autorisée de 8 mètres, une couverture est réalisée en matériaux imperméables avec une pente minimale de 4 % afin que les eaux de ruissellement rejoignent les caniveaux périphériques. Les lixiviats sont captés par un drainage horizontal et acheminés à la station d'épuration qui se trouve à l'aval du terrain de décharge. Les véhicules transportant des déchets sont enregistrés et pesés à l'entrée et à la sortie [Rapport 2003, Satrod 2000].



(A)

(B)

Photo 5. Compacteurs en action à CDS Borde-Matin (© Photo K.Szafnicki, ENSM.SE) :

(A) CAT (poids ~37 tonnes); (B) Vandel (poids ~44 tonnes)

Barycz (Pologne)

La quantité de déchets enfouis par an sur le Centre de Stockage Barycz est de 190 000 tonnes environ. Ce sont surtout des déchets ménagers, des déchets des entreprises de production, et du secteur tertiaire issu des communes Cracovie et de Wieliczka. Cette décharge n'accepte pas des déchets industriels, liquides, toxiques, nocifs et dangereux, et aussi des déchets de composition inconnue. La prévision de la fin d'exploitation est estimée à 2017. Le Tableau 5 présente la répartition des déchets stockés par nature (données de janvier 2001) [Pajak 2002], et la Figure 20 illustre l'évolution de la quantité des déchets stockés à Barycz (données récupérées au CDS Barycz).

Tableau 5. Répartition des déchets stockés à CDS Barycz (janvier 2001)

Catégories des déchets	Répartition par nature, %
Déchets organiques	40,0
Papier et carton	15,9
Emballages multicouches	9,1
Verre	9,8
Plastique	13,6
Métaux	1,8
Textiles	2,2
Bois, cuir, caoutchouc	5,1
Éléments minéraux	1,9
Déchets dangereux	0,3
Autres	0,1

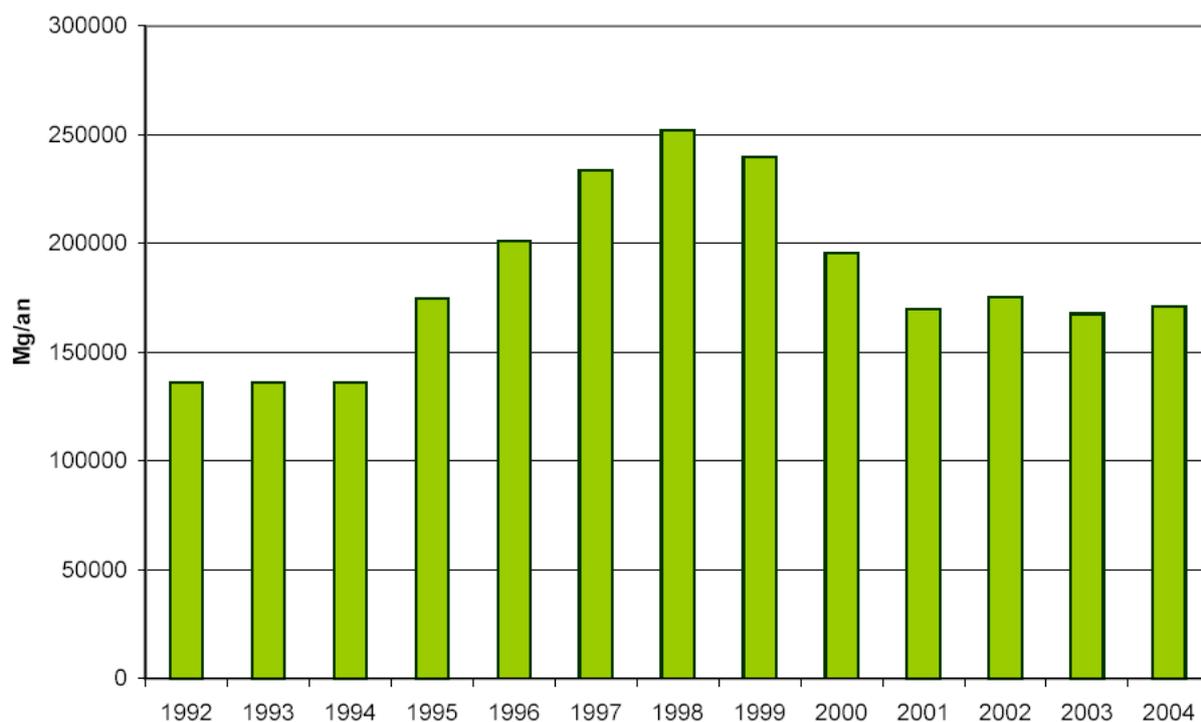


Fig. 20. Évolution de la quantité des déchets stockés à Barycz (1992-2004).

Sur la partie en exploitation dans les années 1974 – 1991 (actuellement recultivée), des déchets ont été stockés dans un enfoncement de terrain sans aucune couche étanche entre le sol et déchets stockés et sans l'assurance de la protection contre l'influence de la décharge sur l'environnement. L'étanchéité a été mise en place sur la partie en exploitation depuis janvier 2005 (en conformité avec la normalisation d'UE).

Actuellement, des déchets déposés sont tassés par des compacteurs (Photo 7A), désinfectés par le chlorure de chaux ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) et recouverts quotidiennement à l'aide de terre. Ce procédé permet de limiter les dégagements nauséabonds, et aussi d'éviter l'envol des matériaux légers (papiers, plastiques...). Les lixiviats sont acheminés à la station d'épuration municipale à Płaszów par un système de canaux (Photo 7B) et la canalisation. Les véhicules avec des déchets sont enregistrés et pesés à l'entrée et à la sortie.



(A)



(B)

Photo 6. Stockage des déchets sur: (A) le CDS Borde-Matin; (B) le CDS Barycz

(© Photo K.Szafnicki, ENSM.SE)



(A)



(B)

Photo 7. (A) Compacteur BOMAG en action sur le CDS Barycz (poids ~ 32 tonnes)

(© Photo K.Szafnicki, ENSM.SE) ; (B) évacuation des lixiviats (© Photo M.Meres, UJ-ENSM.SE)

1.2.1.3. Dégazage

Borde-Matin (France)

L'installation de dégazage a été mise en place en 1995. Après la fermeture, une alvéole est mise en dépression par la connexion au réseau de collecte du biogaz. Au CDS Borde-Matin il y a trois réseaux principaux (R1, R2, R3), qui récupèrent le biogaz de toute la superficie de la décharge, grâce aux 260 puits (Photo 8).

Le biogaz capté est drainé vers l'installation de traitement du biogaz (capacité : 4500 Nm³/h) qui est composée des éléments suivants [Satrod 2000]:

- un séparateur d'eau en inox ;
- un groupe de trois surpresseurs (3 x 2300 Nm³/h) permettant de maintenir dans le réseau de collecte du biogaz une dépression de 150 mbars ;
- un comptage biogaz avec une correction pression - température ;
- un sécheur de gaz de type frigorifique, avec échangeur biogaz/eau glycolée et groupe de production d'eau glacée.



(A)

(B)

Photo 8. (A) Puits et (B) trois collecteurs principaux à CDS Borde-Matin

(© Photo K.Szafnicki, ENSM.SE)

Barycz (Pologne)

L'installation de dégazage a été mise en place en 1993. Elle est divisée en deux parties : une construite sur la partie recultivée (I), la deuxième sur la partie de décharge en exploitation dans les années 1992-2004 (II). L'installation de la partie I récupère le biogaz de 41 puits (Photo 9A). Sur la partie II il y a 22 puits et 8 tuyaux horizontaux, qui conduisent le biogaz à une station de collecte intermédiaire, placée à côté de groupes électrogènes. Le biogaz est ensuite acheminé jusqu'à la station de collecte, près de la partie recultivée (Photo 9B), où il se mélange avec le biogaz de cette partie de la décharge. Le réseau de dégazage est constitué des collecteurs de diamètre 110 mm et d'un collecteur principal de diamètre 160 mm. Au total, il y a environ 300 mètres courants de tuyauteries de dégazage [Instrukcja 1999, Soliński 2001]. L'installation de dégazage sera mise en place aussi sur la partie III de CDS Barycz, au fur et à mesure de stockage de déchets.



(A)

(B)

Photo 9. Dégazage de décharge Barycz (© Photo M.Meres, UJ-ENSM.SE):

(A) puits en partie recultivée; (B) station de collecte (pompage et compression)

1.2.1.4. Valorisation du biogaz

Borde-Matin (France)

La réalisation du projet de valorisation du biogaz est effectuée par la société Biovale qui regroupe, à part égale, Satrod et Elyo Centre-Est Méditerranée. Elle a été démarrée en 1999. Le biogaz est valorisé en électricité par 7 groupes électrogènes (GE) comprenant des moteurs Waukesha (type L7042 GLD [Waukesha 2004]) qui permettent produire de puissance électrique totale nominale 6,2 MWe (Photo 10). Les principales caractéristiques de groupes électrogènes sont suivantes :

- moteurs de 12 cylindres en V ;
- cylindrée : 115 litres ;
- taux de compression : 8 à 1 ;
- vitesse de rotation de 1000 tours/minute ;
- puissance électrique nominale sortie alternateur : 926 kWe ;
- puissance calorifique nécessaire : 2,7 MW

Pendant les opérations de maintenance, en cas de problème sur l'installation ou d'excès le biogaz est brûlé dans des torchères fermées (entre 0 et 4) VALT, d'une capacité unitaire de 1000 ou 1500 m³/h (Photo 11). Elles brûlent le biogaz à 900°C. Le gaz de combustion est composé de 75% de CO₂ [Satrod 2000, Elyo 2004].

Le courant généré à partir du biogaz valorisé est livré à EDF via une ligne enterrée de 1,5 km. Le poste source et le poste de livraison permettent de livrer en nominal 6,2 MWe en 20 kV. Il

est racheté par EDF en vertu de la loi du 10 février 2000 *relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité* (modifiée par l'ordonnance n° 2002-1451 du 12 décembre 2002, par loi du 3 janvier 2003, du 2 juillet 2003 et du 21 juillet 2003), au prix de 4 à 6 c€/kWh HT selon la puissance [JO 2000].

Pour assurer le meilleur fonctionnement de groupes électrogènes il est nécessaire d'optimiser la collecte du biogaz en maintenant des teneurs en méthane et en oxygène nécessaires à la bonne combustion du biogaz. Le réglage s'effectue à chaque tête de puits et sur chaque branche connectée au réseau afin de créer un état de dépression spécifique à chaque zone de drainage. En 2002 le débit horaire moyen de biogaz collecté était proche de 4 400 Nm³/h , avec des teneurs en méthane de 48%, qui a été collecté 99,9% du temps et valorisé à 78% du volume [Rapport 2003].



(A)

(B)

Photo 10. (A) Station Biovale ; (B) Moteur Waukesha (© Photo K.Szafnicki, ENSM.SE)



Photo 11. Torchères (©Photo K.Szafnicki, ENSM.SE)

Barycz (Pologne)

Le biogaz du Centre de Stockage Barycz est valorisé en énergie électrique et thermique depuis 1998. La valorisation du biogaz est effectuée dans trois blocs énergétiques dans des conteneurs (prod. HAASE), comprenant les moteurs Deutz (deux de 8 cylindres, un de 12 cylindres) (Photo 12). Ce sont les moteurs à quatre temps avec allumage à étincelle, alimentés en carburant gazeux [Deutz 2004]. La puissance électrique totale nominale produite à Barycz est de 873 kWe. Elle est livrée au réseau de la société distributrice d'énergie. L'énergie thermique est exploitée pour le chauffage des bâtiments techniques et sociaux du CDS et aussi pour la production de l'eau chaude. Le fonctionnement correct de l'installation de la valorisation est contrôlé par INiG (Instytut Nafty i Gazu – Institut polonais du Pétrole et du Gaz). Pour assurer le meilleur fonctionnement de groupes électrogènes il est nécessaire d'optimiser les valeurs de dépression à chaque tête de puits pour recevoir le biogaz avec une composition convenable (teneur en méthane) sans aspiration d'air. Grâce aux réglage et au contrôle systématiques la concentration du méthane dans le biogaz à Barycz est élevée (de 55 à 65 % v/v en général) et la concentration en oxygène est insignifiante (< 1% v/v) [Instrukcja 1999].



(A)



(B)

Photo 12. (A) Blocs énergétiques à CDS Barycz; (B) Détail du moteur Deutz

(© Photo K.Szafnicki, ENSM.SE)

1.2.1.5. Résumé - comparaison

La comparaison de deux Centres de Stockage avec quelques informations détaillées est présentée dans le Tableau 6.

Tableau 6. Comparaison des Centres de Stockage Borde-Matin et Barycz

	Borde-Matin	Barycz
Année d'ouverture	1972	1974
Superficie	62,5 ha dont 35 ha en exploitation	36 ha dont 15,7 ha en exploitation
Altitude	526 à 533 m	250 à 280 m
Couche des déchets stockés	30 – 50 m	5 –20 m
Quantité de déchets stockés (moyenne de 5 dernières années)	469 000 Mg/an	176 000 Mg/an
Exploitation	Déchets sont tassés par des compacteurs et recouverts à l'aide de matériaux inertes et lourds	
Dégazage	depuis 1995 260 puits	depuis 1993 63 puits + 8 horizontaux
Valorisation	depuis 1999 7 groupes électrogènes 52 GWh/an	depuis 1998 3 groupes électrogènes 2 GWh/an + chaleur
Année de fermeture (prévisionnelle)	2017	2017

1.2.2. Caractéristiques climatiques des régions

1.2.2.1. Małopolska (Pologne)

La ville Kraków (Cracovie) est située sur le terrain de la région – Małopolska, au sud de la Pologne (Figure 21). Elle est située sur deux bords de la rivière Wisła (Vistule), dans sa vallée et elle est protégée par la partie ouest du massif de Tenczyn et le plateau de Cracovie, sur l'altitude moyenne de 219 mètres [Kraków 2000].



(A)

(B) (croix rouge : localisation de CDS Barycz)

Fig. 21. Géographie: (A) situation de la région Małopolska ; (B) région Małopolska

Le climat de Cracovie et de Wieliczka est transitoire, modérément chaud de l'étage climatique des Carpates. Il se caractérise par une diversité (et instabilité) climatique, à cause d'influences possibles et de brassages entre quatre types de masses d'air : polaire-maritime (provoquant des dégels et des précipitations en hiver et des refroidissements, des précipitations et des orages en été) ; tropique-maritime (provoquant des réchauffements) ; continentale (froide en hiver et chaude en été) et de l'air frais et sec arctique [Kraków 2000, Woś 1999].

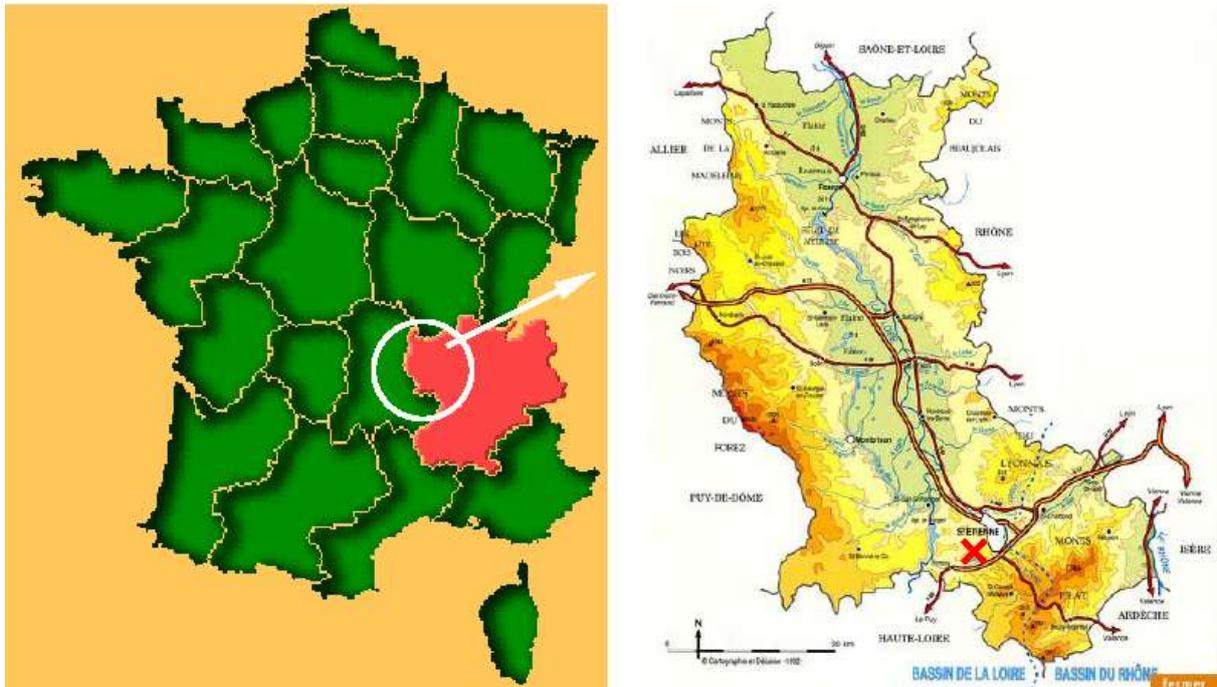
La température moyenne interannuelle est de 8,1°C. La température moyenne de janvier varie de -4°C à -2,1°C, et celle de juillet de 18°C à 19,9°C. La valeur minimale de la température enregistrée à Cracovie est de -33,1°C, et maximale de 37,4°C [Woś 1999, Kraków 2000]. L'hiver dure environ 70 jours, l'été 100 jours, le printemps 64 jours et l'automne 62 jours.

L'emplacement de Cracovie dans la vallée de Vistule provoque le niveau d'humidité élevé dans cette ville (~80%) et la présence fréquente de brouillard. Pendant l'année on enregistre en moyenne 90 jours de brouillard [Haber 1990, Kraków 2000].

La moyenne annuelle de précipitation est de 665 mm, qui sont observées surtout en été et en automne. Le nombre de jours avec précipitation est variable, le plus souvent il est de 170 jours par an. On observe le nombre minimal de jours pluvieux en septembre et en octobre (11 jours) et maximal en juin et juillet (15 jours). La neige est observée d'octobre jusqu'à avril (80% en janvier). La couverture de neige dure en moyenne 65 jour par an. Les vents dominants sont orientés sur l'axe est-ouest [Kraków 2000, Woś 1999, WIOS 1999]. La pression moyenne est de 985,1 hPa, avec un minimum de 948,8 hPa et maximum de 1006,2 hPa (données de deux dernières années).

1.2.2.2. Loire (France)

La Loire est un département rhônalpin ; la région située sur trois massifs montagneux (le Massif central, le Jura et les Alpes) et traversée du nord au sud par l'axe Rhône-Saône. La région Rhône-Alpes offre une diversité importante de paysages et de climats qui reste en grande partie associé aux massifs montagneux (Figure 21) [Rhône-Alpes 2004].



(A)

(B) (croix rouge : localisation de CDS Borde-Matin)

Fig. 22. Géographie : (A) situation de la région Rhône-Alpes ; (B) département de la Loire

Le département de la Loire comporte une grande diversité topographique, en créant des micro-régions de nuances climatiques. Une partie de la frontière sud du département est située en vallée du Rhône et bénéficie de ce fait d'un climat quasi méditerranéen. Les plaines, bien abritées par les montagnes environnantes (avec un climat montagnard) possèdent un climat à tendance continentale [Météo France 2003].

La région dans laquelle se trouve CDS Borde-Matin (près de Roche-la-Molière) possède un climat continental montagnard (81 jours de gel par an), influencé par des flux océanique et méditerranéen. Amplitude thermique annuelle est de 26°C entre les mois les plus froids (décembre, janvier) et les plus chauds (juillet, août). La température moyenne interannuelle est de 9,8°C.

Les précipitations représentent 160 jours par an avec une moyenne annuelle de 860 mm. Les pluies les plus importantes sont observées en avril, mai et juin.

Les vents dominants sont orientés Nord/Nord-Ouest, Sud/Sud-Est (NNO-SSE), avec 60% provenant du Sud [Rapport 2003].

La pression moyenne est de 951,8 hPa, avec un minimum de 940,3 hPa et maximum de 962,4 hPa (données de quatre dernières années).

.

1.2.2.3. Résumé - comparaison

La comparaison de climat de deux régions avec quelques informations détaillées est présentée dans le Tableau 7.

Tableau 7. Comparaison de climat de la Loire et de Małopolska

	Małopolska	Loire
Climat	transitoire de l'étage climatique de Carpates	continental montagnard
Amplitude thermique annuelle	22°C	26°C
Mois le plus froids	janvier	décembre, janvier
Mois le plus chauds	juillet	juillet, août
Pression atmo. moyenne interannuelle	985,1 hPa	951,8 hPa
Température moyenne interannuelle	8,1°C	9,8°C
Nombre de jours avec la précipitation	170	160
Précipitation moyenne annuelle	665 mm	860 mm
Direction dominante du vent	Est – ouest	NNO – SSE 60% de Sud

2. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE ET DE MODÉLISATION

.....

2.1. Introduction à l'identification de modèles

2.1.1. Objectif

Dans cette partie nous nous efforcerons de mettre en avant un certain nombre d'outils mathématiques qui, appliqués à la problématique analysée, nous permettront d'identifier, de mieux cerner et de quantifier, dans la mesure du possible, les relations à court terme (heures, jours) existant entre les paramètres caractéristiques du biogaz généré et, par exemple, les paramètres météorologiques. Il s'agira d'essayer de déterminer des modèles des relations afin de permettre une exploitation plus approfondie des données recueillies sur le processus.

2.1.2. Identification d'un modèle de comportement

L'identification est une technique permettant de déterminer un modèle mathématique pour expliquer le comportement d'un procédé dynamique sur la base des mesures d'entrées (U) et de sorties (Y), et en tenant compte, si cela est possible, des connaissances *a priori* sur le procédé identifié [Gentil 1990, Szafnicki 1991]. Cette technique est aussi utilisée pour l'établissement des modèles des signaux, considérés comme des sorties des procédés dont les entrées sont inconnues. On peut donc voir l'identification des modèles mathématiques comme une technique particulière de traitement du signal qui permet la transformation des mesures « brutes » en modèles mathématiques.

Les modèles identifiés n'ont pas pour objectif de décrire les mécanismes des phénomènes apparaissant à « l'intérieur » du procédé (par exemple : les relations physico-chimiques), mais représentent le comportement de ces mécanismes d'une façon relativement simple (la structure et les propriétés du modèle sont connues, le plus souvent linéaires) et compacte (modèle le moins complexe possible).

2.1.3. Protocole d'identification

Le protocole d'identification des modèles communément admis implique les étapes suivantes [Bielińska 1986, Gentil 1990, Lyn 1990, Szafnicki 1991, Szafnicki 1995] :

1. Planification de l'expérience pour collecter les données numériques (par exemple choix de la période d'échantillonnage)

2. Préparation des données « brutes » afin de bien mettre en évidence la dynamique du procédé (par exemple : filtrage de données pour éliminer des « pics », centrage)

Exemple : Filtre passe-bas de 1^{er} ordre

Il est souvent nécessaire de lisser des « données brutes » pour réduire des fluctuations rapides et supprimer des interférences non désirées ou des « bruits ». En outre, un filtrage est nécessaire quand on souhaite réduire la période d'échantillonnage du signal (i.e. sous-échantillonner : ne garder qu'une mesure sur quelques) afin de, par exemple, ajuster un ensemble de mesures sur un autre, ayant une période d'échantillonnage plus grande. Il est cependant important de disposer d'un nombre d'échantillons suffisamment significatif (quelques dizaines au minimum) afin d'avoir un biais suffisamment faible.

L'application d'un filtre sur les données « brutes » permet d'obtenir des données filtrées, lissées selon le besoin.



Dans le cas des données échantillonnées (i.e. mesurées selon une période de temps T_e régulière), on utilise par exemple des filtres discrets linéaires ; faciles à appliquer aux signaux échantillonnés.

Ces filtres s'expriment par des *équations linéaires récurrentes* de type :

$$DF(i) = -a_1 \cdot DF(i-1) - a_2 \cdot DF(i-2) + \dots - a_n \cdot DF(i-n) + \dots \\ \dots + b_0 \cdot DB(i) + b_1 \cdot DB(i-1) + \dots + b_m \cdot DB(i-m) \quad (1)$$

avec i = l'indice de l'échantillon actuellement considéré,

$i-1$ = l'échantillon mesuré à l'instant précédent etc.,

$n \geq m$ étant l'ordre du filtre,

son gain statique étant :

$$K = \frac{\sum_{i=0}^m b_i}{1 + \sum_{i=1}^n a_i} \quad (2)$$

Pour un filtre d'ordre un et de gain unitaire ($K=1$), l'équation récurrente s'écrit :

$$DF(i) = -a_1 \cdot DF(i-1) + (1+a_1) \cdot DB(i) \quad (3)$$

soit : $a_F = -a_1$ le coefficient du filtre de 1^{er} ordre, $a_F \in]0,1[$

En introduisant l'opérateur « retard » z^{-1} tel que :

$$DF(i-1) = z^{-1} \cdot DF(i) \quad (4)$$

on peut écrire la *fonction de transfert discrète* du filtre :

$$DF(z) = \left(\frac{1 - a_F}{1 - a_F \cdot z^{-1}} \right) \cdot DB(z) \quad (5)$$

3. Choix du type de modèle

Modèles linéaires discrets (Figure 23)

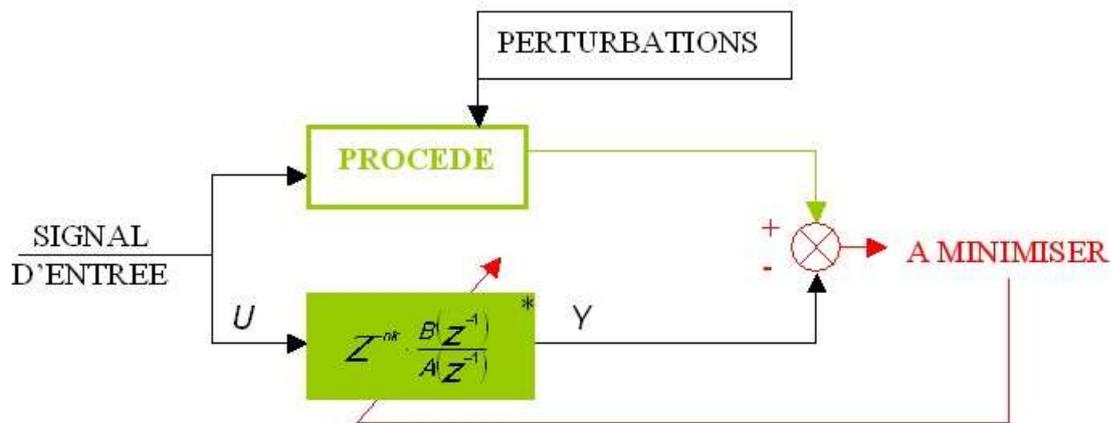


Fig.23. Schéma d'un modèle linéaire discret

* Fonction de transfert en transformée discrète, où :

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + \dots + b_n \cdot z^{-m} \quad (6)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + \dots + a_n \cdot z^{-nf} \quad (7)$$

nk : retard pur discret (nombre d'échantillons de retard)

et $nf \geq m$ (condition de réalisabilité du modèle)

A, B : polynômes de degrés respectifs nf et $m = nb + 1$

nb : nombre de coefficients estimés dans $B(z^{-1})$

nf : ordre du modèle

Cette fonction de transfert peut se reformuler comme une équation récurrente de façon suivante :

$$Y \cdot A(z^{-1}) = U \cdot z^{-nk} \cdot B(z^{-1}) \quad (8)$$

soit :

$$\begin{aligned} Y(i) = & -a_1 \cdot Y(i-1) - a_2 \cdot Y(i-2) + \dots - a_n \cdot Y(i-n) + \dots \\ & \dots + b_0 \cdot U(i-nk) + b_1 \cdot U(i-1-nk) + \dots + b_m \cdot U(i-m-nk) \end{aligned} \quad (9)$$

où U est le signal d'entrée et Y est le signal de sortie du modèle.

4. Estimation des ensembles des coefficients $\{a_i\}$ et $\{b_j\}$ - plusieurs simulations du processus, afin de déterminer la structure optimale du modèle.
5. Choix de la (d'une) structure optimale du modèle (retard pur, degrés de polynômes, ...)

La structure optimale d'un modèle se déterminera en analysant l'évolution du critère quadratique normé QN en fonction du degré analysé (nk , nf , m) :

$$QN = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V(i) - V_M(i))^2}{\sum_{i=1}^N V(i)^2}} \quad (\%) \quad (10)$$

N étant le nombre des valeurs mesurées (échantillons)

Ce critère traduit un écart « moyen normé » entre les valeurs mesurées (V) et modélisées (V_M), exprimé en %. On estime en général qu'un modèle est acceptable quand la valeur QN est de l'ordre 20 à 30%. Si QN est trop faible (inférieur à 10%), il faut se méfier car cela peut être dû au fait qu'on a modélisé les perturbations.

Le choix de la structure du modèle se base sur des étapes faisant intervenir des tests de structure [Bielińska 1986, Gentil 1990, Lyn 1990, Szafnicki 1991, Szafnicki 1995] résumés ci-après :

I. Recherche du nk (retard pur) optimal :

On l'effectue en analysant l'évolution du critère QN en fonction de nk . En bref ; il s'agit de déterminer une (ou des) valeurs « candidates » de nk_{opt} par la sélection d'une ou des valeurs de nk les plus grandes possible pour lesquelles QN est encore faible (Figure 24).

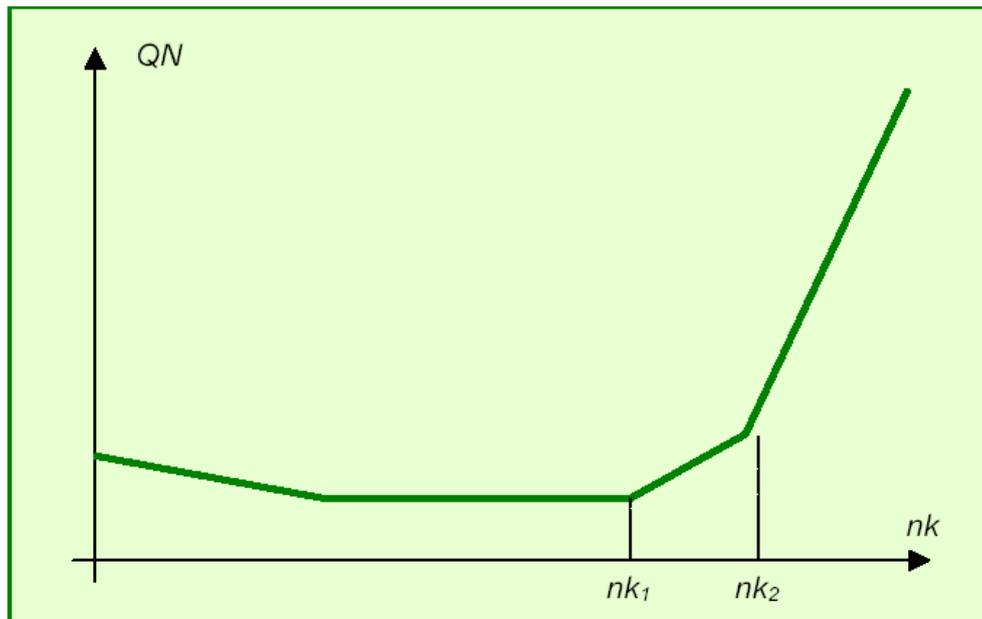


Fig. 24 . Schéma d'évolution classique de $QN(nk)$ avec deux valeurs candidates pour nk_{opt}

II. Recherche du nf (ordre du modèle ; pour simplifier on prendra désormais $m=nf$) optimal nf_{opt} :

Elle correspond à un bon (le meilleur ?) compromis entre la précision du modèle (QN faible) et sa simplicité (nf_{opt} faible), avec nk_{opt} choisi précédemment.

On cherche nf_{opt} en analysant, entre autres, l'évolution du critère QN en fonction de nf . Cette fois il s'agit de déterminer une (ou des) valeurs « candidates » de nf_{opt} par la sélection d'une ou des valeurs de nf les plus faibles possible pour lesquelles QN est également faible (Figure 25).

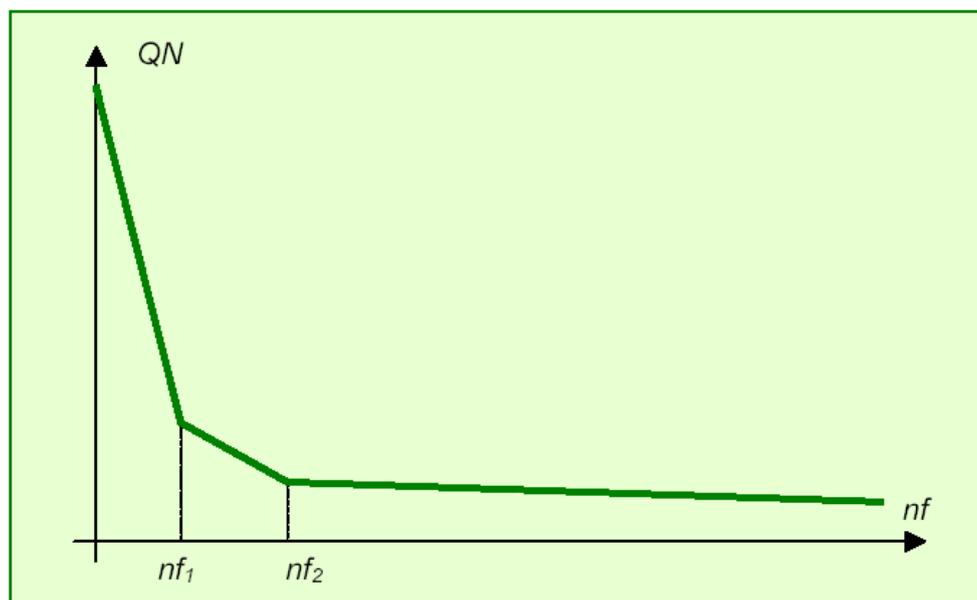


Fig. 25 . Schéma d'évolution classique de $QN(nf)$ avec deux valeurs candidates pour nf_{opt}

III. Test de comparaison des coefficients trouvés par identification des polynômes A et B avec leurs écarts-types estimés :

La fonctionnalité d'identification du modèle dans Matlab* fournit des estimations des coefficients a_i et b_j des polynômes A et B accompagnés de leurs écarts-types respectifs (σ_i , σ_j), permettant d'apprécier leurs précisions d'estimation. Les comparaisons entre les coefficients des polynômes et leurs écarts-types donnent la précision sur l'estimation des coefficients et permettent de remettre en cause le modèle quant à son ordre. Par exemple, si on a : $|a_i| < \sigma_i$ (ou $|b_j| < \sigma_j$) : alors le coefficient a_i (b_j) est probablement nul et on peut donc réduire le degré du polynôme correspondant. En général, des rapports $|a_{nf}|/\sigma_{nf}$ diminuent sensiblement quand l'ordre du modèle est « trop élevé ». Il faut toutefois faire une synthèse (et parfois un compromis) entre ce test et les précédents.

IV. Explicitation des caractéristiques du modèle de 1^{er} ordre.

Les caractéristiques du modèle sont les suivantes :

- coefficients des polynômes A et B ($nf=1, m \leq nf$)
- gain statique K

$$K = \frac{\sum_{i=0}^m b_i}{1 + \sum_{i=1}^n a_i} \quad (11)$$

- temps caractéristiques : retard pur $T_d = nk \cdot T_e$ (en temps) ; constante de temps τ

Les paramètres caractéristiques du modèle sont illustrés sur la Figure 26.

* MATLAB est un acronyme pour « MATrix LABoratory » [Mathworks 2005]. C'est un langage de programmation universel de haut niveau. Il intègre des calculs, une visualisation et une programmation dans un environnement de développement simple et pratique [Brzózka 1998, Lapresté 1992].

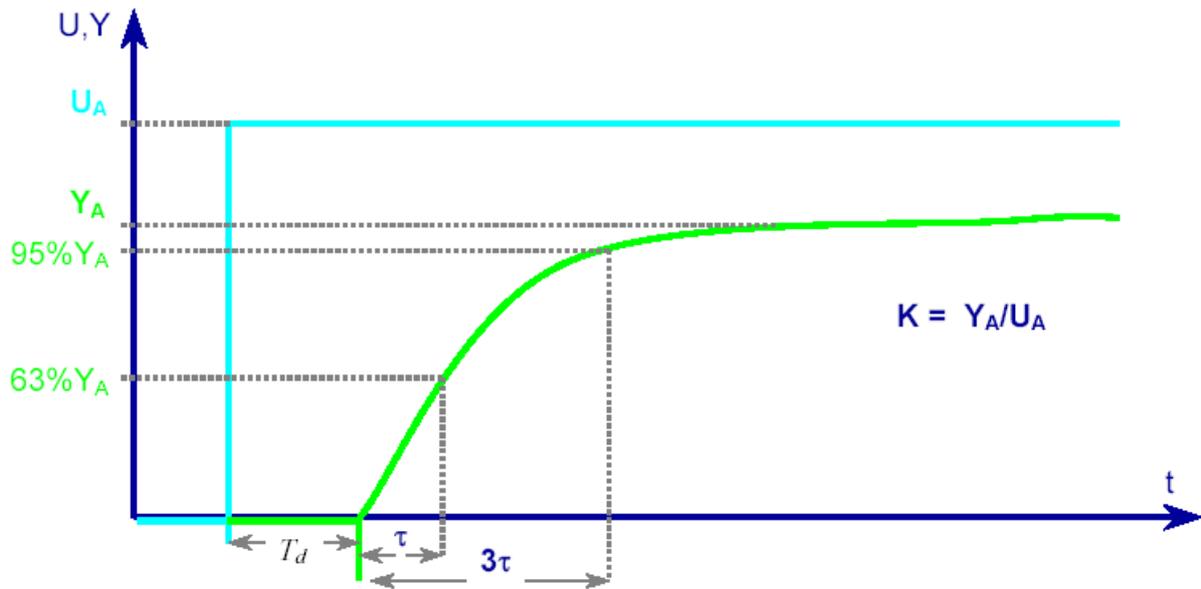


Fig. 26. Paramètres caractéristiques du modèle de 1^{er} ordre avec retard : K , τ , T_d illustrés en réponse à un échelon

Étant donné un modèle discret ayant un pôle (i.e. racine de $A(z^{-1})$) réel $z p_i$; la constante de temps τ_i correspondante y est reliée par l'équation :

$$z p_i = \exp(-T_e / \tau_i) \quad (12)$$

où T_e est la période d'échantillonnage, soit :

$$\tau_i = -T_e / \log_e(z p_i) \quad (13)$$

6. Validation du modèle – interprétation des résultats numériques.

Afin de valider un modèle il faut analyser les caractéristiques suivantes :

- universalité du modèle (il faut pouvoir l'utiliser dans des conditions expérimentales diverses) ;
- parcimonie : nombre des coefficients minimal nécessaire (et suffisant) ;
- identifiabilité des paramètres caractéristiques .

2.1.4. Récapitulatif

Les modèles mathématiques obtenus au terme d'un protocole d'identification peuvent trouver des applications très diverses. Par exemple : pour la simulation du procédé afin d'étudier son comportement dynamique dans des conditions opératoires différentes, la prédiction de son comportement, la séparation des perturbations, etc. Dans ce qui précède on a présenté une démarche de modélisation de type « comportementale », dont l'objectif est de déterminer des modèles traduisant aussi fidèlement que possible des influences de comportement entre des paramètres donnés, en faisant abstraction, dans la mesure du possible, des influences connexes, « perturbatoires ». Ce type de modèle peut être utilisé, par exemple, pour l'estimation et la prédiction de l'évolution des paramètres donnés dans le temps. En général il est plus aisé et rapide de formuler des modèles de « comportement » que des modèles de « connaissance », qui demandent une formulation physico-chimique précise.

Dans ce projet, l'objectif recherché est la détermination des formulations pour une exploitation plus approfondie des données recueillies. Par la suite, on s'en servira pour déterminer, par exemple, les modèles des relations : paramètres météo → biogaz ou paramètre d'exploitation → biogaz, afin d'en extraire des paramètres dynamiques caractéristiques, tels que les retards ou les constantes de temps.

2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode factorielle qui permet de quantifier et de visualiser des relations entre différentes variables.

Elle sera employée par la suite pour étudier les interdépendances à moyen terme (mois, année) entre les caractéristiques du biogaz et les paramètres extérieurs, par exemple les paramètres météorologiques.

Les méthodes factorielles fournissent des représentations synthétiques de vastes ensembles d'observations, en général sous forme de visualisations graphiques. Pour cela, on cherche à réduire les dimensions du tableau de données en représentant les associations entre individus et entre variables dans des espaces de faibles dimensions [Lebart 2000].

L'idée est de transformer les p variables observées (mesurées) en p variables orthogonales, appelées composantes principales, qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine [Chatfield 1995]. En visualisant les composantes principales (transformées) selon les projections 2D adaptées (en général selon les premières composantes) on vise à mettre en avant les corrélations fortes. Des logiciels dédiés permettent d'effectuer les projections et les visualisations [Spad 2003].

On part du tableau R de mesures dont les colonnes p figurent des variables à valeurs numériques (PCI_{dispo} , température, ...) et dont les lignes n représentent les individus (mesures) des variables à différents instants (Figure 27). Le terme r_{ij} de ce tableau décrit l'observation i de la variable j [Lebart 2000].

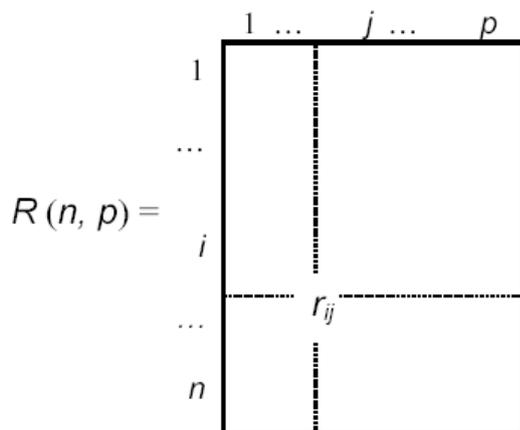


Fig. 27. Tableau $R(n, p)$ de mesures

Afin de calculer la matrice de covariance C on transforme la matrice R en X en la centrant et réduisant selon l'équation :

$$X_{ij} = \frac{r_{ij} - \bar{r}_j}{s_j \cdot \sqrt{n}} \tag{14}$$

avec :

r_{ij} - l'observation i de la variable j

$\bar{r}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_{kj}$ - la moyenne de variable j

$s_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (r_{kj} - \bar{r}_j)^2}$ - l'écart-type de la variable j

n - nombre des individus (mesures).

La matrice de corrélations C se calcule alors (voir aussi Figure 28) :

$$C = X' \cdot X \tag{15}$$

avec :

$$C_{jj'} = \sum_{k=1}^n X_{kj} \cdot X_{kj'} \tag{16}$$

- les coefficients de corrélation entre les variables j et j'

En remplaçant par équation (14) on a :

$$C_{jj'} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{(r_{kj} - \bar{r}_j)(r_{kj'} - \bar{r}_{j'})}{s_j s_{j'}} \tag{16}$$

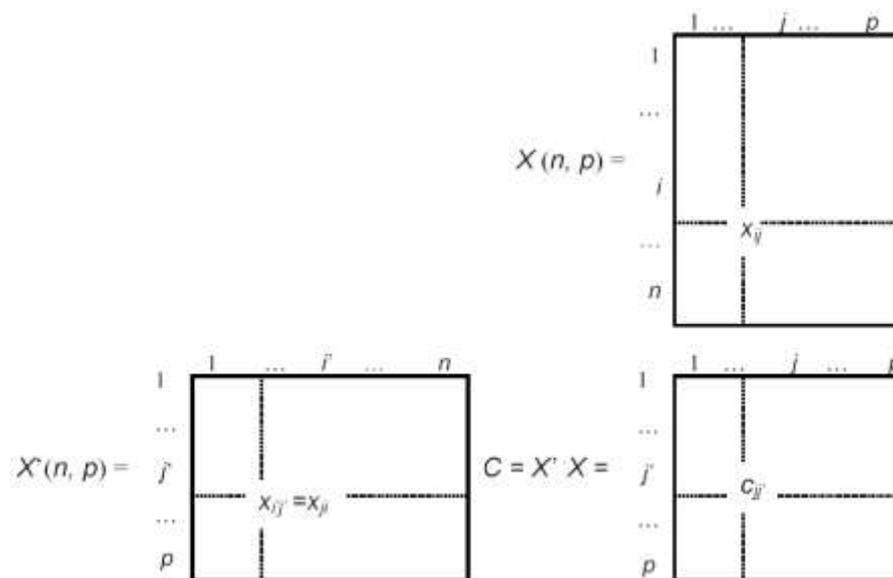


Fig. 28. Schéma du calcul de matrice de la corrélation C

On analyse les résultats sous la forme de la matrice des corrélations et du cercle des corrélations, à l'intérieur duquel se trouvent les point-variables. Deux variables fortement corrélées sont très proches l'une de l'autre ($c_{jj'} \approx 1$) ou au contraire les plus éloignées possible ($c_{jj'} \approx -1$) selon que la relation linéaire qui les lie est directe ou inverse. Les variables présentant les plus fortes corrélations se trouvent proches du cercle unité, Figure 29.

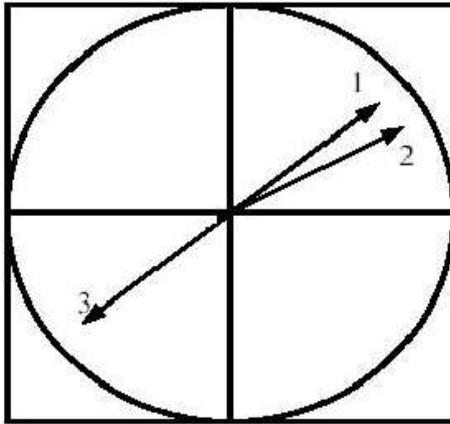


Fig. 29. Cercle des corrélations : 1 et 2 – corrélation directe ($c_{jj'} \approx 1$), 1 (2) et 3 – corrélation inverse ($c_{jj'} \approx -1$)

Exemple de code de calcul de la matrice C (applicable sous Matlab [Mathworks 2005] ou Scilab [Scilab 2005]) :

```
[nlig, ncol]=size(R);
for j=1:1:ncol, X(:,j) = ( R(:,j) - mean(R(:,j)) ); end;
for j=1:1:ncol, X(:,j) = X(:,j) / ( norm(X(:,j)) ); end;
C=X'*X;
```

2.3. Modèles globaux d'estimation d'émission du gaz

Afin d'estimer les risques environnementaux d'une part, et d'optimiser les installations du captage et de la valorisation du biogaz d'autre part, il est important de pouvoir prévoir la quantité du biogaz produit et son évolution dans le temps. En raison de coûts élevés des analyses ainsi que de la complexité et de la durée du processus de décomposition des déchets, ces pronostics sont effectués en utilisant les modèles mathématiques [Gaj 2002a, Meraz 2004, Zacharof 1999].

2.3.1. Présentation de différents modèles

Pour déterminer la productivité gazeuse aux Centres de Stockage on utilise le plus souvent des modèles d'une réaction de premier ordre, en supposant la vitesse de décomposition stable et l'irréversibilité de la décomposition de la matière organique. Il a été constaté [Coops 1995], que l'erreur relative des modèles de premier ordre est la même que celle des modèles de deuxième ordre (~22%), et très proche de l'erreur des modèles multi-phases (~18%).

Un exemple de modèle de ce type est METHANE [Vavilin 1994] qui est basé sur des analyses de la décomposition des déchets d'industrie alimentaire dans des conditions d'un réacteur avec un débit stable.

On utilise aussi des modèles plus complexes, qui prennent en compte des mécanismes physiques, chimiques et biologiques de la production du biogaz ainsi que des mécanismes de transfert du gaz dans un milieu poreux. Ce sont, entre autres : GAS-HEAT [El-Fadel 1996] et PITTLEACH-2 [Pohland 1994]. GAS-HEAT est utilisé pour calculer l'intensité de dégagement du biogaz et de la chaleur et PITTLEACH-2 pour la prévision de la capacité gazeuse des Centres de Stockage et de la quantité de lixiviats produits. La nécessité de connaître assez précisément les conditions hydrologiques et hydrauliques locales ainsi que des nombreux paramètres chimiques, physiques et biologiques constitue une difficulté dans l'exploitation de ces modèles [Gaj 2002a].

Zacharof *et al* [Zacharof 1999, 2004] travaille sur un modèle mathématique de la décomposition des déchets et des processus de transport à l'intérieur d'un Centre de Stockage. Le modèle associe des équations bio-cinétiques, décrivant la dynamique de l'écosystème microbien de la décharge, avec un modèle statistique d'écoulement de l'eau et des lixiviats.

Sumadhu *et al.* [Sumadhu 1995] a développé un modèle qui peut être utilisé pour prévoir le champ de pression à l'intérieur et à l'extérieur de Centre de Stockage équipé d'un système de captage du biogaz. Le modèle peut être employé pour calculer la quantité de gaz qui s'échappe de la décharge par les couches inférieures et supérieures. Le modèle est assez général et peut être utilisé pour des Centres de Stockage anciens, où il n'y a aucun recouvrement pour empêcher les fuites de gaz.

Manna *et al.* [Manna 1999] a développé un modèle qui permet de prévoir la quantité de biogaz produit dans un Centre de Stockage. Différents paramètres ont été pris en considération : la composition des déchets et leur teneur en eau, la variation de densité des déchets en temps et la température de décharge.

Barlaz *et al.* [Barlaz 1999] a développé un modèle pour exécuter un inventaire de cycle de vie (*ang. a life-cycle inventory*) d'un Centre de Stockage. Ce modèle considère la construction de Centre de Stockage, les opérations, la fermeture, la post-fermeture, la production et la gestion du gaz, et la production et la gestion des lixiviats. La génération du biogaz est modélisée à base de l'équation SWANA (*ang. Solid Waste Association of North America*), qui considère la production de gaz d'une certaine masse de déchets au cours du temps :

$$G = W L_0 \frac{k + s}{s} \left(1 - e^{-s(t-t_a)} \right) \left(k e^{-k(t-t_a)} \right) \quad (17)$$

où :

G – production totale de biogaz au temps t , m³/an ;

W – masse totale des déchets stockés, Mg ;

L_0 – capacité potentielle de génération du méthane de déchets, m³/Mg;

t – temps écoulé depuis le début du stockage, ans ;

t_a – temps entre le début du stockage et le début de la production de biogaz, ans ;

k – taux de génération du méthane, ans⁻¹ ;

s – constante de temps de croissance du premier ordre, ans⁻¹.

Meraz *et al.* [Meraz 2004] présente l'équation chimique fractale de cinétique (*ang. fractal-like chemical kinetics equation*) pour calculer le taux de la production du méthane de Centre de Stockage. L'idée de l'équation utilisée est que la cinétique de la production du méthane est limitée par la diffusion des substrats d'hydrolyse en phase hétérogène solide vers des secteurs discrets où la phase méthanogène a lieu. Le modèle fractal n'est pas basé sur l'hypothèse des conditions homogènes de réaction ni sur l'hypothèse de la conversion de la

matière organique de 100%. Les auteurs affirment que cela, en principe, donne une plus grande fiabilité à leur modèle.

Du fait que la génération et l'émission du biogaz sur un Centre de Stockage sont une fonction de nombreux facteurs, dont beaucoup sont non-mesurables, il est difficile de les estimer avec certitude. De plus, les données disponibles sur la plupart de Centres de Stockage sont limitées (la composition et la quantité des déchets stockés, changement des méthodes de stockage, ...). En conséquence, il est souvent nécessaire de faire un compromis et d'utiliser un modèle mathématique simplifié se basant sur des principes généraux. Un logiciel d'EPA (U.S. Environmental Protection Agency) - LANDGEM (Landfill Gas Emission Model) – fournit une approche relativement simple pour estimer l'émission du biogaz [Pelt 1998]. Il permet d'estimer des émissions du : méthane, dioxyde de carbone et NMOC. Le modèle est basé sur une équation cinétique de premier ordre [AP-42 1997, EPA 2001, EPA 2004(b)] :

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n k \cdot L_0 \cdot M_i \cdot (e^{-kt_i}) \quad (18)$$

où :

Q_{CH_4} - quantité du méthane générée en temps, m³/an ;

k – taux de génération du méthane, an⁻¹ ;

L_0 - capacité potentielle de génération du méthane de déchets, m³/Mg ;

M_i – quantité de déchets déposés annuellement (an i), Mg ;

t_i – âge d'incrément i , ans ;

n – nombre d'années.

Les calculs des émissions du biogaz impliquent plusieurs étapes et nécessitent des informations spécifiques pour chaque Centre de Stockage ainsi que les valeurs par défaut. Les informations spécifiques demandées sont les suivantes : les teneurs en méthane et en dioxyde de carbone dans le biogaz, la capacité de CDS, le nombre d'années de fonctionnement de la décharge, et si les déchets dangereux ont été stockés. Les valeurs par défaut disponibles sont : le taux de génération du méthane k (an⁻¹), la capacité potentielle de génération du méthane L_0 (Mg/m³), les concentrations de NMOC et de VOCs réactif dans le biogaz. LANDGEM fournit deux séries des valeurs par défaut. La première, d'après Clean Air Act (CAA) est basée sur les conditions des directives New Source Performance Standards (NSPS). La deuxième série des valeurs par défaut (AP-42) utilise des coefficients d'émission d'après un manuel d'EPA, et donne les estimations d'émission plus représentatives d'après les auteurs du modèle. Il est aussi possible d'introduire les données spécifiques pour le Centre de Stockage étudié au lieu

des valeurs par défaut. Le modèle permet également d'estimer des valeurs k [EPA 2001, Gaj 2002a, Thorneloe 1999].

Les paramètres fondamentaux utilisés dans les modèles sont [AP-42 1997, Gaj 2002a]:

1) Taux de génération du méthane k qui dépend de:

- l'humidité des déchets,
- leur pH,
- la température,
- autres paramètres environnementaux,
- conditions du fonctionnement de décharge.

Ses valeurs mentionnées dans la littérature peuvent varier de 0,003 à 1,8 an⁻¹ [Christensen 1996]. Dans le modèle deux valeurs par défaut sont proposées : 0,04 an⁻¹ (AP-42) et 0,05 an⁻¹ (CAA)

2) Capacité potentielle de génération du méthane L_0 qui dépend de la quantité de matière organique dans des déchets (surtout la cellulose) et peut varier de 6,2 à 270 m³/Mg. Dans le modèle deux valeurs par défaut sont proposées : 100 m³/Mg (AP-42) et 170 m³/Mg (CAA).

Le modèle LANDGEM a été utilisé pour calculer le volume de biogaz produit par 1 tonne de déchets stockée au Centre de Stockage qui fonctionne depuis 30 ans [Aprili 1999]. La comparaison entre les résultats de la production annuelle du méthane obtenus avec les paramètres par défaut de LANGDEM et les paramètres spécifiques estimés pour la décharge mentionnée montre que ces derniers donnent des valeurs intermédiaires entre celles obtenues en utilisant les deux familles des valeurs par défaut.

Les résultats de la production du biogaz obtenus du modèle LANDGEM et du modèle GACY ont été comparés [Gaj 2002b, Gaj 2002c]. La différence entre les valeurs de la quantité totale du méthane produites est de 10%, ce qui montre une bonne comparabilité des modèles. Cependant les allures de deux courbes de génération du méthane sont différentes, ce qui est lié, entre autres, à l'hypothèse du modèle GACY d'une production du biogaz en deux phases avec deux vitesses différentes.

2.3.2. Récapitulatif

Le résumé des caractéristiques des modèles est présenté dans le Tableau 8.

Tableau 8. Récapitulatif de modèles d'estimation d'émission du biogaz

Modèle	Ordre du modèle	Fonction
METHANE	1 ^{er}	Analyse de la décomposition des déchets d'industrie alimentaire
GAS-HEAT	multi-phases	Calcul de l'intensité de dégagement du biogaz et de la chaleur
PITTLEACH-2	multi-phases	Prévision de la capacité gazeuse des CDS et de la quantité de lixiviats produits
SWANA	1 ^{er}	Prévision de la production de gaz d'une certaine masse de déchets
LANDGEM	1 ^{er}	Estimation de la production du CH ₄ , CO ₂ et NMOC dans des CDS
GACY	1 ^{er}	Estimation de la production du CH ₄ dans des CDS

Les modèles qui décrivent les processus existant dans un Centre de Stockage (CDS) seront toujours influencés par des incertitudes dues à l'impossibilité de mesurer et contrôler précisément tous les processus ayant lieu dans un CDS (Tableau 9).

Il est donc nécessaire d'approfondir la connaissance du processus de la génération du biogaz, d'améliorer le nombre et les méthodologies des mesures sur le terrain et d'appliquer correctement des modèles de la production du biogaz [Christensen 1996].

Tableau 9. Les incertitudes typiques influant sur la modélisation de génération du biogaz

	Paramètres	Incertitudes
Paramètres des déchets	Placement Histoire Emplacement Composition	Difficile à retrouver, surtout pour les décharges anciennes
Paramètres biochimiques	Substances nutritives Température, pH	Difficile à mesurer; variable dans l'espace et temps
Paramètres d'un système de captage	Efficacité de captage	Varie de 40 à 90%; difficile de déduire la quantité produite sur la base de la quantité captée
Autres paramètres	Humidité	Difficile à mesurer ou à estimer; variable dans l'espace et temps; a une grande influence sur la génération du méthane

Le modèle LANDGEM sera employé par la suite pour estimer la production du biogaz dans deux Centres de Stockage étudiés et la comparer aux quantités estimées par les autres modèles développés dans ce travail. Il a été choisi parce que c'est un logiciel qui présente une approche relativement simple pour estimer l'émission des composants du biogaz. De plus, il est disponible gratuitement [LANDGEM 2002].

2.4. Acquisition des données et des informations

Borde-Matin (France)

Des mesures *in situ* ont été acquises auprès des partenaires industriels (sociétés Satrod et Elyo ; grâce aux Conventions de Collaboration et de Confidentialité en vigueur) dans la période de novembre 2000 à décembre 2004. On dispose ainsi des données « biogaz » (teneurs en CH₄, CO₂ et O₂, débit du biogaz, dépression, etc.), qui proviennent des mesures automatiques faites à la station de valorisation du biogaz et des données « météo » de la station météorologique installée sur le terrain de CDS Borde-Matin.

La Figure 30 présente un schéma de la station de traitement du biogaz avec indication de certains points de mesure « biogaz ».

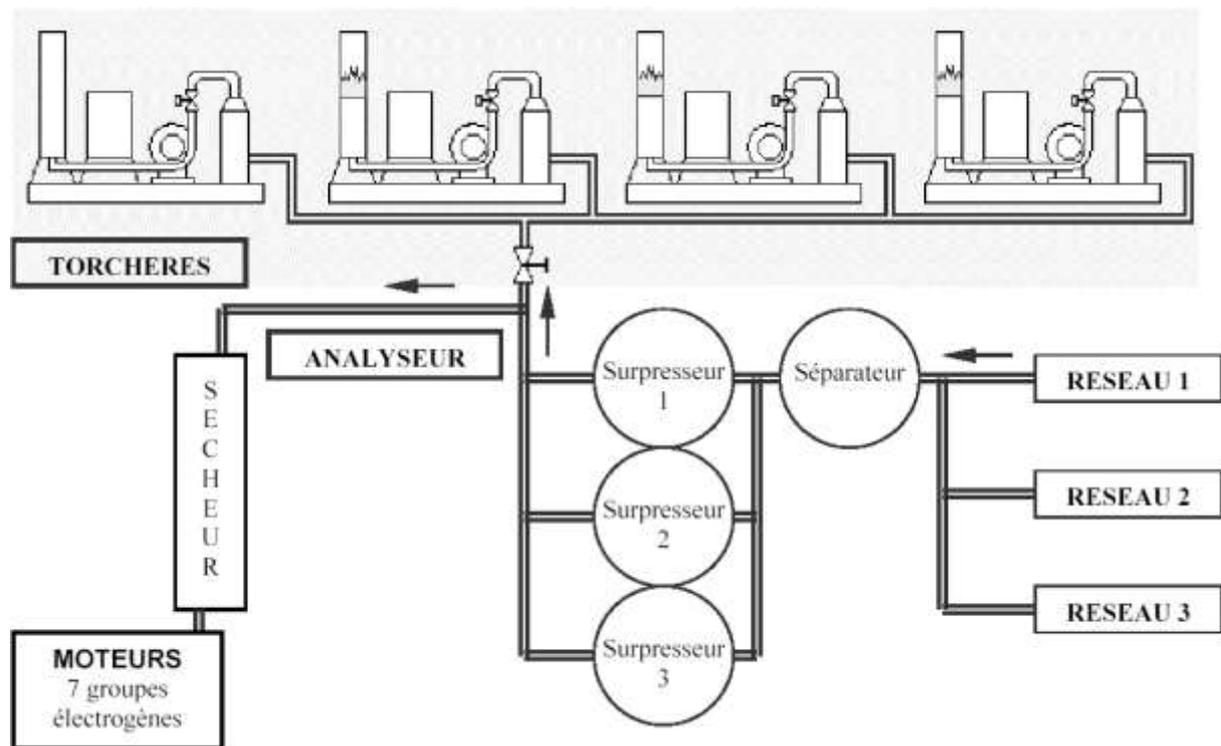


Fig. 30. Schéma de la station de traitement du biogaz (d'après ELYO - BIOVALE)

Les données « biogaz » sont mesurées toutes les 5 ou 10 minutes pour chacun de trois réseaux (R1, R2, R3) et juste avant le sécheur pour le biogaz global (analyseur).

Les données « biogaz » récupérées sont :

- teneurs en méthane, dioxyde de carbone, oxygène (% v/v) ;
- débits du biogaz (Nm³/h) ;

- dépressions appliquées (mbar ; 1 mbar = 1 hPa) ;
- PCI_{dispo} (kW) – puissance calorifique inférieure disponible (totale) du biogaz arrivant à la station de la valorisation ;
- fonctionnement des groupes électrogènes – GE (%) ;
- fonctionnement de torchères (nombre : de 0 à 4).

Dans l'automate il y a aussi un algorithme de calcul de PCI_{dispo} effectué en fonction du débit, pression et teneurs en CH_4 .

Les données « météo » sont mesurées toutes les 30 minutes. Il s'agit de : précipitation (mm), pression atmosphérique (hPa), température (°C), humidité (%) ainsi que la direction (°) et vitesse (m/s) du vent.

Des informations qui viennent de la « main courante », c'est-à-dire des informations sur les modifications, réglages, pannes, arrêts d'installation, etc. qui ont eu lieu pendant la période étudiée, ont aussi été collectées.

Barycz (Pologne)

Des mesures *in situ* ont été acquises auprès du partenaire industriel (Miejskie Przedsiębiorstwo Oczyszczania Sp. Z o.o. – MPO, grâce à la Convention de Collaboration Scientifique et Didactique). On dispose ainsi des données « biogaz » qui proviennent soit des mesures prélevées sur le réseau du dégazage de CDS soit des mesures automatiques faites au niveau des blocs énergétiques et des données « météo » de la station météorologique installée sur le terrain de CDS Barycz.

La Figure 31 présente un schéma de l'installation de dégazage et collecte du biogaz avec indication de certaines sources de données « biogaz ».

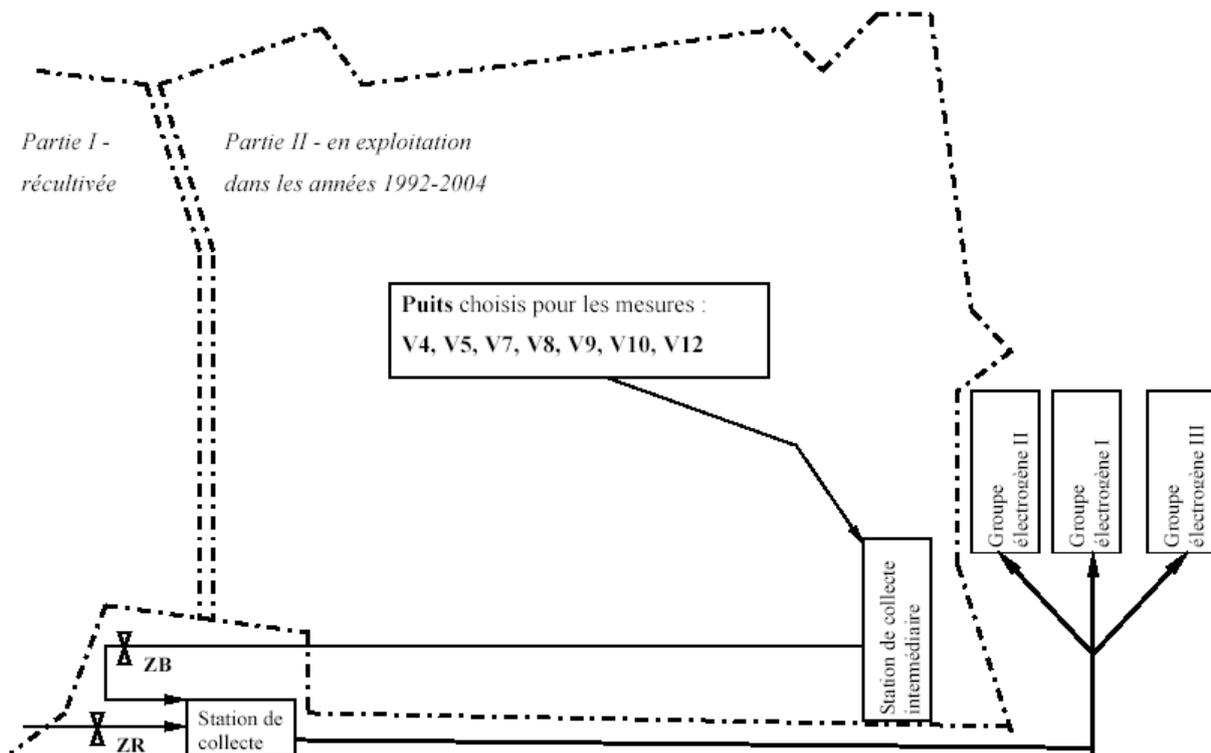


Fig. 31. Schéma de l'installation de dégazage et de collecte du biogaz : ZB – collecteur principal du biogaz de la partie en exploitation, ZR – collecteur principal du biogaz de la partie recultivée de CDS Barycz

Les mesures de données « biogaz » faites sur le réseau du dégazage de CDS concernent : les concentrations volumiques du méthane, du dioxyde de carbone et d'oxygène (% v/v). Elles ont été conduites en deux étapes :

I. Février 2002 – juillet 2002 et octobre 2002 – mai 2003 : mesures dans 7 puits de la partie de décharge en exploitation dans les années 1992-2004 : V9, V10, V7, V4, V8, V5, V12 et sur les deux collecteurs : ZB – collecteur de la partie II et ZR - collecteur de la partie I (Annexe 2).

Les mesures de la composition du biogaz dans les puits choisis ont été réalisées dans la station de collecte intermédiaire, où se trouvent des vannes de puits situés sur la partie II (Photo 13A). Les mesures dans les collecteurs ZB et ZR ont été réalisées à côté de la station de collecte située sur la partie recultivée, où se trouvent leurs vannes (Photo 13B). Toutes les mesures ont été faites selon le cycle suivant : une semaine des mesures (de lundi à vendredi ; à partir du 9.30 du matin) – une semaine de pause. La durée des mesures était de 1h30 environ.



(A)

(B)

Photo 13. (A) Station de collecte intermédiaire avec des vannes de puits de la partie II de Barycz ; (B) Collecteurs ZB et ZR à Barycz (©Photo M.Meres, UJ-ENSM.SE)

II. Octobre 2003 – mai 2004 : mesures sur deux collecteurs : ZR et ZB (*Annexe 3*)

Les mesures ont été faites selon des cycles de 3 à 5 jours. Le nombre de cycles a varié : d'un par mois (d'octobre à décembre 2003) à quatre par mois (de mars à mai 2004). Les mesures ont été réalisées toujours avant midi (entre 10 h et 12 h). La durée des mesures était liée à la valeur de la dépression dans l'installation (à cause des performances de la pompe aspirante dans l'analyseur), mais au maximum d'une demi-heure.

Avant chaque mesure de la concentration des composants du biogaz on vérifiait s'il y avait des lixiviats dans des puits ou collecteurs, puisqu'ils pouvaient endommager l'appareil d'analyse. Dans le cas de présence de lixiviats, les mesures n'ont pas été réalisées. Les relevés des valeurs des concentrations du méthane et du dioxyde de carbone ont été établis après la stabilisation de la valeur de la concentration d'oxygène (environ 0,5 - 0,9 % v/v). Après chaque analyse l'appareil était ventilé à l'air jusqu'à la valeur zéro de concentration en méthane.

Les mesures automatiques des données « biogaz » ont été faites toutes les 60 minutes pour le biogaz général avant l'entrée dans les blocs énergétiques dans la période de mars 2003 à mai 2004. Les données récupérées sont :

- teneurs en méthane et oxygène (% v/v) ;
- débit du biogaz (m^3/h)
- dépression appliquée (mbar ; 1 mbar = 1hPa) ;

- PCI_{dispo} calculée (kW) – puissance calorifique inférieure disponible (totale) du biogaz arrivant à la station de la valorisation ;
- quantité de l'énergie électrique produite (kWh).

Sur la base des données reçues des mesures automatiques on a calculé la puissance calorifique inférieure (PCI_{dispo}) du biogaz selon la formule :

$$PCI_{dispo} = 9,42 \cdot [CH_4] \cdot Q \quad (19)$$

où :

PCI_{dispo} – puissance calorifique inférieure (kW)

9,42 – pouvoir calorifique inférieur du méthane (kWh/Nm³)

$[CH_4]$ – teneur en méthane (% v/v)

Q – débit du biogaz (Nm³/h)

avec :

$$Q = \frac{(P_c \cdot 10 + P_{atm}) \cdot Q_m \cdot T_N}{(T_c + 273) \cdot P_N} \quad (20)$$

où :

Q – débit du biogaz (Nm³/h)

P_c – pression du biogaz au compresseur (kPa)

P_{atm} – pression atmosphérique (hPa)

Q_m – débit du biogaz – valeur reçue des mesures (m³/h)

P_N – pression atmosphérique dans des conditions normales ; à 1013 hPa

T_c – température du biogaz au compresseur (°C)

T_N – température dans des conditions normales ; à 0°C = 273 K

Compte tenu du manque de relevés réguliers de température T_c au compresseur, on a enregistré ces valeurs pendant la réalisation des mesures de concentration des composants du biogaz sur le réseau du dégazage de CDS en étape II. Puisque la variation de la température au compresseur a été seulement de 4°C, on a décidé de présumer, pour les calculs de débit du biogaz en Nm³/h, la valeur moyenne - $T_c = 45^\circ\text{C}$.

Des données « météo » ont été relevées parallèlement aux mesures réalisées sur le réseau du dégazage de CDS et des mesures automatiques. Il s'agit de : la précipitation (mm), la pression atmosphérique (hPa), la température (°C) et l'humidité (%) d'air.

Des informations provenant des « rapports diurnes de fonctionnement d'installation de dégazage » (« main courante ») tenus par des employés de CDS Barycz, c'est-à-dire des informations sur les modifications, réglages, pannes, arrêts d'installation, etc. qui ont eu lieu pendant la période étudiée, ont aussi été recueillies.

Les résultats de mesures effectuées sur le réseau du dégazage de CDS Barycz ont été analysés pour préciser et expliquer des relations éventuelles entre les différents paramètres. Des fichiers pour chaque mois (de novembre 2000 à octobre 2004 pour Borde-Matin – *Annexe 4* ; et de mars 2003 à mai 2004 pour Barycz – *Annexe 5*) ont été préparés avec toutes les données automatiques récupérées (données « biogaz » et données « météo ») pour les visualiser et analyser sur Matlab. Des fonctionnalités dédiées ont été développées, en particulier par création des graphes synthétiques pour examiner des variations et des relations éventuelles entre les différentes mesures et par élaboration d'un programme d'identification des modèles optimaux discrets. Un modèle global pour prévision de la quantité du biogaz produit et son évolution dans le temps a également été développé.

2.5. Appareils de mesures

Borde-Matin (France)

Analyseur d'infrarouge de CH₄ et CO₂ – URAS 14 [Kinetic(a) 2003, Kinetic(c) 2003]

C'est un photomètre non-dispersif d'infrarouge qui est capable de mesurer quatre composants gazeux simultanément et en continu. Cette méthode est basée sur l'adsorption de la radiation d'infrarouge dans la gamme moyenne de la longueur d'onde ($\lambda = 2,5$ à $8 \mu\text{m}$). Les principales données techniques sont les suivantes :

- *Étendue de mesures*
 - étendue de mesures 0 à 100% vol.
 - 1 ou 2 étendues de mesures par composant
- *Stabilité*
 - déviation linéaire $\leq 1\%$ de l'échelle complète
 - répétitivité $\leq 0,5\%$ de l'échelle complète
 - déviation de point zéro $\leq 1\%$ de l'échelle complète par semaine
 - déviation de sensibilité $\leq 1\%$ de la valeur mesurée par semaine
 - limite de la détection $\leq 0,5\%$ de l'échelle complète

Analyseur d'oxygène – MAGNOS 16 [Kinetic(b) 2003, Kinetic(c) 2003]

Cette méthode est basée sur le comportement paramagnétique spécifique d'oxygène. Les principales données techniques sont les suivantes :

- *Composant analysé*: Oxygène
- *Étendue de mesures*
 - étendue de mesures la plus petite 0 à 1% vol. O₂
 - étendue de mesures la plus grande 0 à 100% vol. O₂
- *Calibrage*
 - point de zéro et point de fin du calibrage peut se faire avec l'azote (N₂) et l'air ou un échantillon étalon du mélange de gaz
 - calibrage automatique via un module pneumatique ou des valves externes

Transmetteur différentiel électrique du débit – Fuji Electric FKC° 11V2-AKDYY-CA, Figure 32 [Fuji 2001]

Ce transmetteur peut mesurer : la pression différentielle, le niveau de liquide, la surpression ou le débit.

- *Technologie*
 - technologie ASIC (garantie d'une conversion analogique/digital stable et précise)
 - détecteur de silicium de micro-capacitance
 - double détecteur de la température



Fig. 32. Transmetteur du débit

Station météorologique automatique Pulsia [Pulsonic 2000]

Cette station peut recevoir jusqu'à 16 capteurs et possède une visualisation locale et un enregistrement sur carte à mémoire. Elle est alimentée par un panneau solaire et une batterie. Il y a une possibilité de collecter les données par : ligne téléphonique, liaison directe (câble ou fibre optique) et radio GSM, ainsi que de les enregistrer sur PC Card.

La station météorologique installée sur le terrain de CDS Borde-Matin est équipée de :

Sonde de température Pt 100 (Figure 33)

▪ *Principe de mesure*

Variation de la résistance d'un fil non inductif de platine en fonction de la température.

▪ *Caractéristiques métrologiques*

- étendue de mesure - 40°C à 50°C
- précision : $\pm 0,12^\circ\text{C}$ à - 40°C
 $\pm 0,07^\circ\text{C}$ à 0°C
 $\pm 0,12^\circ\text{C}$ à 50°C

▪ *Données élaborées*

Minimum, maximum, moyenne, durée du gel



Fig. 33. Sonde de température

Hygromètre 0414 (Figure 34)▪ *Principe de mesure*

Variation de capacité du diélectrique formant l'élément sensible de la sonde en fonction de l'humidité relative environnante

▪ *Caractéristiques métrologiques*

- étendue de mesure 0 à 100%
- précision $\pm 2\%$ pour humidité relative entre 10% et 96%

▪ *Données élaborées*

Humidité minimum, maximum, moyenne.

Durée d'humidité : <40%, 80%<...<90%, >90%

Pluviomètre 3029 (Figure 35)▪ *Principe de mesure*

Comptage d'impulsions relatives au basculement alterné de 2 augets. Chaque auget représente un volume d'eau recueilli par la bague réceptrice du pluviomètre

▪ *Caractéristiques métrologiques*

- résolution : 0,2 mm de pluie
- gamme de fonctionnement : 0 à 7,5 mm/min

▪ *Données élaborées*

Hauteur cumulée. Pluie maximum sur 6 min

Anémomètre 0438 (Figure 36)▪ *Caractéristiques métrologiques*

- étendue de mesures 0 à 60 m/s (0 à 216 km/h)
- maximum 90 m/s (324 km/h)
- précision 2% de 10 à 60 m/s
- domaines d'utilisation -30°C à 70°C

Girouette 0429 (Figure 37)▪ *Caractéristiques métrologiques*

- étendue de mesures 0 à 360°
- maximum 90 m/s (324 km/h)
- précision 2° de 0 à 355°
- domaines d'utilisation -30°C à 70°C



Fig. 34. Hygromètre



Fig. 35. Pluviomètre



Fig.36. Anémomètre



Fig. 37. Girouette

Baromètre PTB100A▪ *Principe de mesure*

Les variations de la pression atmosphérique changent la capacitance d'un détecteur de silicium monocristal

▪ *Caractéristiques métrologiques*

- étendue de mesures 800 à 1060 hPa
- précision $\pm 0,3$ hPa

Barycz (Pologne)Analyseur portable du biogaz à infrarouge avec un capteur d'oxygène– type GA 94 [Analyser 2001]

La vue générale d'analyseur et le schéma de certaines parties sont présentés sur la Figure 38.

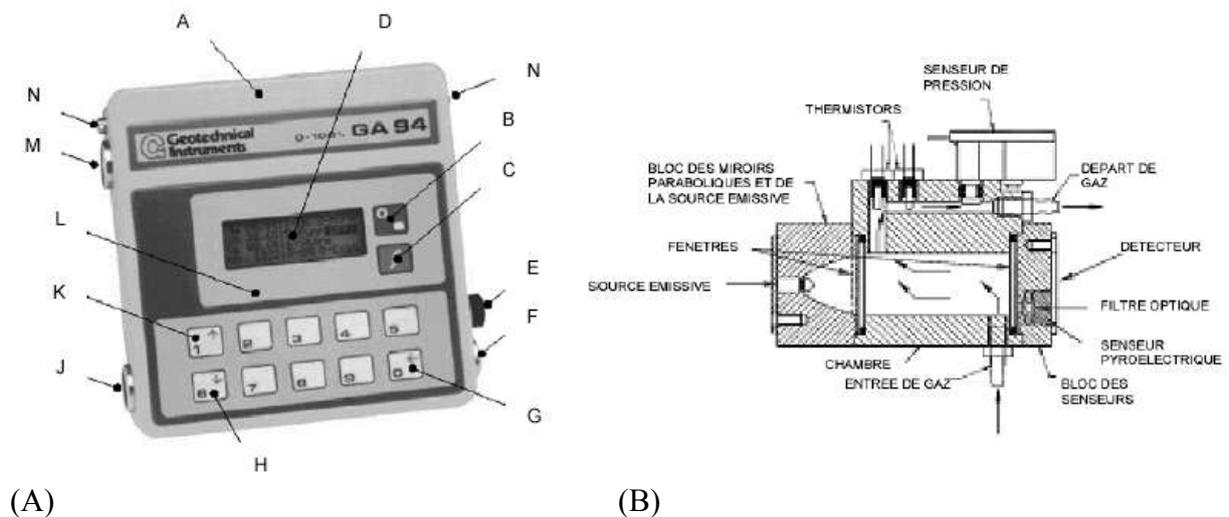


Fig. 38. Analyseur du biogaz GA 94 (Geotechnical Instruments Ltd., Angleterre)

(A) Vue générale, (B) Schéma

A – boîtier extérieur ;

C, G, H, K – touches fonctionnelles;

E – prise au chargeur et à la sonde de la température ;

J – port de pression;

M – entrée de gaz et filtre amovible ;

B – interrupteur de mise en marche;

D – afficheur à cristaux liquides;

F – départ de gaz;

L – panel de membrane;

N – poignée de la bande de fixation

Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- *Composants analysés* : Méthane, dioxyde de carbone, oxygène
- *Étendues des mesures*
 - Méthane : 0-100% v/v;
 - Dioxyde de carbone : 0-50% v/v;

- Oxygène : 0-21% v/v;

▪ *Précision*

Étendues des mesures	CH ₄	CO ₂	O ₂
0-5% v/v	±0,5% v/v	±0,5% v/v	±1,0% v/v
5-15% v/v	±1,0% v/v	±1,0% v/v	±1,0% v/v
> 15% v/v	±3,0% v/v	±3,0% v/v	±1,0% v/v

▪ *Interférences possibles*

Mesure de la concentration de méthane et dioxyde de carbone : hydrocarbures (éthane, propane et butane), disulfure de carbone.

▪ *Calibrage*

Analyse du mélange d'étalon (méthane, dioxyde de carbone et oxygène), dont la composition est vérifiée auparavant en utilisant la chromatographie en phase gazeuse. Il est réalisé tous les 6 mois à Instytut Nafty i Gazu (Institut du Pétrole et du Gaz).

Analyseur automatique d'oxygène Oxynos 100 [Oxynos 1989]

▪ *Principe de mesure*

C'est un capteur paramagnétique mono-canal à flux. Il possède un certificat pour l'utilisation dans des installations à risque d'explosion.

▪ *Composant analysé* : Oxygène

▪ *Caractéristiques métrologiques* :

- étendue de mesure minimale : jusqu'à 5% v/v
- étendue de mesure maximale : jusqu'à 100% v/v
- précision : 0,01% v/v
- fréquence des mesures: 5 s

Analyseur automatique Binós 100 bi-canal [Binós 1989]

▪ *Principe de mesure*

Mesure d'absorption d'infrarouge. Il possède un certificat pour l'utilisation dans des installations à risque d'explosion

▪ *Composants analysés* : Méthane, dioxyde de carbone

▪ *Caractéristiques métrologiques* :

- étendue de mesure minimale : jusqu'à 5% v/v
- étendue de mesure maximale : jusqu'à 100% v/v
- précision : 0,01% v/v
- fréquence des mesures: 5 s



Photo 14. Panel de contrôle des analyseurs BinOS et Oxynos (© Photo M.Meres, UJ-ENSM.SE)

Capteur de température TB – 100/N [Temperatura 2002]

Destiné à la mesure de la température de gaz, vapeurs et liquides (Figure 39).

▪ *Principe de mesure*

Élément de mesure – résistor thermométrique en isolation céramique dans un tube de cuivre jaune.

▪ *Caractéristiques métrologiques*

- étendue de mesure : -50 à 180°C
- précision : $\pm 2^\circ\text{C}$
- fréquence des mesures : 30s



Fig. 39. Senseur de la température

Appareil de mesure du débit et de la pression – NPXD (Peltron Ltd.) [PELTRON 2003]

Il peut être utilisé aux mesures de : la pression, débit et niveau de liquide (Figure 40).

▪ *Principe de mesure*

Mesure de différence des pressions

▪ *Caractéristiques métrologiques*

- étendue de mesure : 0,2 à 20 bars
- écart : $\leq 0,5\%$
- pression statique maximale : 8 bars
- température de fluide : -20 à 85°C

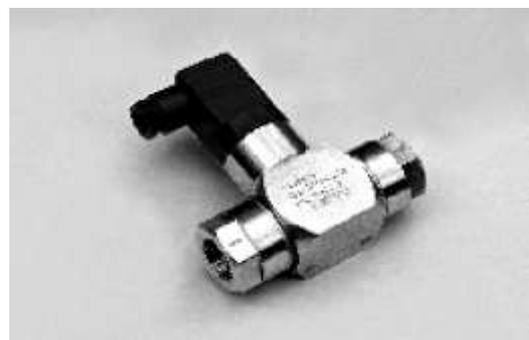


Fig. 40. Débitmètre

Station météorologique [Station 2001]

Elle permet la lecture et l'enregistrement de : date et heure actuels, tendance de changement du temps, historique de la pression atmosphérique sur 48 h, historique de précipitation sur 7 jours, humidité extérieure et intérieure actuelle (%), température extérieure et intérieure (°C), hauteur de précipitation de la dernière heure ou depuis la dernière lecture (mm).

Elle est composée de :

Sonde de température, Figure 41

- *Caractéristiques métrologiques*
 - étendue de mesure de la température extérieure:
 - 29,9°C à 69,9°C
 - étendu de mesure de la température inférieure:
 - 9,9°C do 59,9°C
 - précision : $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
 - température d'exploitation : -30°C à 70°C



Fig. 41. Sonde de température

Hygromètre, Figure 42

- *Caractéristiques métrologiques*
 - étendue de mesure d'humidité : 20% à 95%
 - précision de mesure d'humidité: $\pm 1\%$
 - étendue de mesure de pression atmosphérique :
 - 700 à 1099 hPa
 - température d'exploitation: -30°C à 60°C
 - précision de mesure de pression : ± 2 à 4 hPa



Fig. 42. Hygromètre

Pluviomètre, Figure 43

- *Caractéristiques métrologiques*
 - température d'exploitation : -30°C à 50°C
 - fréquence de mesure : 5 minutes



Fig. 43. Pluviomètre

2.6. Contraintes et limites des équipements de mesure

En raison des plusieurs travaux sur le Centre de Stockage Barycz (par exemple drainage de l'installation, réparation des blocs électrogènes) dans la période de juillet à septembre 2003 l'enregistrement des valeurs mesurées a été effectué toutes les 2 à 3 heures. Ceci a provoqué une perte de certaines données et a compliqué l'analyse d'influence des paramètres extérieurs sur la production du biogaz.

Dans la période d'octobre 2003 jusqu'à mars 2004 des sauts significatifs du débit (entre 200 à 300 Nm³/h) ont été notés, qui ont entraîné d'importantes variations de PCI_{dispo}. Simultanément, la fréquence de l'onduleur changeait souvent et de façon brutale. Une expérience sur le terrain a été effectuée pour vérifier si les variations du débit étaient provoquées par le fonctionnement incorrect de l'onduleur. La régulation automatique a été arrêtée et le fonctionnement de l'installation avec un pilotage manuel de l'onduleur a été observé. Pendant cette expérience les données suivantes ont été notées : pression au compresseur (kPa), débit (Nm³/h), teneur en méthane (% v/v) et fréquence de l'onduleur (Hz) (Tableau 10 – extraits de données).

Tableau 10. Extraits de données notées sous pilotage manuel de fonctionnement de l'onduleur (14 mai 2004)

Heure	Pression au compresseur, kPa	Débit, Nm ³ /h	Teneurs en méthane, % v/v	Fréquence de l'onduleur, Hz
12:55	32,2	202	56,7	23,8
13:00	31,3	201	56,7	23,8
13:05	29,0	198	56,5	23,8
13:06	26,6	195	56,3	23,8
13:07	33,4	245	56,1	27,8
13:09	36,3	409	55,5	27,8
13:40	34,7	217	54,0	26,0
13:42	33,8	218	53,9	26,0
13:45	33,8	220	53,7	26,0
13:48	31,9	213	53,9	25,8
13:50	33,0	213	54,1	25,8

On observe que les changements de fréquence importants (de l'ordre de quelques Hz sur ~ 25 Hz, soit de l'ordre de 15 à 20%) provoquent de fortes variations du débit ($\sim 200 \text{ Nm}^3/\text{h}$). Cependant, les changements de fréquence faibles (de l'ordre de décimales) induisent des changements de débit graduels et faibles (quelques Nm^3/h). Cette expérience a confirmé que les sauts significatifs du débit ont été induits par la régulation incorrecte de fonctionnement de l'onduleur.

Dans la période de début d'octobre jusqu'à mi-décembre 2002 les valeurs de paramètres météorologiques ont été récupérées à l'Institut de la Météorologie et Gestion de l'Eau de Cracovie, à cause de la panne de station météorologique installée sur la décharge.

Dans la période du 5 septembre 2003 jusqu'au 25 janvier 2004 les valeurs de sommes journalières de précipitation ont été récupérées à la Station Scientifique de la Faculté de Climatologie de l'Institut de Géographie et Gestion Spatiale de UJ - "Jardin Botanique" à Cracovie.

3. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

.....

3.1. Exploitation et analyse des données

D'abord les données acquises sur le réseau du dégazage de CDS Barycz, ainsi que les données automatiques récupérées ont été analysées pour pouvoir identifier l'influence des paramètres d'exploitation et météorologiques sur la production du biogaz en prenant en compte des informations incluses dans la « main courante ». Après une première analyse visuelle des corrélations plus précises, à court et à moyen terme, ont été mises en avant en identifiant des modèles et en calculant des coefficients de corrélations. Un modèle global de la prévision de la quantité du biogaz produit et son évolution dans le temps a été également développé. Un bilan du fonctionnement de la station de valorisation du biogaz a été préparé.

La puissance calorifique inférieure disponible (totale) du biogaz arrivant à la station de la valorisation (PCI_{dispo}) a été analysée pour identifier l'influence des paramètres extérieurs sur la production et la valorisation du biogaz, sur la base des données automatiques. Ce paramètre a été choisi parce qu'il prend en compte autant les changements de teneur en méthane que du débit. En plus, sur le CDS Borde-Matin, la teneur en méthane est régulée (valeur stable $\sim 48\%$ v/v). C'est donc la PCI_{dispo} qui permet l'étude comparée des changements dans la quantité ou la qualité de biogaz arrivant à la valorisation dans les deux CDS.

3.1.1. Influence des paramètres d'exploitation sur la valorisation du biogaz

Le fait que les deux Centres de Stockage étudiés fonctionnent, implique que les réseaux de collecte du biogaz peuvent être influencés par plusieurs facteurs, en particulier par les paramètres d'exploitation, comme par exemple :

- la fermeture ou l'addition des branchements de puits,
- les réglages sur un réseau,
- les écrasements accidentels,
- le tassement,
- les interventions sur l'installation de valorisation (maintenances, réparations...).

On observe par exemple que l'interruption de fonctionnement des groupes électrogènes, donc la réduction de la quantité du biogaz capté pour la valorisation, provoque une diminution de PCI_{dispo} . Le biogaz excédentaire est alors brûlé dans les torchères. Cela peut masquer l'influence de paramètres météorologiques (Figure 44).

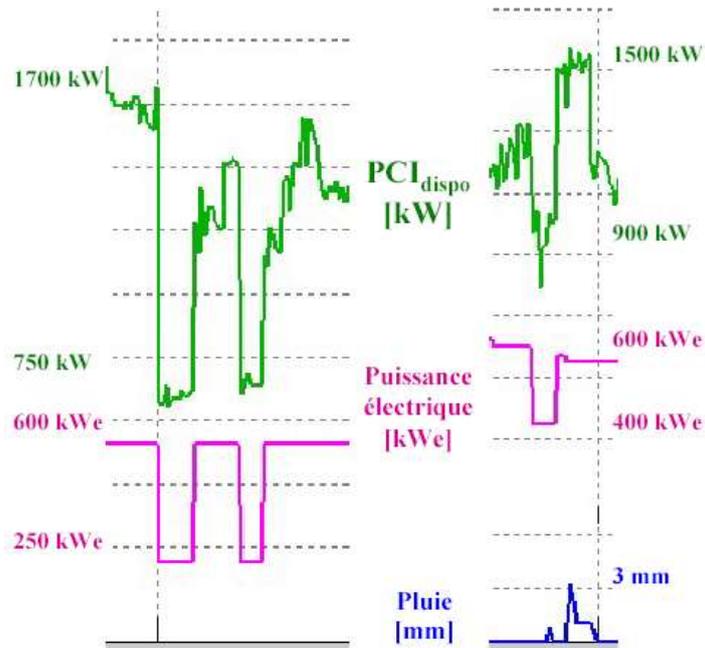


Fig. 44. Diminution de PCI_{dispo} provoquée par l'interruption de fonctionnement des groupes électrogènes (exemple de Barycz)

Les mesures effectuées dans 7 puits de la partie en exploitation de CDS Barycz (V9, V10, V7, V4, V8, V5, V12 ; résultats – *Annexe 2*) dans les deux périodes (février 2002 à juillet 2002 et octobre 2002 à mai 2003) nous ont permis d'étudier l'influence de leur localisation et de la valeur de dépression dans l'installation du dégazage sur les teneurs en méthane et en dioxyde de carbone dans le biogaz.

On remarque une influence importante de la localisation de puits de captage sur la composition du biogaz, par exemple la teneur en méthane est plus élevée dans des puits situés près de la limite de la partie en exploitation (e.g. le puits V12, Figure 45). Cela peut être dû à la présence de déchets à biodégradation plus avancée et/ou au niveau d'humidité plus important. La localisation a aussi une influence sur les puits qui sont placés sur le terrain de petite porosité ou le niveau de lixiviats est élevé. Cela peut provoquer la création d'obstructions (eau, glace) dans la tuyauterie entre un puits et sa vanne dans la station de collecte intermédiaire [Meres 2004a].

On note une influence de la dépression dans l'installation du dégazage sur les teneurs en méthane et dioxyde de carbone dans le biogaz. Les teneurs en méthane et en dioxyde de carbone ont été plus stables et proches dans le cas de la surpression dans l'installation du dégazage (par exemple : 2-6 décembre 2002 - 2 à 3 groupes électrogènes à l'arrêt) que dans le

cas de dépression (16-20 décembre 2002 - fonctionnement normal des 3 groupes électrogènes), Figures 45 et 46 [Meres 2004a].

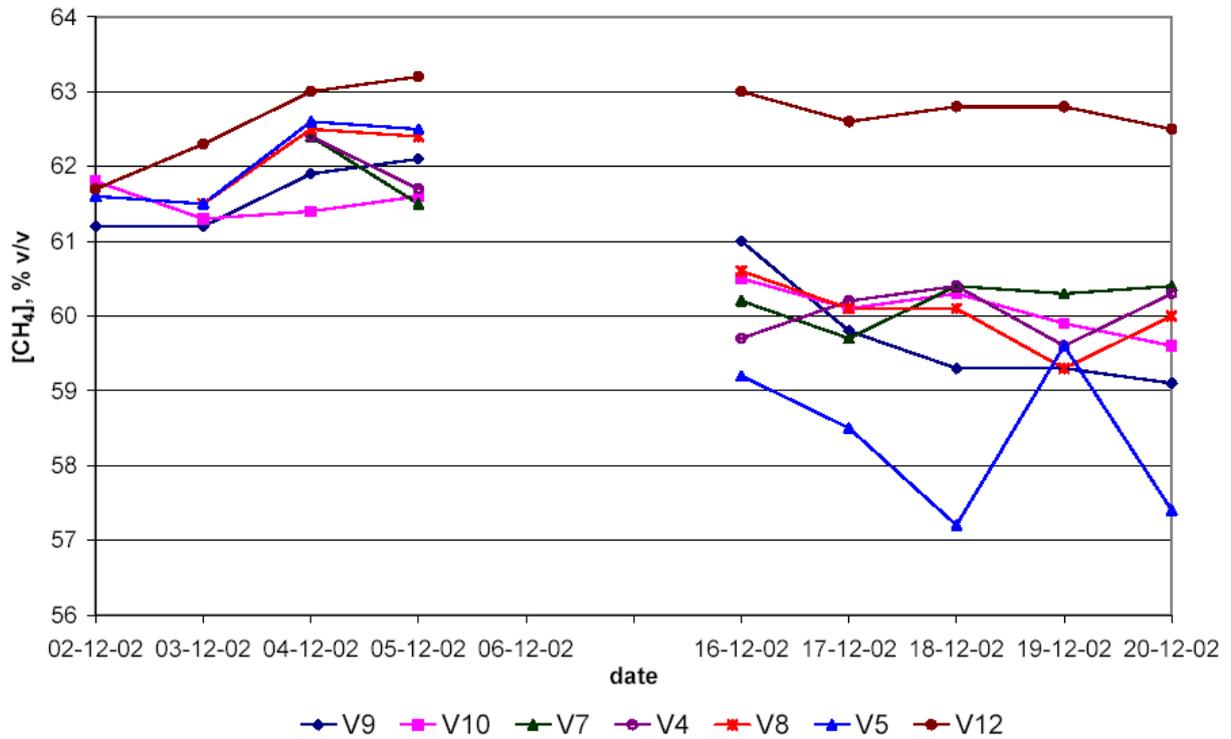


Fig. 45. Changement de la concentration en CH₄ dans les puits étudiés à Barycz

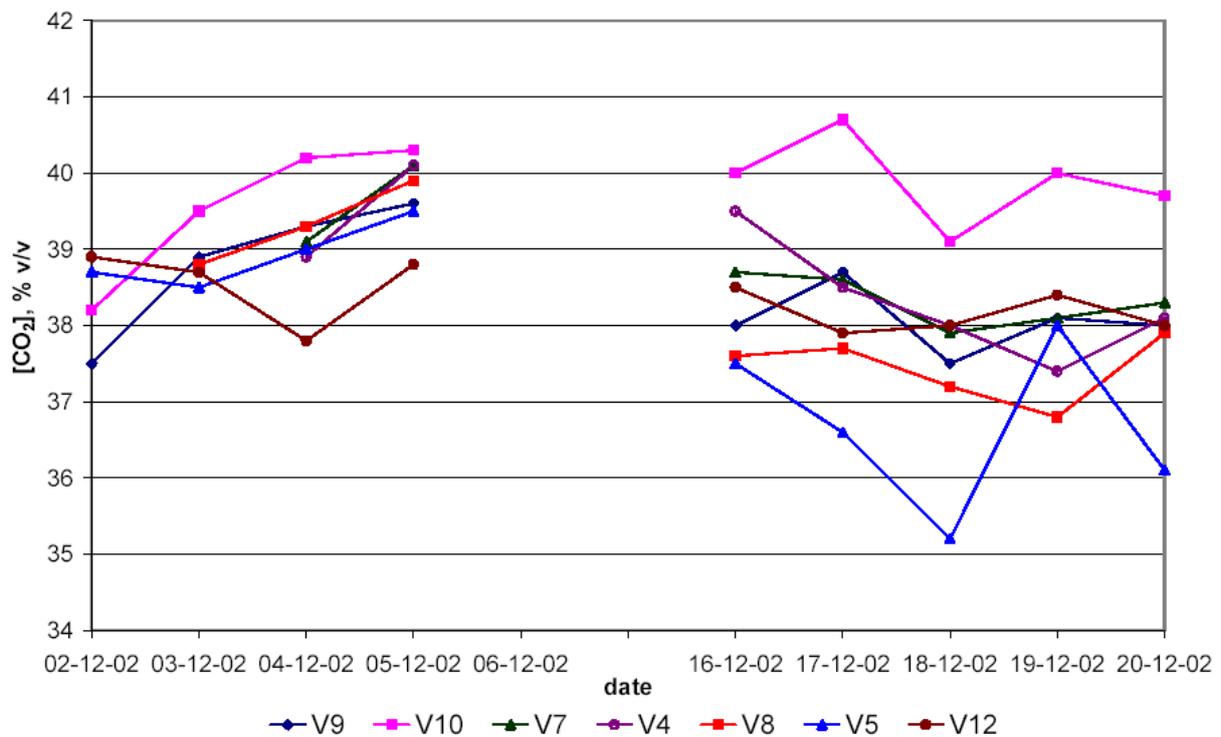


Fig. 46. Changement de la concentration en CO₂ dans les puits étudiés à Barycz

Les mesures effectuées sur les deux collecteurs : ZB (collecteur de la partie II) et ZR (collecteur de la partie I) dans les périodes : février 2002 à juillet 2002 et octobre 2002 à mai 2003 (résultats - *Annexe 2*) et d'octobre 2003 à mai 2004 (résultats - *Annexe 3*) nous ont permis de comparer l'influence des paramètres d'exploitation sur la composition du biogaz issu de ces deux parties de CDS. On observe que les paramètres d'exploitation ont une influence plus forte sur le biogaz de la partie recultivée (collecteur ZR). On constate également que la teneur en méthane et la teneur en dioxyde de carbone dans le biogaz de ZR sont plus élevées – même de 20% v/v - dans la situation de surpression dans l'installation du dégazage (par exemple : 6 et 7 avril 2004 - 2 à 3 groupes électrogènes à l'arrêt) que dans la situation de dépression (14-16 avril 2004 - fonctionnement normal des 3 groupes électrogènes), Figures 47.

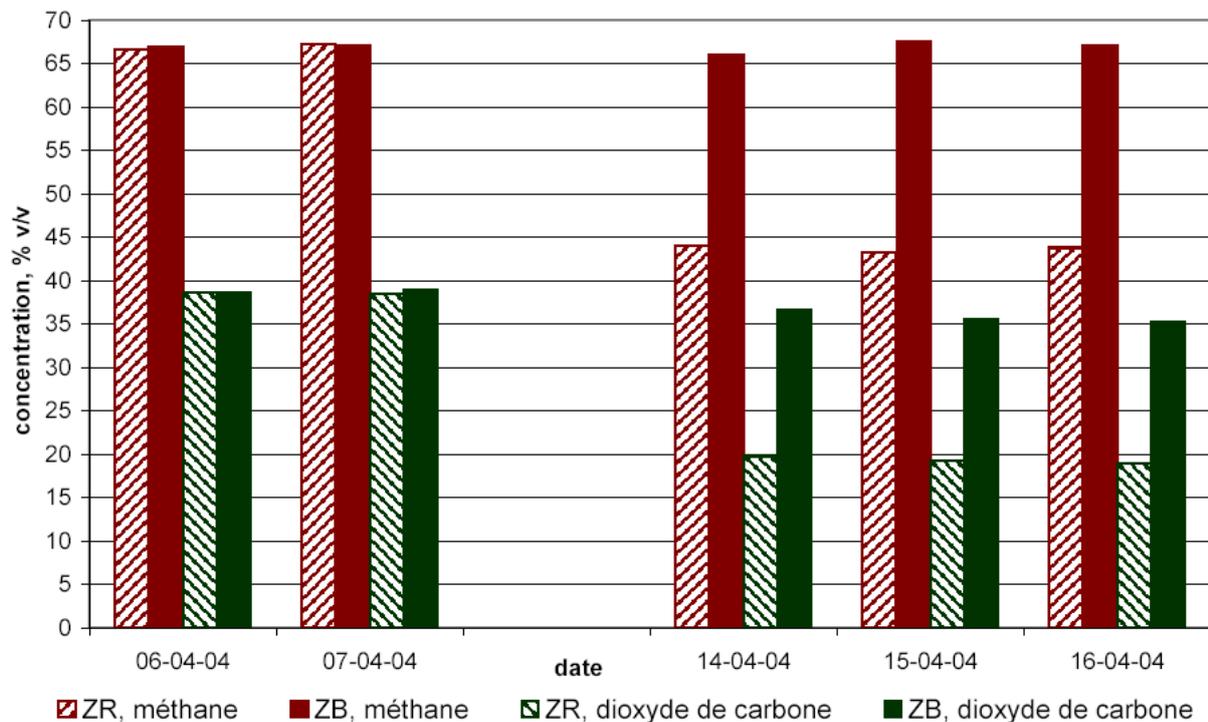


Fig. 47. Changement de la concentration en CH₄ et en CO₂ dans les collecteurs ZR et ZB

⇒ Cette différence peut s'expliquer par le fait que ZR correspond à une partie ancienne où la production du biogaz est en déclin. Des débits très faibles affectent donc significativement les teneurs en CH₄ et en CO₂.

3.1.2. Influence des paramètres météorologiques sur la valorisation du biogaz

Après avoir pris en compte et/ou séparé l'influence des interventions de l'homme (travaux, réglages, ...) on a voulu préciser les effets induits par des paramètres météorologiques sur la production du biogaz (PCI_{dispo} , teneurs en méthane) :

1. Le temps sec, ensoleillé avec une température élevée (20-30°C) provoque une baisse de PCI_{dispo} .

On observe une tendance de diminution de la moyenne de PCI_{dispo} pendant des jours secs, ensoleillés avec la température qui augmente jusqu'à 20-30°C ou plus. Par exemple en juillet 2003 le PCI_{dispo} commence à baisser avec une augmentation de la température de 7 juillet (Figure 48). On peut expliquer cet événement par une baisse d'humidité dans la masse de déchets qui est indispensable pour la production du biogaz. De plus, la perméabilité de la couche superficielle accroît pendant le temps sec, l'humidité ayant tendance à bloquer le transfert vertical des gaz. D'où plus de fuites de gaz dans l'atmosphère, et donc moins de gaz dans le réseau.

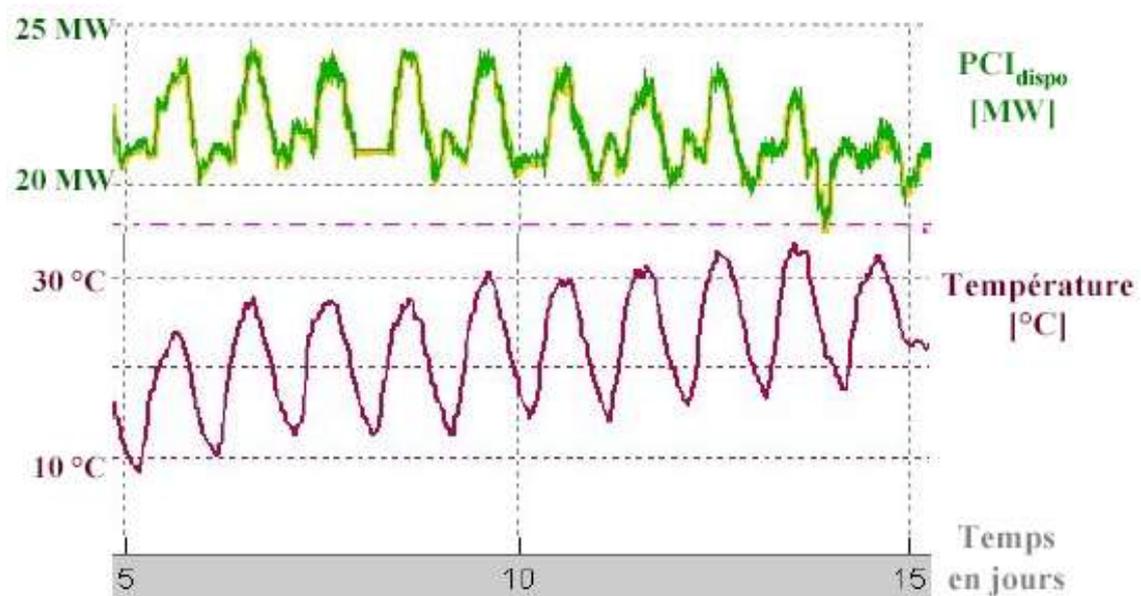


Fig. 48. Exemple d'influence de la température sur la PCI_{dispo} en juillet 2003 (exemple de Borde-Matin)

2. Des précipitations induisent une augmentation de PCI_{dispo}

Des pluies longues (>12h) ont tendance à provoquer une augmentation de PCI_{dispo} (Figure 49). On peut expliquer cela par une saturation de la couche superficielle du sol, qui bloque le transfert vertical de gaz, d'où l'augmentation de la quantité de biogaz dans le réseau et l'augmentation de PCI_{dispo} .

Des pluies courtes (1 à 3h) mais intenses n'induisent pas de changement significatif de PCI_{dispo} (Figure 50). Elles ruissèlent sur la surface ne saturant pas la couche superficielle.

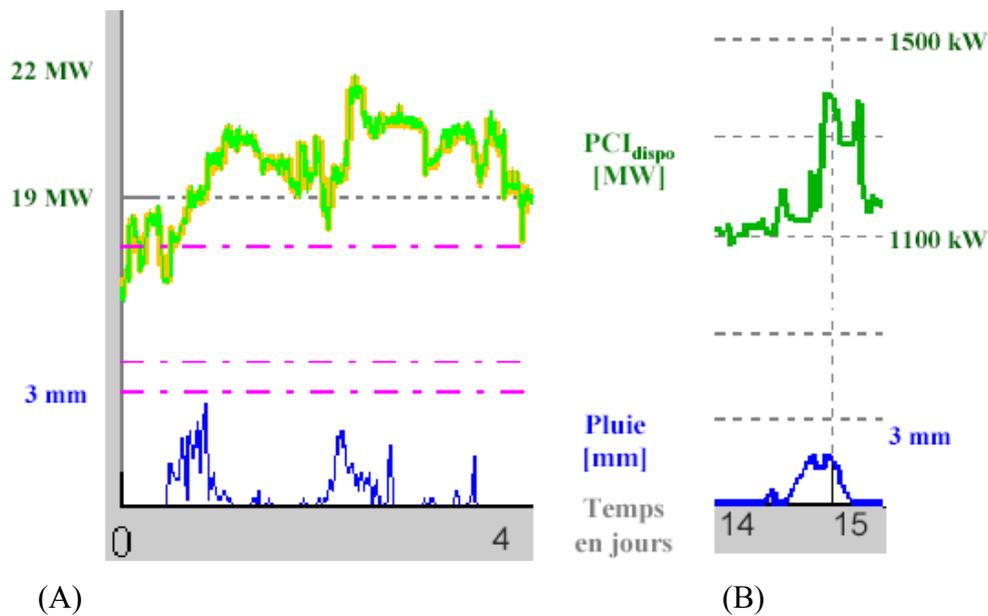


Fig. 49. Exemple d'influence des précipitations longues (>12h) sur la PCI_{dispo} : (A) en mai 2002 à Borde-Matin, (B) en mai 2003 à Barycz

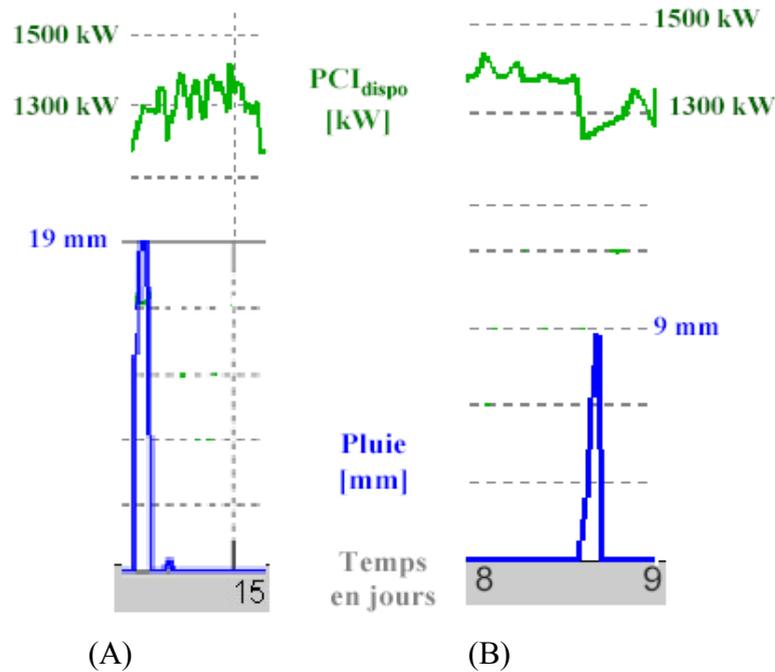


Fig. 50. Exemple d'influence des précipitations courtes (1-3h) et intense sur la PCI_{dispo} à Barycz : (A) en mai 2003, (B) en juin 2003

3. Des précipitations et/ou la température basse ($<0^{\circ}\text{C}$) impliquent une augmentation de PCI_{dispo} et de teneurs en méthane dans le biogaz

On observe l'augmentation de PCI_{dispo} avec une baisse de la température au-dessous de 0°C et accompagnée des précipitations (Figure 51A). Cet événement peut être provoqué par le blocage du transfert vertical du biogaz et donc des pertes atmosphériques.

On constate aussi, une augmentation de la concentration en méthane dans le biogaz de la partie recultivée (collecteur ZR) du CDS Barycz (Figure 51B). Dans le cas présenté (décembre 2002) la température était basse ($<0^{\circ}\text{C}$) et il a neigé intensément pendant plusieurs jours [Meres 2004a].

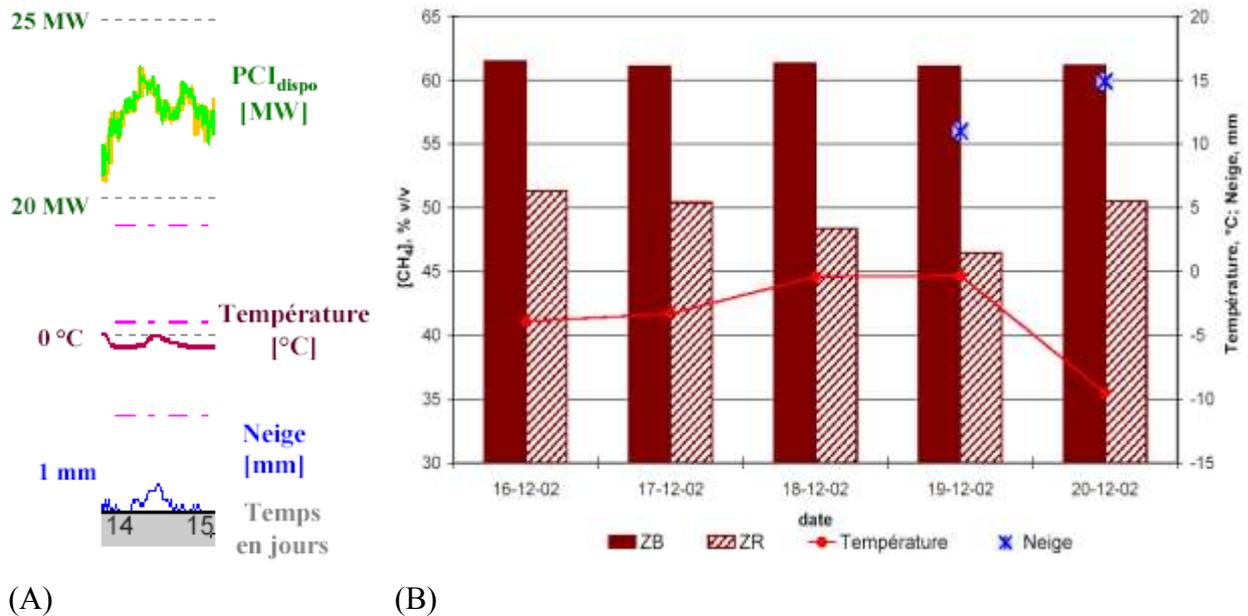


Fig. 51. Exemple d'influence de la température basse ($<0^{\circ}\text{C}$) et les précipitations sur : (A) l'augmentation de $\text{PCI}_{\text{dispo}}$ à Borde-Matin, (B) l'augmentation de la concentration en méthane dans le biogaz à Barycz

4. Une chute de pression atmosphérique peut provoquer l'apparition d'odeurs et une modification de teneur en méthane dans le biogaz

Lors de chute de pression atmosphérique, la pression du biogaz dans la masse des déchets peut devenir supérieure à la pression ambiante, générant des fuites de biogaz dans l'atmosphère, et l'apparition d'odeurs.

On constate l'augmentation de la concentration en méthane dans le biogaz à Barycz (surtout dans la partie recultivée – collecteur ZR) avec l'augmentation de la pression atmosphérique (Figure 52). En hiver, en raison de la présence de la couverture imperméable (gel, couche de neige) on n'observe pas d'influence importante de la pression atmosphérique sur le biogaz [Meres 2004a].

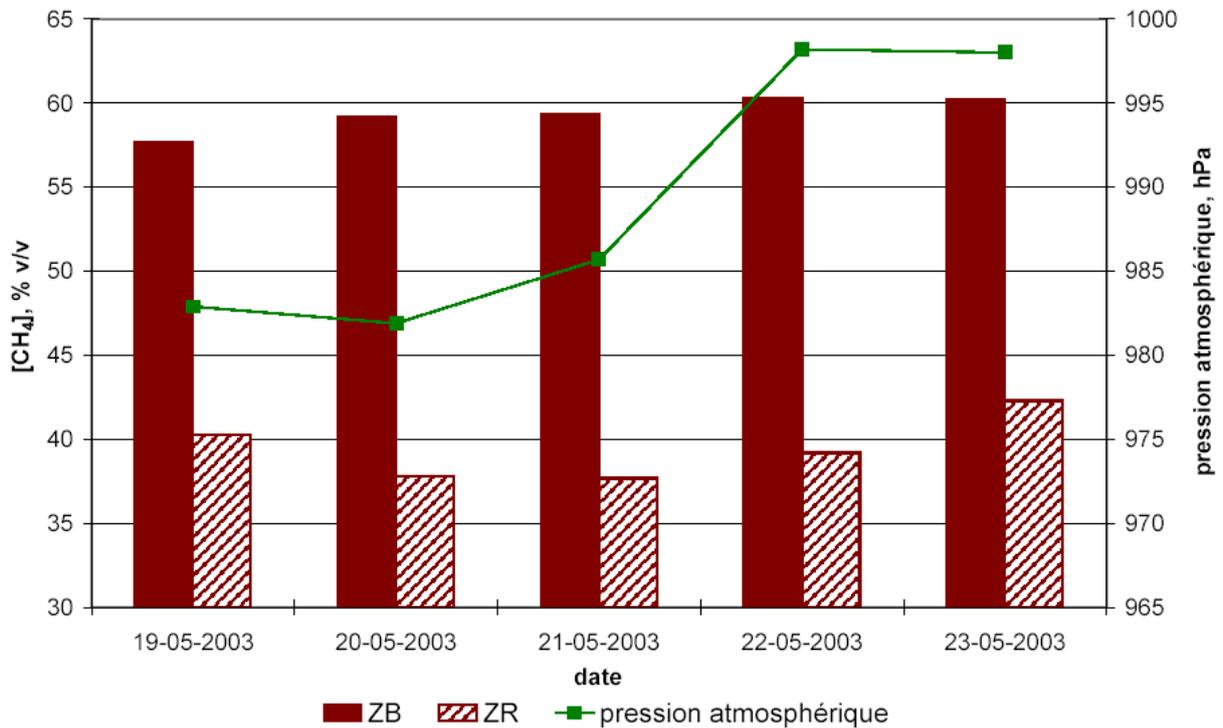
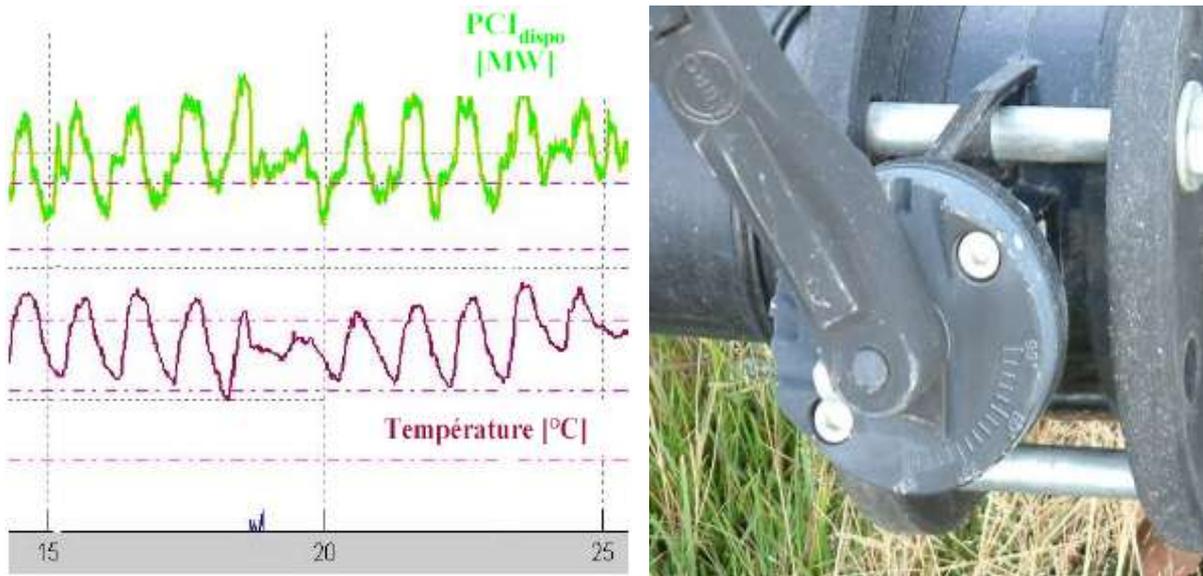


Fig. 52. Exemple d'influence de la pression atmosphérique sur la concentration en méthane dans le biogaz à Barycz

⇒ En analysant l'influence des paramètres météorologiques sur le biogaz des deux parties de CDS Barycz on note à nouveau une plus grande influence sur le gaz issu de la partie recultivée.

3.1.3. Stabilité de la production du biogaz

On observe des évolutions journalières de PCI_{dispo} ($\pm 2,7$ MW soit l'équivalent en PCI_{dispo} d'un groupe électrogène) au CDS Borde-Matin (Figure 53A). Les opérateurs du CDS ont tendance à l'expliquer par l'apparition des condensats ou bouchons de glace au niveau des vannes peu ouvertes (par exemple sur les puits anciens, en fin de vie, Figure 53B), qui gênent la circulation du biogaz. Le jour, avec l'élévation de la température, ces condensats ou bouchons disparaissent (s'évaporent) et le débit augmente.



(A)

(B)

Fig. 53. (A) Évolutions journalières de PCI_{dispo} , (B) Détail de vanne d'un puits – angle d'ouverture entre 0° et 90° (ici 24°), soit en approximant $100 \cdot (1 - \cos\alpha)\% \sim 8,6\%$

(© Photo K.Szafnicki, ENSM.SE)

Les mesures effectuées dans deux collecteurs principaux, ZB et ZR, du CDS Barycz nous ont permis de comparer la qualité et la stabilité de la production du biogaz sur la partie en exploitation dans des années 1992-2004 (collecteur ZB) et la partie recultivée (collecteur ZR). La concentration en méthane est plus élevée sur la partie de décharge en exploitation. Dans la période étudiée elle varie :

- ♦ de 59 à 66% v/v pour ZB,
- ♦ de 36 à 56 % v/v pour ZR.

On note également une baisse de la teneur en méthane dans le biogaz de ZR depuis octobre 2002 (Figure 54). Ceci peut être expliqué par le déclin de la matière organique dans la masse de déchets stockés sur la partie recultivée.

La comparaison des rapports CH_4/CO_2 dans le biogaz issu de deux parties de décharge, montre que la production du biogaz sur la partie recultivée est moins stable. Les valeurs de ces rapports varient (Figure 55) :

- ♦ de 1,61 à 2,24 pour ZR,
- ♦ de 1,54 à 1,8 pour ZB.

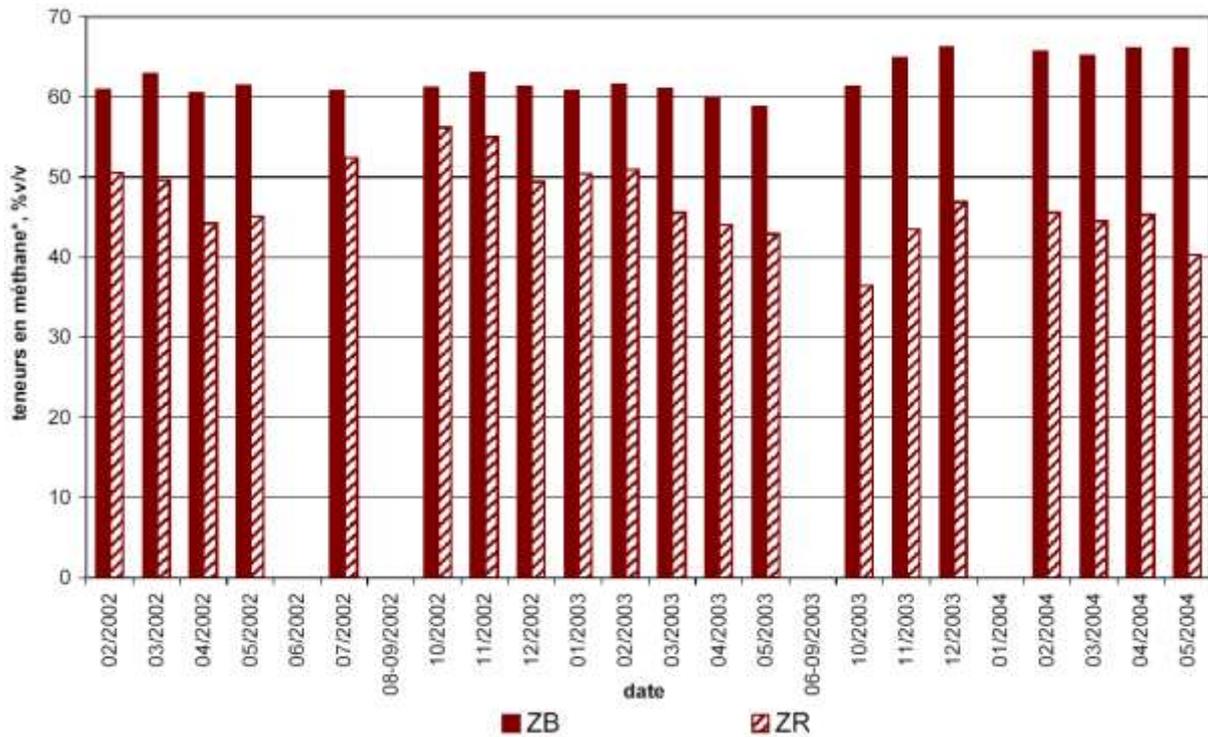


Fig. 54. Changement de la teneur en méthane dans le biogaz de la partie recultivée (ZR) et en exploitation (ZB) du CDS Barycz dans la période étudiée.

* moyennes mensuelles calculées sur la base de données mesurées pendant le fonctionnement de 2 à 3 groupes électrogènes (dépression dans les installations de dégazage)

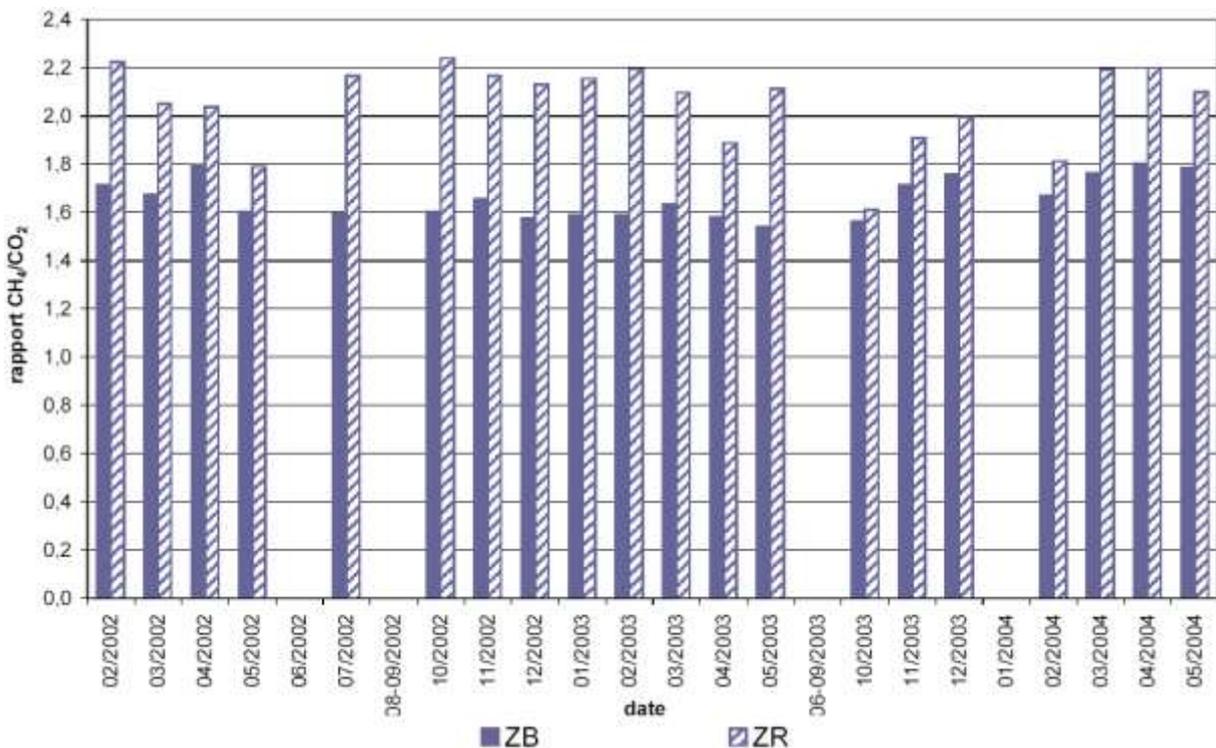


Fig. 55. Rapports CH₄/CO₂ pour la partie en exploitation (ZB) et recultivée (ZR) du CDS Barycz dans la période étudiée.

3.1.4. Bilan de fonctionnement de la valorisation

Le pourcentage de puissance disponible, utilisée pendant chaque mois étudié à Borde-Matin, a été calculé (Figure 56).

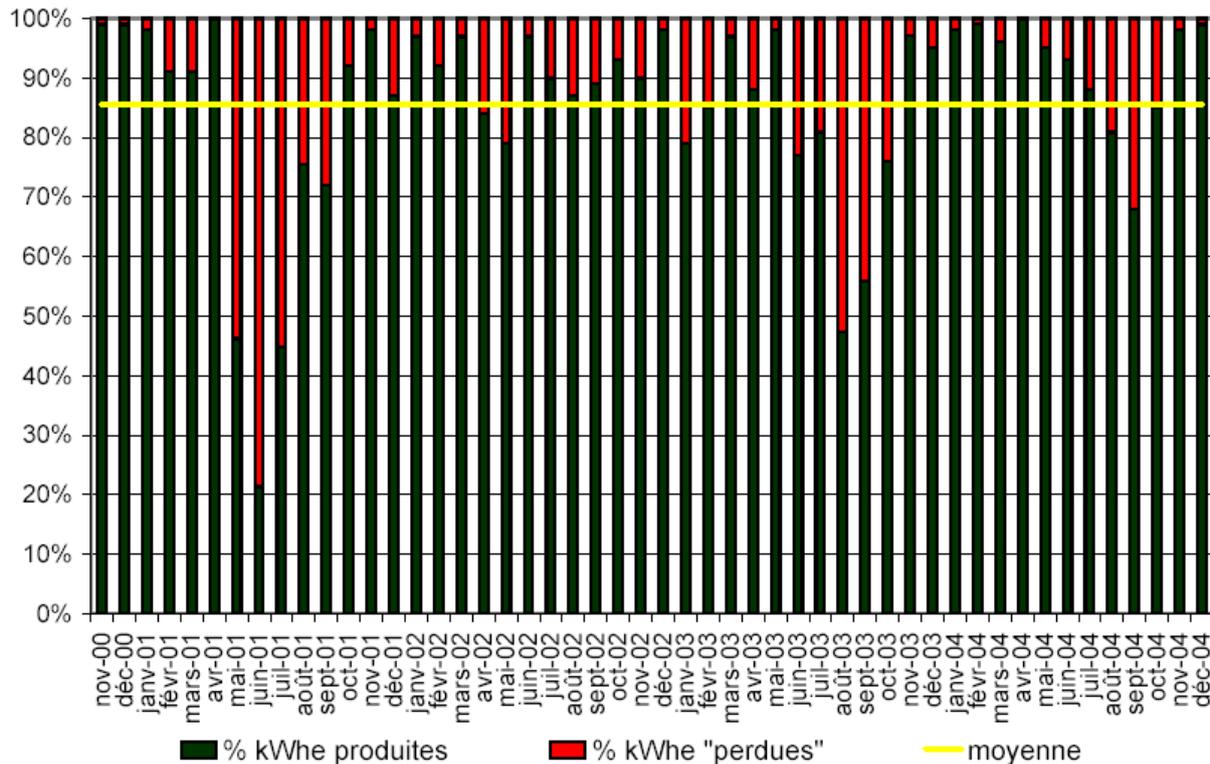


Fig. 56. Bilan d'utilisation de puissance disponible (%) à Borde-Matin dans la période de novembre 2000 à décembre 2004

On remarque que les moteurs n'utilisent pas toujours toute la PCI disponible, c'est-à-dire que le reste du biogaz est brûlé dans les torchères. On observe que pendant 16 mois de fonctionnement le pourcentage de la puissance disponible utilisée restait en dessous de 85%, et pendant 4 mois elle était sous la barre des 50% de la puissance disponible. Le taux de kWh produit est plus faible pendant les mois d'été, surtout en 2001 et 2003.

⇒ La plupart de ces cas sont provoqués par des paramètres météorologiques (p.ex. gel, précipitations intensives provoquant inondation de l'installation) ou par des interventions sur les groupes électrogènes - GE (p.ex. échanges de bougies, vidanges, maintenance et réparations).

La mise en place d'une installation de filtrage à base de charbon actif pour épurer le biogaz des composants agressifs, provoquant la corrosion accélérée des moteurs, est prévue à

court terme. Elle permettrait de diminuer les arrêts de fonctionnement des moteurs liés à des pannes ou maintenance supplémentaires liées à l'agressivité du biogaz.

L'énergie électrique maximale qui peut être produite en une heure dans trois groupes électrogènes à Barycz est de 873 kWhe (250 kWhe + 250 kWhe + 373 kWhe).

Le pourcentage d'énergie électrique produite mensuellement a été calculé, traduisant le taux d'utilisation de la station de valorisation. Les valeurs mensuelles d'énergie maximale et produite, ainsi que le taux d'utilisation de la station de valorisation sont présentés dans le Tableau 11.

Tableau 11. Sommes mensuels d'énergie maximale et produite à Barycz

Date	Énergie maximale, MWhe	Énergie produite, MWhe	Taux d'utilisation, %
12/2002	649,5	381,7	59
01/2003	649,5	407,1	63
02/2003	586,6	358,9	61
03/2003	649,5	415,3	64
04/2003	628,6	394,9	63
05/2003	649,5	432,9	67
06/2003	628,6	215,8	34
07/2003	649,5	164,8	25
08/2003	649,5	204,0	31
09/2003	628,6	147,0	23
10/2003	649,5	293,2	45
11/2003	628,6	303,5	48
12/2003	649,5	206,2	32
01/2004	649,5	248,3	38
02/2004	607,6	284,7	47
03/2004	649,5	403,7	62
04/2004	628,6	394,9	63
05/2004	649,5	381,7	59
Moyenne	637,9 MWhe	313,3 MWhe	49 %

La quantité mensuelle d'énergie électrique produite au CDS Barycz est, en moyenne, de 313 MWhe (avec le maximum de 433 MWhe) et le taux d'utilisation de la station de valorisation du biogaz est de 49% (avec le maximum de 67%). Les baisses de la production d'énergie observées pendant quelques mois (par exemple juin – septembre 2003) peuvent être provoquées par la nécessité de l'évacuation régulière de l'eau de l'installation, mais aussi par des interventions sur les GE et des perturbations dans le réseau électrique.

Le taux d'utilisation de la station de valorisation devra augmenter avec la fermeture de la partie en exploitation (donc dégazage plus intensif), ainsi qu'avec l'ouverture et le début de stockage des déchets sur la partie nouvelle (Barycz III ouverte en janvier 2005), qui devrait fournir du biogaz d'ici quelques années.

3.1.5. Récapitulatif opératoire

Un récapitulatif des constatations évoquées dans cette partie est présenté dans le Tableau 12, accompagné de quelques références faisant mention des constatations analogues.

Tableau 12. Récapitulatif opératoire

Paramètre	Résultats	Références
Exploitation	<p>Influence prépondérante, pouvant masquer l'influence d'autres paramètres (météorologiques...)</p> <p>Influence de la dépression dans l'installation du dégazage sur les teneurs en CH₄ et CO₂</p> <p>Influence plus prononcée sur le biogaz de la partie ancienne (recultivée) de CDS</p>	
Conditions météorologiques	Le temps sec, ensoleillé avec une température élevée provoque une baisse de PCI _{dispo}	[Boltze 1997, Christensen 1996, Christophersen 2001, Galle 2001, Wreford 2000]
	Des précipitations induisent une augmentation de PCI _{dispo}	
	Des précipitations et/ou une température basse impliquent une augmentation de PCI _{dispo} et de teneurs en méthane	
	Une chute de pression atmosphérique peut provoquer l'apparition d'odeurs et une modification de teneur en méthane	
Bilan	<p>Pourcentage moyen de puissance électrique disponible valorisée en électricité à Borde-Matin : ~85%</p> <p>Taux moyen d'utilisation de l'équipement de valorisation électrique à Barycz : ~49%</p>	

3.2. Analyses croisées des relations à court terme (heures, jours)

3.2.1. Modèles PLUIE → PCI_{dispo}

Vu l'importance de l'influence à court terme (heures, jours) des précipitations sur la production du biogaz au CDS de Borde-Matin, d'où parfois des problèmes avec la PCI_{dispo} pendant les mois d'été (chauds et secs) il nous paraît nécessaire d'analyser plus en détail les relations entre la précipitation et la production du biogaz. L'intérêt de cette étude est de permettre au gestionnaire du réseau de collecte du CDS de prévoir l'influence d'un événement pluvieux sur la production du biogaz et ainsi d'orienter ses choix, de faciliter et de guider ses décisions dans cette situation.

Grâce à un programme de modélisation dédié (code - *Annexe 6*) on a essayé d'identifier un modèle comportemental linéaire traduisant la dynamique des changements de PCI_{dispo} en fonction des précipitations (Figures 57 et 58) [Meres 2004b].

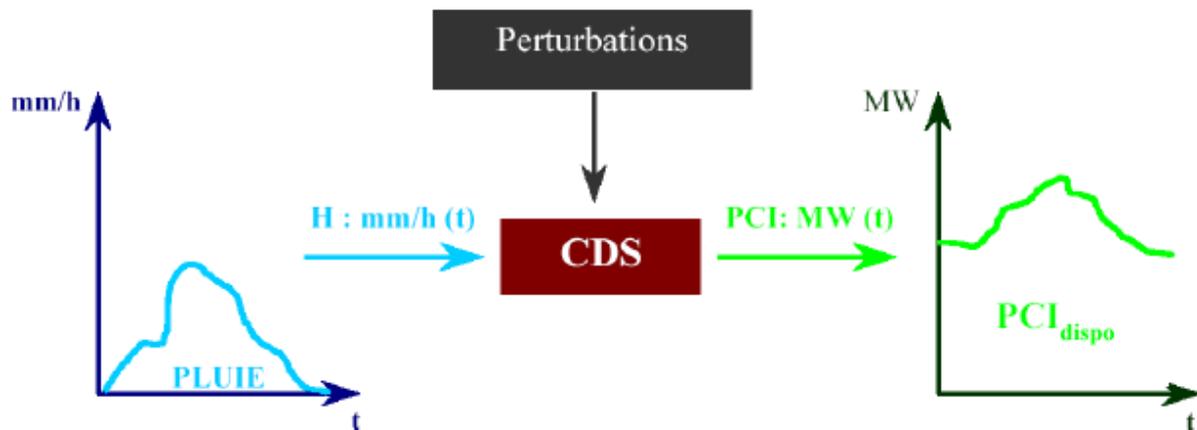


Fig. 57. Modélisation des relations entre précipitations et PCI_{dispo}

⇒ L'objectif est d'étudier un modèle qui traduit au mieux, le plus précisément possible, l'influence des précipitations sur la PCI_{dispo}, en faisant abstraction, dans la mesure du possible, des autres influences, appelées ici « perturbations ».

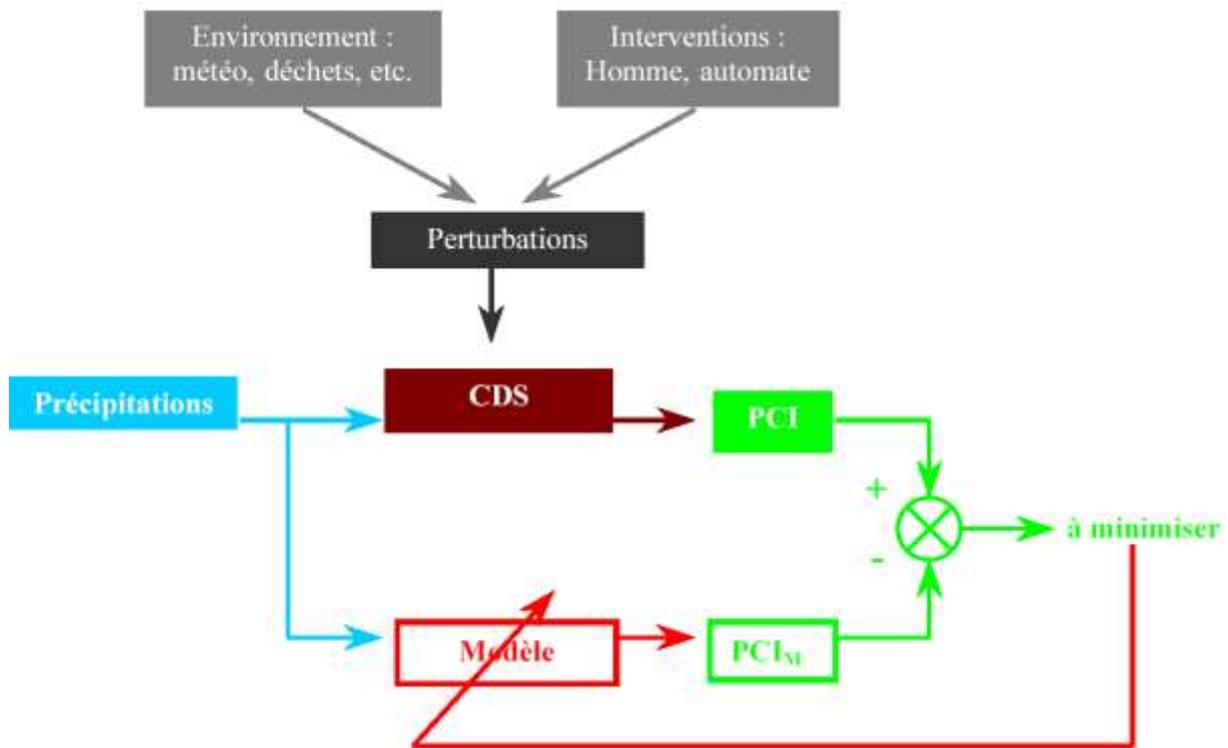


Fig. 58. Schéma de principe d'un modèle comportemental

Protocole d'identification d'un modèle :

1. Planification de l'expérience pour collecter les données numériques.

En analysant les fichiers mensuels contenant les données récupérées de novembre 2000 à décembre 2004, des événements pluvieux qui nous semblaient les plus représentatifs de l'influence : pluie \rightarrow PCI_{dispo} ont été choisis. C'est une phase très importante parce qu'elle détermine la qualité des résultats obtenus, donc la qualité des modèles. Pour que les événements choisis soient représentatifs on a pris en compte les informations contenues dans la « main courante » en éliminant des périodes de travaux, réglages etc. De plus, les périodes correspondant à des précipitations importantes et peu influencées par des variations d'autres paramètres météorologiques ont été privilégiées. Ainsi, dix-huit événements pluvieux ayant lieu en : 2001 (mars, avril, juin, septembre, octobre, novembre), 2002 (février, mai, juin, novembre, décembre), 2003 (mai, novembre) et 2004 (octobre) ont été choisis. Les données des événements pluvieux ont été extraites, en incorporant les mesures de PCI_{dispo} précédant les premières pluies, pour avoir une possibilité d'étudier le signal également avant l'événement pluvieux.

Une visualisation d'un événement pluvieux choisi est présentée sur la Figure 59.

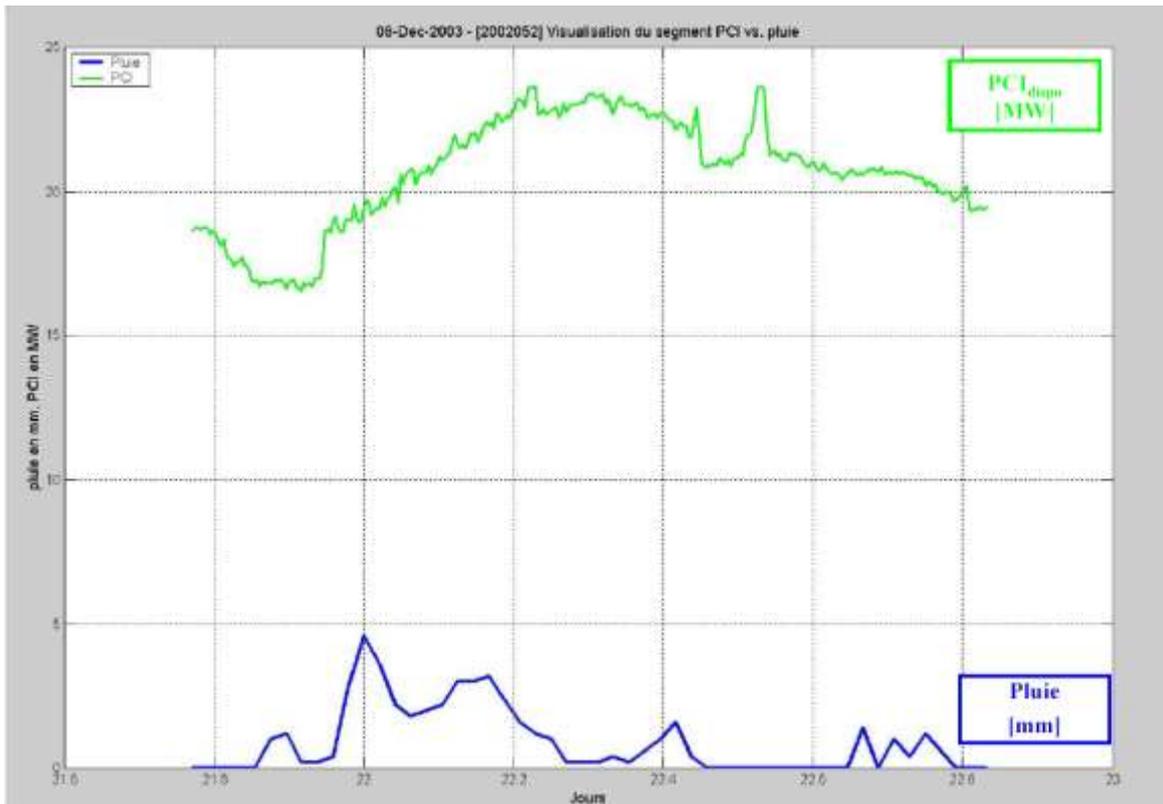


Fig. 59. Visualisation de l'événement pluvieux : 22 - 23 mai 2002, Borde-Matin

2. Préparation des données « brutes »

Le travail de sélection des événements pluvieux nous a permis de noter que les fichiers des données mesurées au CDS de Borde-Matin présentent quelques lacunes : il manque parfois des mesures. Les valeurs manquantes ont été ajoutées par extrapolation de valeurs voisines, néanmoins leur faible nombre (quelques valeurs sur plusieurs dizaines) ne modifie pas significativement la validité des résultats.

Puisque des mesures de PCI_{dispo} sont plus fréquentes que celles des précipitations (5 minutes contre 30 minutes) il a été nécessaire de s'adapter à la fréquence des mesures de la pluviométrie, ce qui a conduit à la nécessité d'adapter (sous-échantillonner) des données PCI_{dispo} .

Il a été décidé de tester trois méthodes de sous-échantillonnage pour avoir la possibilité d'en choisir une qui nous permettrait de lisser les données PCI_{dispo} , sans perdre trop d'information. Les méthodes étudiées sont : conservation d'une mesure sur six (avec filtrage préalable ou non) et moyenne des six valeurs précédentes. Après comparaison des performances, il a été choisi d'utiliser un sous-échantillonnage (une mesure sur six) avec filtrage préalable par un *filtre passe-bas de 1^{er} ordre* qui nous a permis de réduire des fluctuations et supprimer des « bruits » de fréquence plus élevée. Cela est très important car le signal de PCI_{dispo} est bruité

(variations en absence de pluie) ce qui suggère qu'il puisse être perturbé par d'autres paramètres. Pour choisir un coefficient a_F du filtre de 1^{er} ordre le mieux adapté, plusieurs simulations avec des valeurs différentes ont été réalisées, pour sélectionner la valeur de $a_F = 0,75$ (Figure 60).

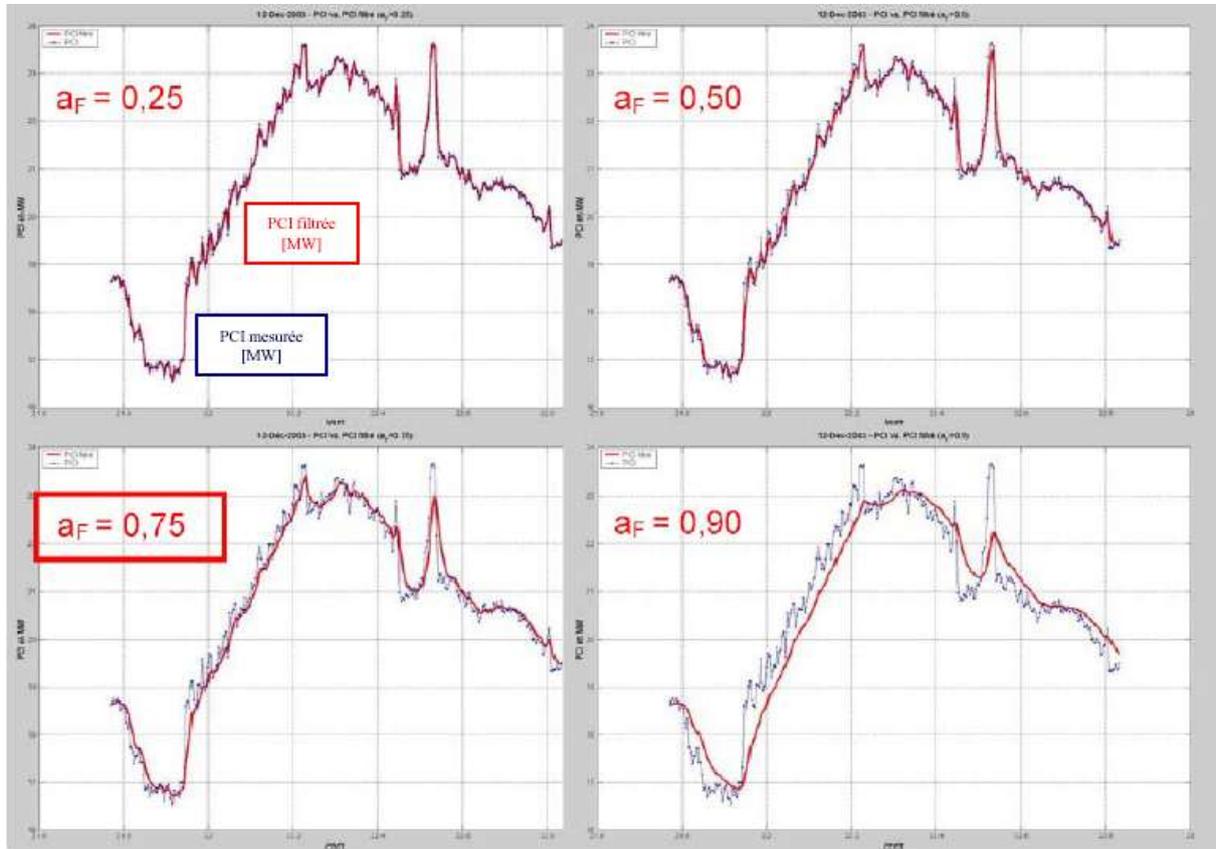


Fig. 60. Influence du choix de la valeur de coefficient a_F du filtre 1^{er} ordre sur l'allure de la courbe filtrée

Pour finir la préparation de données « brutes » le signal PCI_{dispo} a été centré de manière à ce que sa valeur filtrée en l'absence d'événement pluvieux soit nulle (Figure 61), ceci afin de mieux mettre en évidence la relation dynamique entre la pluie et la PCI_{dispo} .

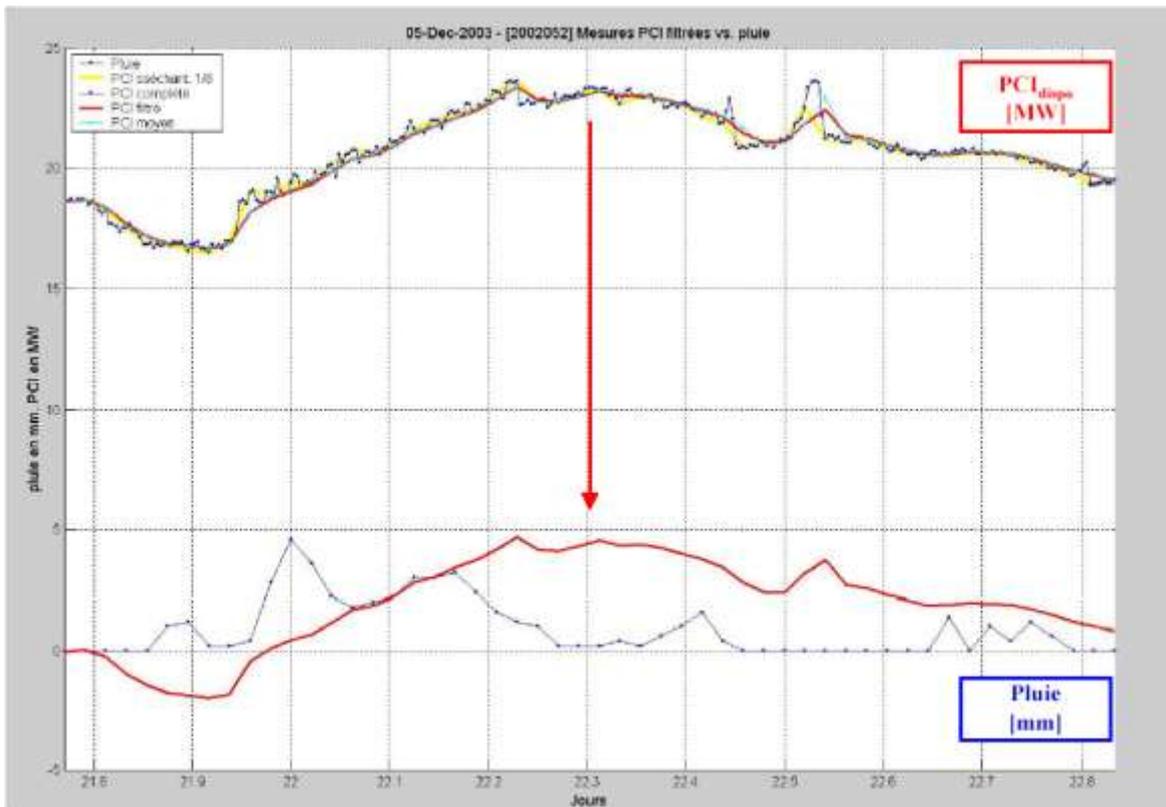


Fig. 61. Événement pluvieux du 22 - 23 mai 2002 après le filtrage et le centrage des données PCI_{dispo}

3. Choix du type de modèle

Les processus envisagés sont supposés linéaires et peuvent s'écrire sous la forme d'une fonction de transfert discrète :

$$\frac{PCI}{H} = Z^{-nk} \cdot \frac{B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} \quad (21)$$

où :

$$B(Z^{-1}) = b_0 + b_1 \cdot Z^{-1} + \dots + b_n \cdot Z^{-m}$$

$$A(Z^{-1}) = 1 + a_1 \cdot Z^{-1} + a_2 \cdot Z^{-2} + \dots + a_n \cdot Z^{-nf}$$

nk : retard pur

A, B : polynômes de degrés respectifs nf et m ($m \leq nf$)

nf : ordre du modèle

et $nf \geq m$: condition de réalisabilité

4. Estimation

Pour trouver un modèle représentatif, plusieurs simulations et optimisations de PCI_{dispo} modélisée ont été réalisées en se basant sur les événements pluvieux sélectionnés, avec des retards purs nk variant de 0 à 15 (soit 0 à 7,5 h) et des ordres nf pris dans l'intervalle de 0 (simple relation de proportionnalité) à une valeur maximale nf_{max} , telle qu'on soit sûr qu'elle est surdimensionnée. Dans notre cas $nf_{max}=6$ a été choisi vu qu'il est difficilement concevable que le processus soit d'ordre 6 ou supérieur. En effet, un tel degré de complexité correspond en général à des processus oscillants très peu amortis, tels que les structures mécaniques très flexibles. D'un autre côté, $nf_{max} \gg 1$ nous permettra de mieux apprécier l'évolution de $QN(nf)$.

5. Choix de la structure du modèle

La structure optimale d'un modèle se déterminera en analysant l'évolution du critère quadratique normé QN qui traduit un écart « moyen normé » entre les valeurs de PCI_{dispo} mesurées et modélisées, exprimé en %. En général un modèle est jugé acceptable dans la littérature quand la valeur QN est de l'ordre 20 à 30% [Szafnicki 1991].

⇒ Dans notre cas, compte-tenu des influences « extérieures » difficilement quantifiables mais inévitables (i.e. autres que la météo) et des probables erreurs d'hypothèse (non-linéarité du processus) on peut s'attendre à des valeurs de QN plus élevées.

Étapes des tests de structure :

I. Recherche du nk (retard pur) optimal :

Les Figures 62 et 63 illustrent la recherche de nk optimal (nk_{opt}) dans le cas de la pluie de mai 2002.

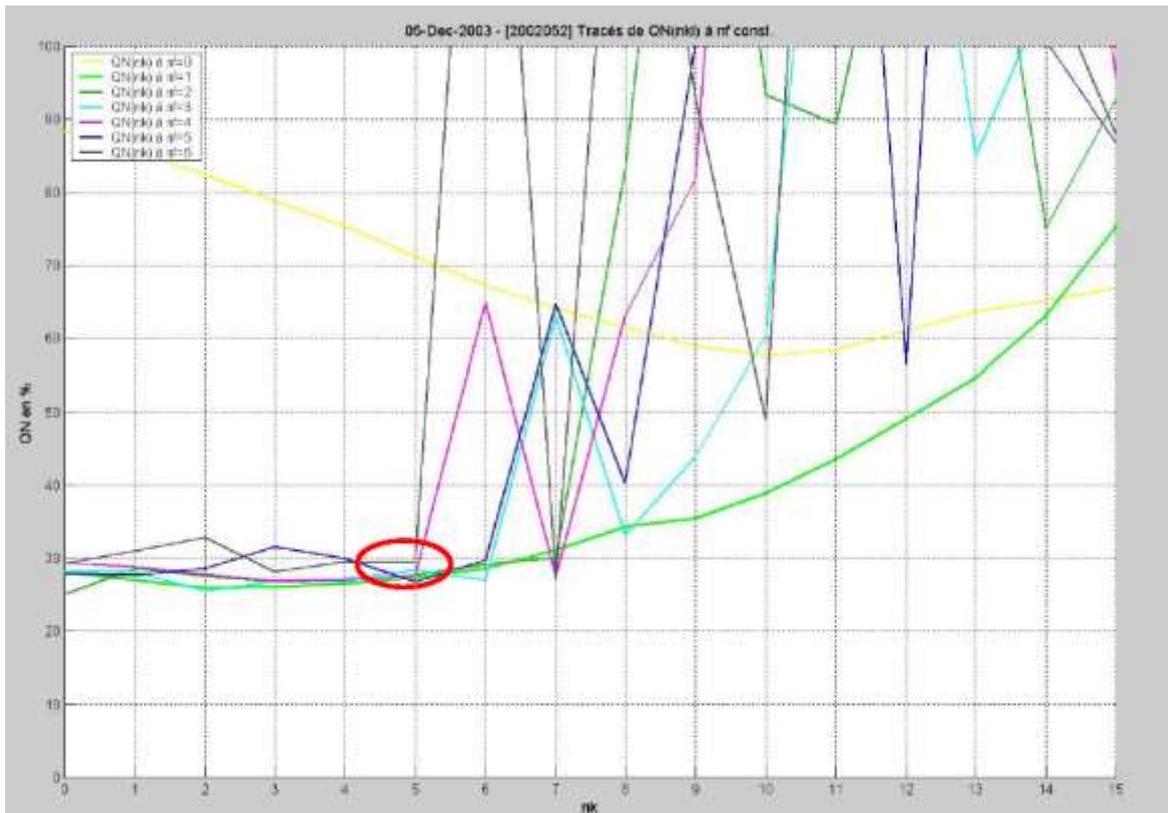


Fig. 62. Recherche du nk_{opt} : 22 - 23 mai 2002, Borde-Matin

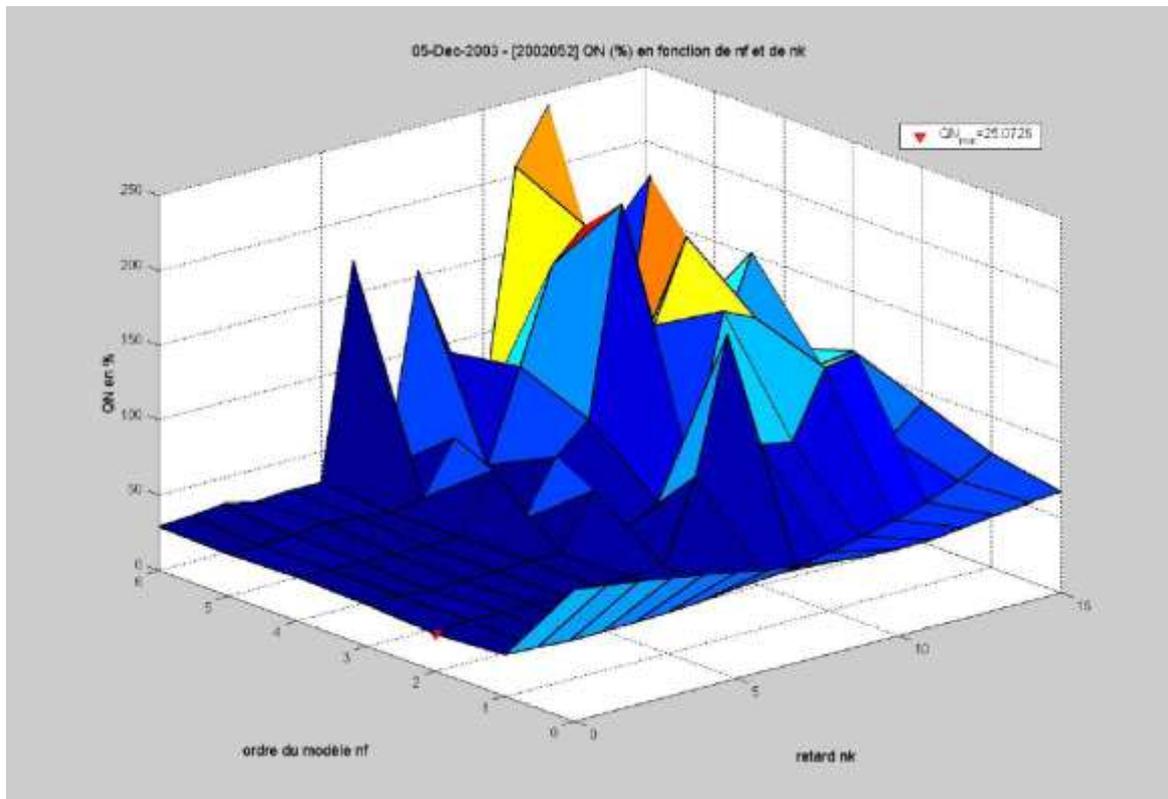
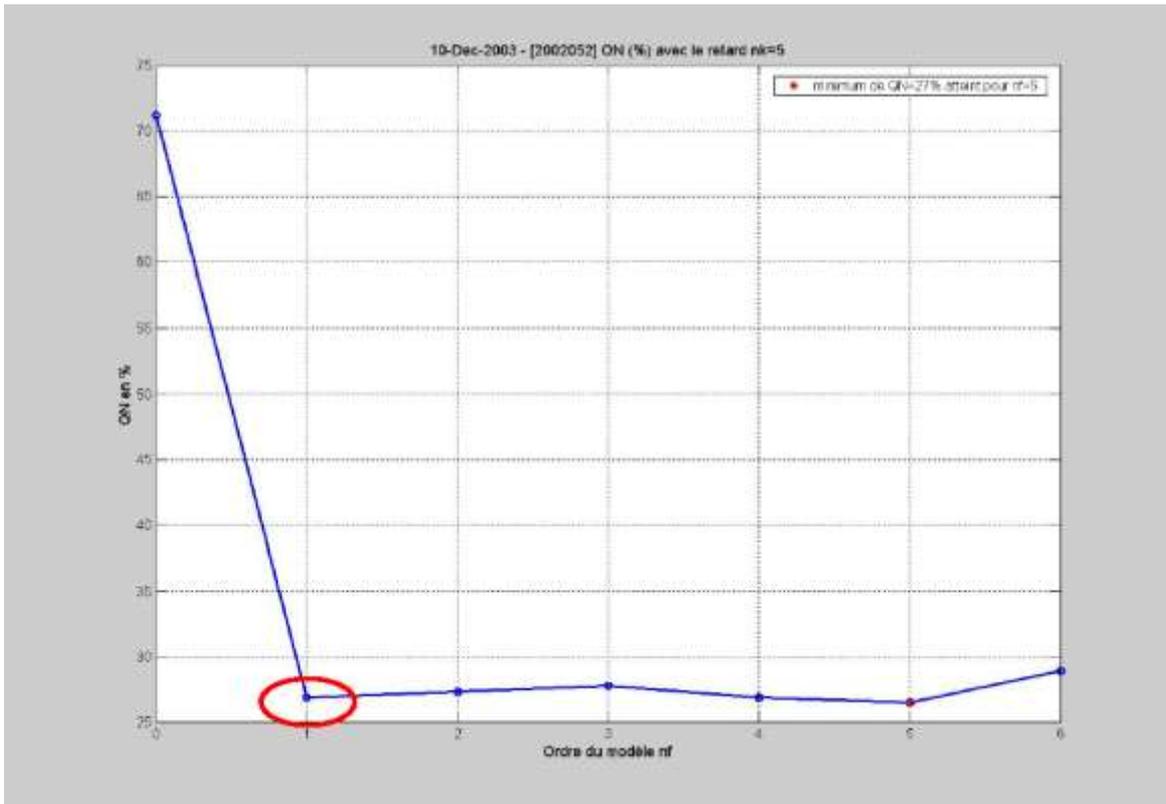


Fig. 63. Recherche du nk_{opt} : 22 - 23 mai 2002, Borde-Matin

Dans ce cas, en analysant la courbe $QN(nk)$, la valeur de nk_{opt} a été estimée à 5 (Figure 62).

II. Recherche du nf (ordre du modèle) optimal (nf_{opt}) avec nk_{opt} choisi précédemmentFig. 64. Recherche du nf_{opt} : 22 - 23 mai 2002, Borde-Matin

La valeur nf optimale égal à 1 a été estimée (Figure 64), même si le QN « strictement minimal » est pour $nf=5$. En effet, la différence entre la valeur de QN pour nf égal 5 et 1 est négligeable (respectivement 27% contre 27,3%), donc on choisit la structure le plus simple possible (principe de parcimonie).

Pour vérifier si $nf = 1$ est optimal, on utilise le test des positions des pôles (racines de $A(z^{-1})$) et des zéros (racines de $B(z^{-1})$) du modèle considéré (Figure 65). Si les pôles et les zéros se superposent (ou sont « proches »), ils se compensent et c'est donc que l'ordre du modèle est trop élevé. Les pôles discrets réels négatifs n'ont aucune signification physique et sont à éliminer.

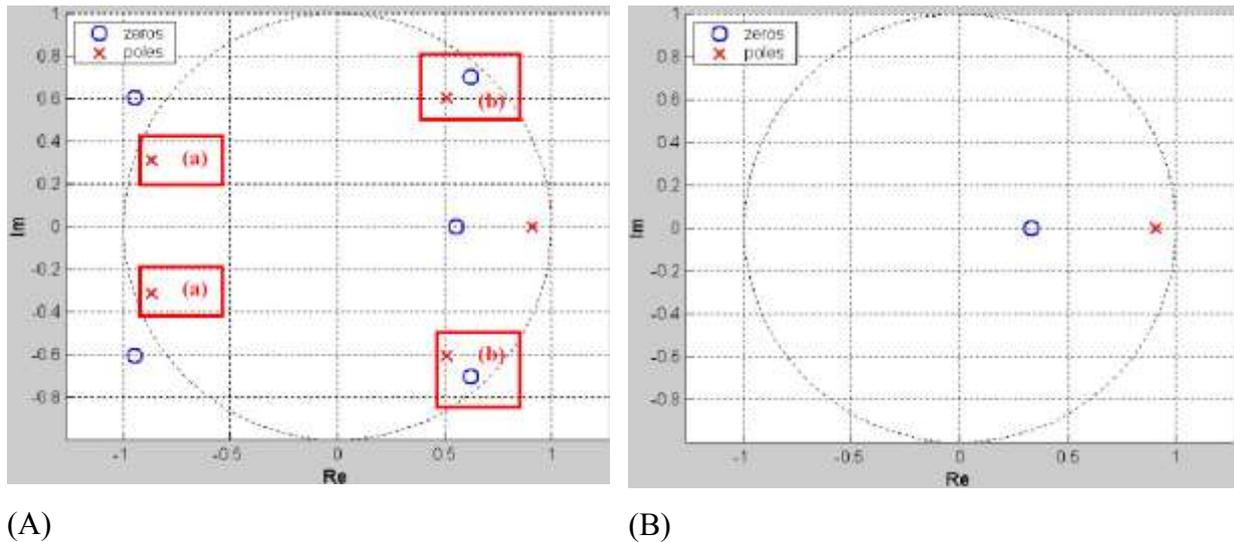


Fig. 65. Position des pôles et zéros : (A) pour $nf = 5$ et $nk = 5$: (a) pôles négatifs, (b) pôles et zéros proches (compensation) ; (B) pour $nf=1$ et $nk=5$

L'analyse des positions respectives des pôles et des zéros pour $nf = 5$ et $nf = 1$ a permis de valider le choix de $nf_{opt} = 1$. En effet pour $nf = 5$ on observe la présence de pôles à partie réelle négative et des pôles et des zéros qui sont proches les uns des autres et qui peuvent donc se compenser.

III. Test de comparaison des coefficients trouvés par identification des polynômes A et B avec leurs écarts-types estimés.

Les valeurs obtenues pour l'événement pluvieux de mai 2002 et pour valeurs de nk et nf choisies sont présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13. Valeurs des estimées des coefficients des polynômes A et B avec leurs écarts-types : 22 - 23 mai 2002

Remarque : on pourrait envisager de simplifier $B(z^{-1})$ en posant $b_1 = 0$

j	Coefficients b_j	Ecart-type σ_j	$\frac{ b_j }{\sigma_j}$	i	Coefficients a_i	Ecart-type σ_i	$\frac{ a_i }{\sigma_i}$
0	0,383068	0,095995	3,99	0	1	0	
1	-0,122916	0,105688	1,16	1	-0,908100	0,008666	104,8

IV. Explication des caractéristiques du modèle de 1^{er} ordre

Les caractéristiques du modèle sont les suivantes : coefficients des polynômes A et B (Tableau 13), gain statique K , temps caractéristiques : retard pur T_d et constante de temps τ

Les paramètres caractéristiques du modèle trouvés pour l'événement pluvieux de mai 2002 sont présentés dans le Tableau 14.

Tableau 14. Paramètres du modèle pour l'événement pluvieux du 22 - 23 mai 2002

nk	nf	$QN, \%$	K	T_{d+}, h^*	τ, h
5	1	27,3	2,83	4,5	5,2

* T_{d+} : comprend la correction due à l'écart entre l'heure de Paris (mesures sur le biogaz : PCI_{dispo} , etc.) et le temps universel (mesures météo)

V. Comparaison des courbes représentant la PCI_{dispo} simulée (PCI_M) et la PCI_{dispo} mesurée

Cette comparaison se fait visuellement sur un graphique. Elle est subjective, mais peut servir comme un moyen de vérification de la validité du modèle choisi. Les courbes représentant la PCI_{dispo} simulée et mesurée pour l'événement pluvieux de mai 2002 sont présentées sur la Figure 66.

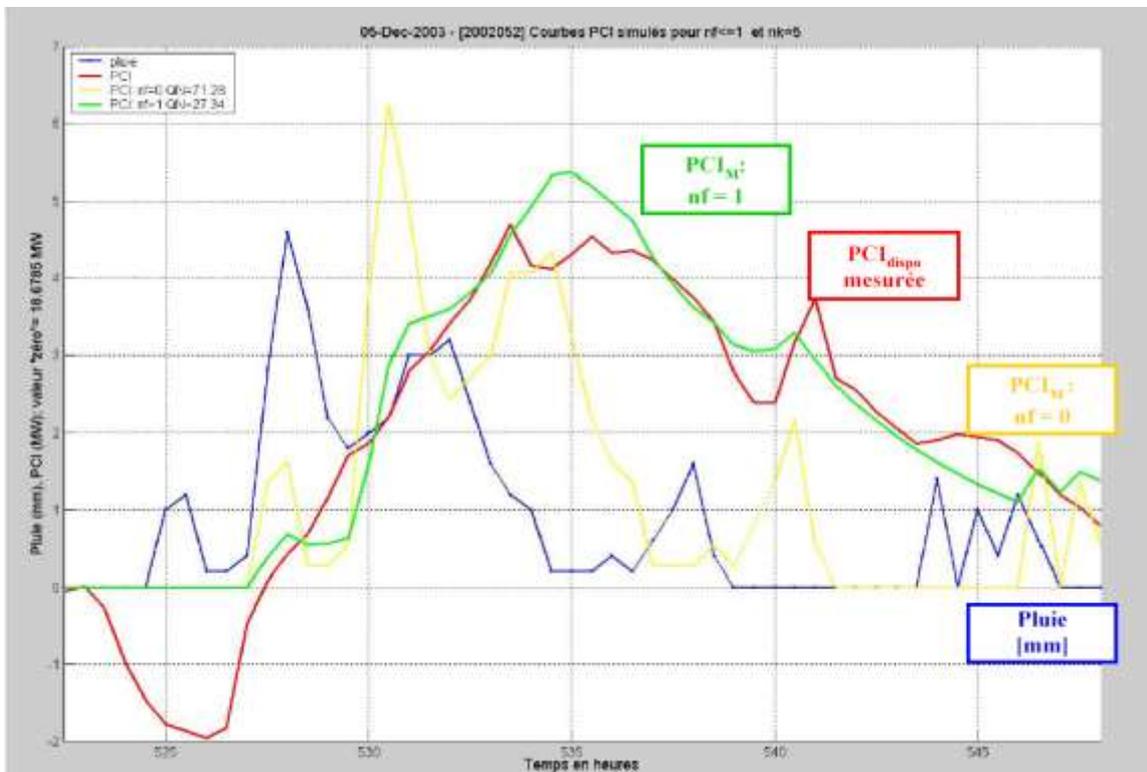


Fig. 66. PCI_{dispo} mesurée (rouge) et simulées pour $nk = 5$ (jaune : $nf = 0$, soit un lien de proportionnalité simple ; vert : $nf = 1$, soit 1^{er} ordre), données du 22 - 23 mai 2002.

6. Validation du modèle pluie \rightarrow PCI_{dispo}

Après avoir fait des identifications sur les dix-huit événements pluvieux choisis pour modélisation, sept d'entre eux ont dû être invalidés en raison d'impossibilité de trouver des structures de leur modèles (variations de PCI_{dispo} provoquées prioritairement par d'autres paramètres, niveaux de « bruits » trop importants, ...).

\Rightarrow Pour les 11 restants, il a été déterminé qu'on pouvait les représenter tous par une structure optimale de type « premier ordre avec retard ».

Partant de ceci, leurs paramètres caractéristiques (K , τ , T_{d+}) ont été estimés (Tableau 15).

Tableau 15. Caractéristiques des modèles des événements pluvieux étudiés

nk	nf	$QN, \%$	K	T_{d+}, h^*	τ, h	$\frac{ b_j }{\sigma_j}$	Dates
3	1	29,8	2,29	2,5	1,4	1,96 1,25	15-16 XI 2002
5	1	27,3	2,83	4,5	5,2	3,99 1,16	22-23 V 2002
5	1	30,5	2,87	3,5	2,1	3,02 0,97	30-31 XII 2002
8	1	23,4	2,93	6	3,9	3,67 0,18	29-30 IX 2001
3	1	30,0	6,12	3,5	9,7	4,15 1,81	5-6 VI 2002
5	1	49,9	6,17	3,5	4,5	4,65 2,37	11-12 XII 2002
6	1	25,9	6,21	4	7,8	1,36 1,22	16-17 III 2001
6	1	37,7	6,90	5	6,5	1,87 1,27	6-7 IV 2001
7	1	32,7	6,02	5,5	76	1,34 0,98	25-27 X 2004
6	1	30,6	7,4	5	14,4	2,99 0,39	6-7 X 2001
5	1	28,3	3,79	4,5	23	2,08 0,04	8-10 VI 2001

* T_{d+} : comprend la correction due à l'écart entre l'heure de Paris (mesures sur le biogaz : PCI_{dispo} , etc.) et le temps universel (mesures météo)

Un premier coup d'œil sur le tableau permet de constater que pratiquement tous les modèles sont de précision satisfaisante (QN de l'ordre de 30%, voire inférieur). En outre, une analyse comparée des paramètres des modèles montre que tous les modèles affichent le même ordre de grandeur du retard pur, soit $T_{d+} \sim 2,5$ à 6 h.

⇒ Cependant, en ce qui concerne le paramètre de proportionnalité (le gain statique K) et le paramètre d'inertie (τ) on peut observer plusieurs groupes (« familles ») de comportements :

- 1) Réaction plus rapide ($\tau \sim 1,4$ à 5,2 h) et paramètre de proportionnalité plus faible ($K \sim 2,3$ à 3),
- 2) Réaction plus lente ($\tau \sim 4,5$ à 9,7 h) et paramètre de proportionnalité plus fort ($K \sim 6,0$ à 6,9),
- 3) Deux modèles très lents ($\tau \sim 14,4$ à 23 h).

On trouve dans le groupe de la réaction plus lente un exemple d'octobre 2004 avec $\tau \sim 76$ h. La valeur de constante de temps tellement élevée peut être provoquée par la baisse de la température (de 15°C à 2°C) au milieu de l'événement pluvieux choisi (Figure 67). Ceci a pu figer le taux d'humidité élevé de la surface des déchets et ainsi bloquer pour plus longtemps que d'habitude les transferts verticaux (fuites) de biogaz. Ainsi la PCI_{dispo} et la constante de temps restent élevées. Cet exemple confirme la nécessité de choisir les événements pluvieux représentatifs précisément, hors l'influence d'autres paramètres.

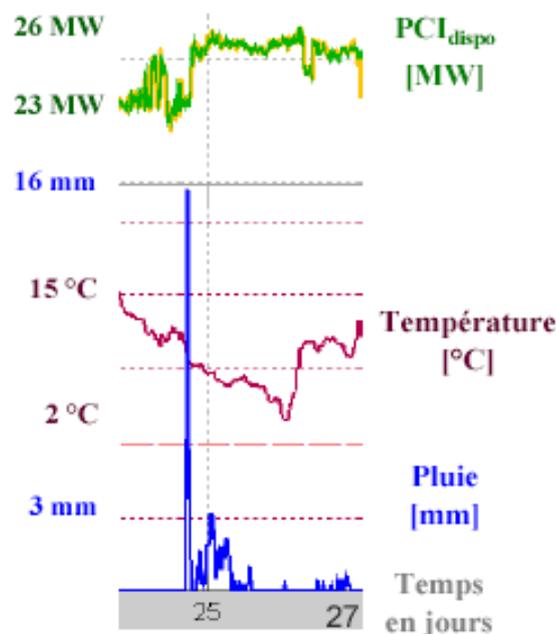


Fig. 67. Variations de la température et de la PCI_{dispo} pendant l'événement pluvieux du 25 - 27 octobre 2004

Dans une première approche, on a essayé d'expliquer la présence de trois groupes de comportements en analysant des conditions météorologiques dans les journées des événements pluvieux étudiés. On suppose que l'existence de trois groupes pourrait être expliquée par différents types de pluie (selon hauteur et grandeur) et du vent. On observe que pendant les événements pluvieux du groupe « lent » le vent a été plus intensif que pendant les événements pluvieux du groupe « rapide ». De plus, les pluies du groupe plus rapide ont été plus intensives que du groupe plus lent (en moyenne : ~ 2 mm/h contre $\sim 1,2$ mm/h).

Par la suite on se pose la question s'il est possible de trouver un modèle général pluie \rightarrow PCI_{dispo} , permettant de caractériser les variations de PCI_{dispo} liées à un ensemble d'évènements pluvieux.

3.2.2. Modèle général PLUIE \rightarrow PCI_{dispo}

D'abord on a rassemblé, dans l'ordre chronologique, un ensemble de huit événements pluvieux jugés les plus représentatifs (i.e. les huit premiers du Tableau 15). Un prétraitement des données a été effectué au préalable, impliquant le filtrage, sous-échantillonnage et centrage des mesures de PCI_{dispo} de façon à ce que leurs valeurs initiales soient nulles, puis l'assemblage des morceaux choisis des mesures (pluie, PCI_{dispo}) dans un même fichier, présenté sur la Figure 68. Ensuite le protocole d'identification décrit précédemment (§ 3.2.1 - 3) a été appliqué, dans le but de déterminer une structure optimale $(nk, nf)_{opt}$ du modèle général (Figures 69 et 70), puis d'estimer ses paramètres caractéristiques (gain, retard, constante de temps) - Tableaux 16 et 17.

Les valeurs estimées : $nk_{opt}=5$ et $nf_{opt}=1$, sont cohérentes avec celles déterminées précédemment (Tableau 15), en particulier le premier ordre du modèle est confirmé. Un critère $QN=50,6\%$, plus élevé que ceux trouvés pour les modèles particuliers, traduit le fait que certaines évolutions de la PCI_{dispo} ne peuvent pas - ou difficilement - se représenter par un modèle général (Figure 71), très probablement à cause d'autres influences que la pluie ; aléatoires et difficilement mesurables. Les paramètres caractéristiques estimés ($K=2,96$, $\tau=5,2h$, $T_{d+}=3,5h$) sont eux aussi cohérents avec ceux mentionnés dans le Tableau 15. Ils traduisent un modèle « moyen » d'influence pluie \rightarrow PCI_{dispo} , estimé sur huit événements pluvieux.

⇒ Ce modèle donne une idée générale sur la nature de l'influence pluie → PCI_{dispo} sur le CDS en exploitation. Cependant, le critère QN assez élevé indique la nécessité d'affiner l'étude, par exemple en considérant un nombre d'évènements pluvieux plus important.

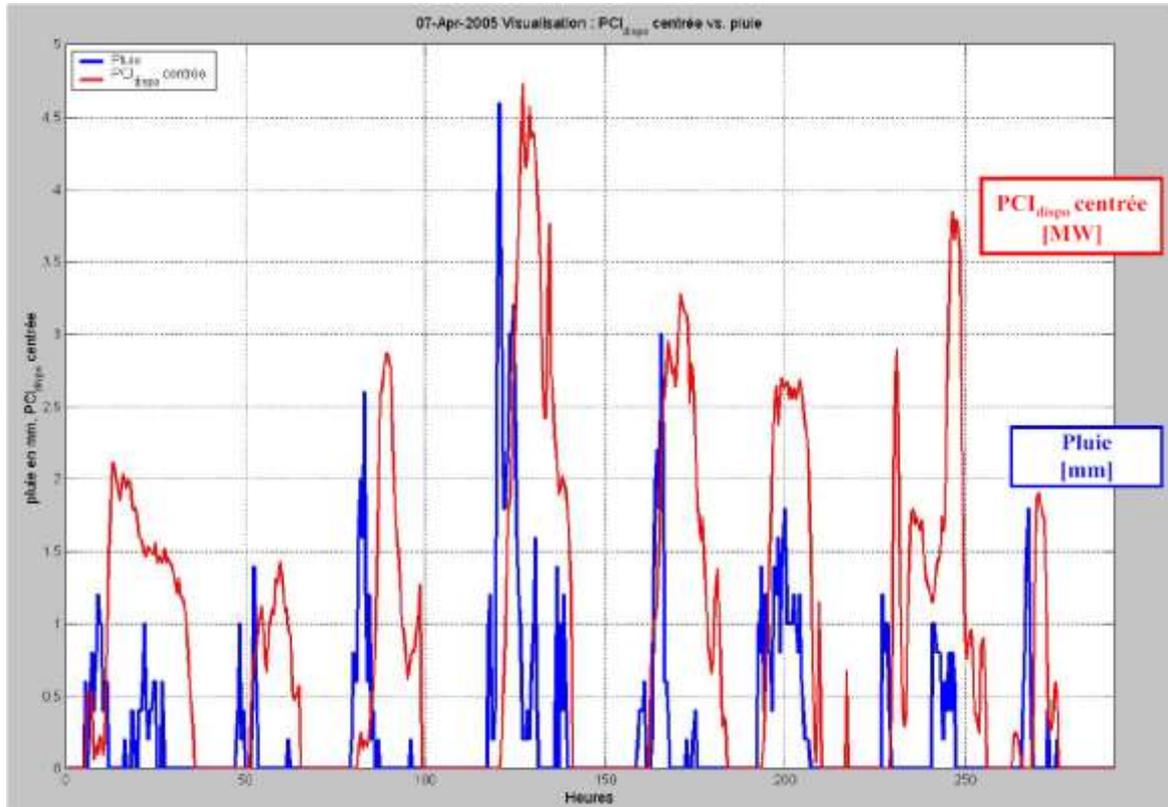
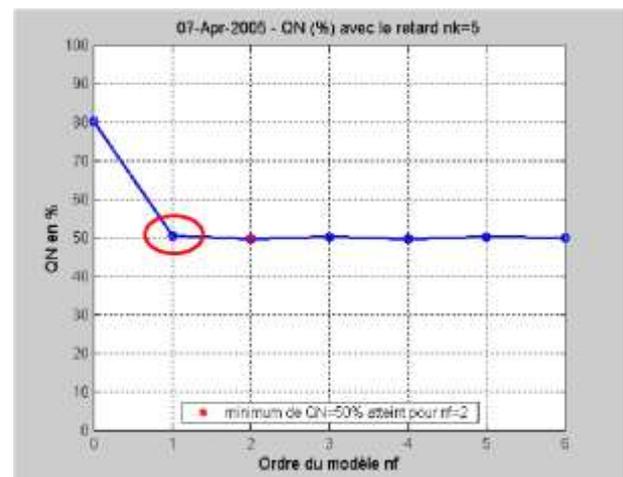
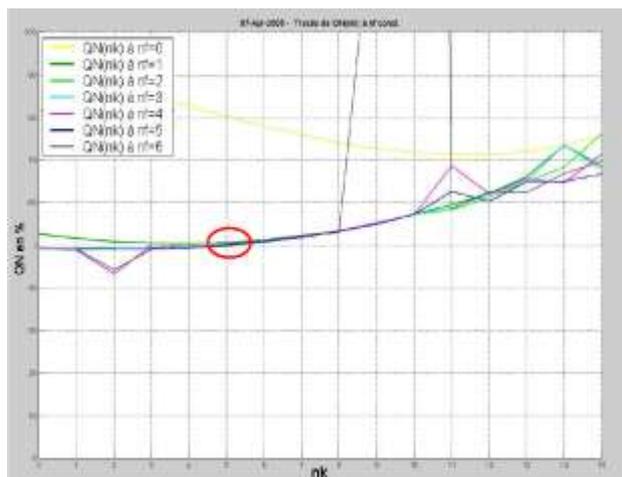


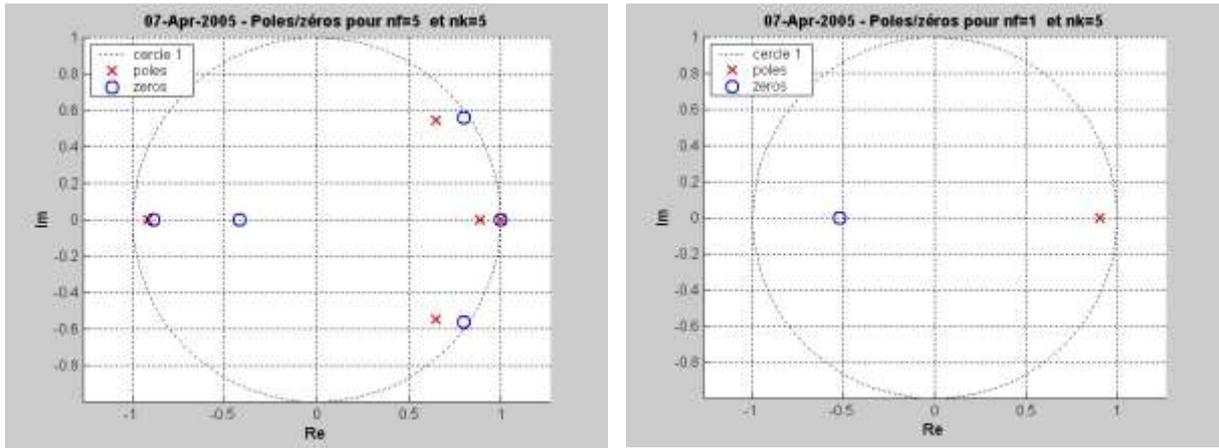
Fig. 68. Visualisation des huit événements pluvieux assemblés.



(A)

(B)

Fig. 69. Recherche du : (A) nk_{opt} ; (B) nf_{opt}



(A)

(B)

Fig. 70. Position des pôles et zéros : (A) pour $nf = 5$ et $nk = 5$; (B) pour $nf = 1$ et $nk = 5$

Tableau 16. Valeurs des estimées des coefficients des polynômes A et B avec leurs écarts-types

Remarque : on pourrait envisager de simplifier $B(z^{-1})$ en posant $b_1 = 0$

j	Coefficients b_j	Ecart-type σ_j	$\frac{ b_j }{\sigma_j}$	i	Coefficients a_i	Ecart-type σ_i	$\frac{ a_i }{\sigma_i}$
0	0,1774	0,0674	2,63	0	1	0	
1	0,0923	0,0739	1,25	1	-0,9089	0,0058	156,7

Tableau 17. Paramètres du modèle général

nk	nf	$QN, \%$	K	T_{d+}, h^*	τ, h
5	1	50,6	2,96	3,5	5,2

* T_{d+} : comprend la correction due à l'écart entre l'heure de Paris (mesures sur le biogaz : PCI_{dispo} , etc.) et le temps universel (mesures météo)

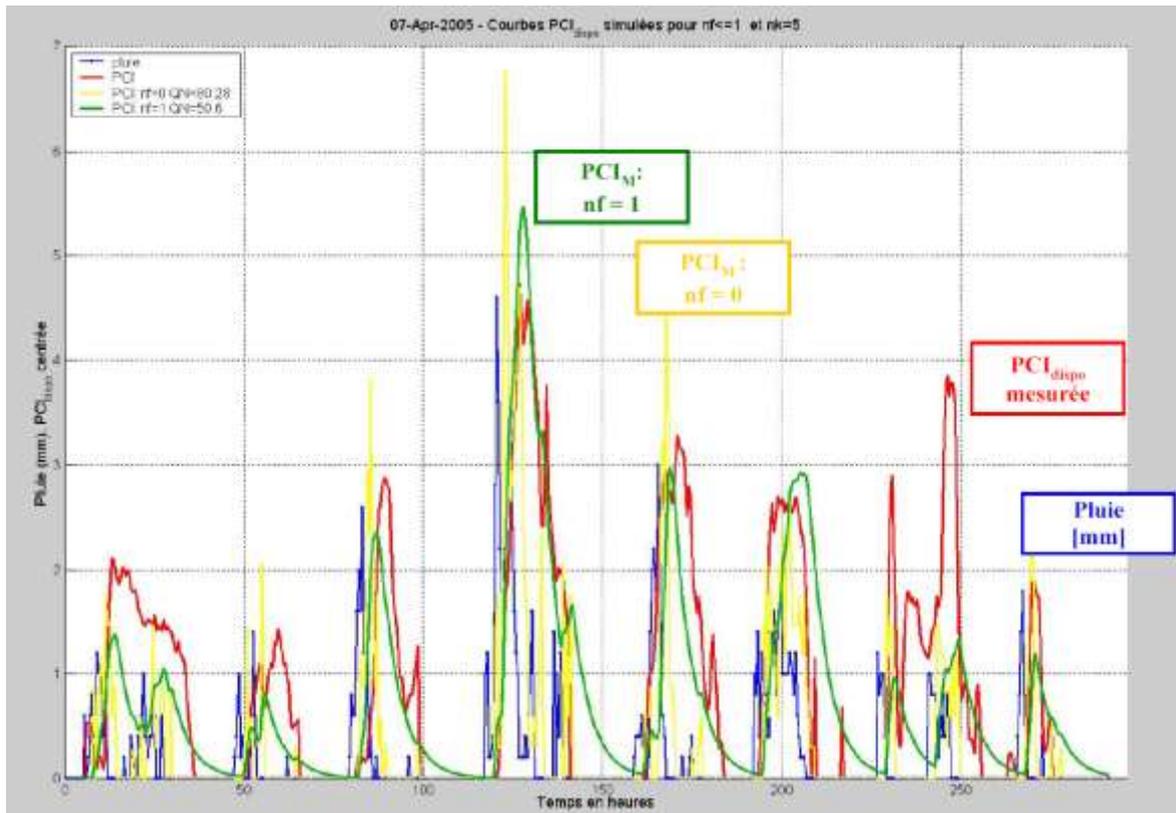


Fig. 71. PCI_{dispo} mesurée (rouge) et simulées pour $nk=5$ (jaune : $nf=0$, soit un lien de proportionnalité simple ; vert : $nf=1$, soit 1^{er} ordre), modèle général.

Les modèles identifiés permettent donc de mettre en avant des types précis d'interactions (relations) pluie \rightarrow PCI_{dispo} (premiers ordres avec retard) ainsi que des ordres de grandeur des paramètres caractéristiques statiques (K) et dynamiques (τ , T_d).

Cependant, il faudrait étudier un nombre de cas plus important pour préciser ces résultats.

3.2.3. Modèle DÉBIT → CH₄

Vu l'importance de garantir les conditions de fonctionnement optimales pour des moteurs de cogénération, qui exigent souvent la concentration en méthane dans le biogaz plus élevée que la valeur de fonctionnement minimale (e.g. 45% v/v), il est important de pouvoir réguler vite et précisément la teneur en méthane. D'où l'utilité de connaître et de quantifier le rapport entre la concentration en méthane dans le biogaz et le débit. Il a été constaté *in situ* que la diminution du débit de biogaz induit l'augmentation de teneur en méthane et *vice versa*. Les données de 1999 à 2004 du CDS Barycz (où la teneur en méthane n'est pas régulée sur une valeur fixe, contrairement au CDS Borde-Matin) ont été analysées pour trouver 20 exemples de réponses de type « créneau » de teneurs en méthane $[CH_4]$ vs. débit du biogaz Q (Figure 72A). Des fonctionnalités dédiées ont été développées sous Matlab (code – Annexe 7) pour visualiser et quantifier la relation entre concentration en méthane et débit du biogaz [Meres 2004b]. Le coefficient de cette relation K_s a été calculé pour chaque exemple trouvé :

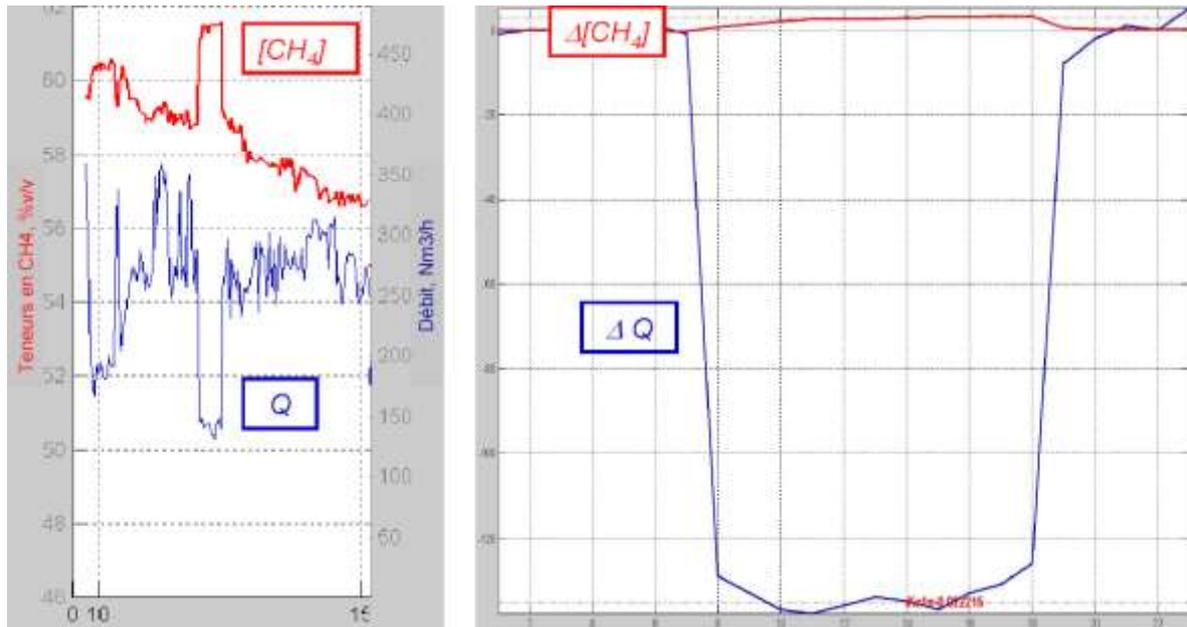
$$K_s = \frac{\Delta[CH_4]}{\Delta Q} \quad (22)$$

où :

$\Delta[CH_4]$ – changement de la concentration en méthane (% v/v) en réponse à :

ΔQ – variation du débit (Nm³/h) (Figure 72B)

Les amplitudes et les valeurs initiales de changement de la concentration en méthane et de la variation du débit, ainsi que les valeurs K_s calculées sont présentées dans le Tableau 18.



(A)

(B)

Fig. 72. (A) Exemple de relation $[CH_4]$ vs. Q observé *in situ*, (B) visualisation et calculs de K_s Tableau 18. Les valeurs K_s calculées, les amplitudes et les valeurs initiales de $[CH_4]$ et de Q

$\Delta Q, \text{Nm}^3/\text{h}$	$Q_{init}, \text{Nm}^3/\text{h}$	$\Delta[CH_4], \% \text{ v/v}$	$[CH_4]_{init}, \% \text{ v/v}$	K_s	Date
126,8	288,6	1,33	58,10	0,0105	I 2003
139,5	263,5	1,70	59,40	0,0122	I 2001
136,5	260,3	2,63	58,8	0,0193	II 2002
74,3	208,1	1,45	58,04	0,0196	XII 2002 (1)
137,9	279,2	2,70	58,80	0,0196	XII 2002 (2)
148,6	264,9	3,08	57,41	0,0207	XI 2000
122,7	239,9	2,60	57,60	0,0212	VI 2000
135,1	260,8	3,00	57,00	0,0222	II 2001
141,6	268,7	3,19	57,64	0,0225	II 2002 (1)
123,5	244,6	2,89	57,5	0,0234	VII 2001
99,1	199,3	2,43	57,09	0,0245	II 2003 (2)
117,3	244,4	2,88	57,89	0,0246	VI 2001
52,5	201,0	1,40	57,01	0,0267	II 2003 (1)
145,7	268,1	4,22	57,62	0,0289	II 2002 (2)
133,2	268,5	4,31	56,31	0,0323	I 2002
133,8	267,5	4,68	56,51	0,0350	III 2003 (2)
175,1	299,8	6,39	55,39	0,0365	III 2003 (1)
135,1	254,1	4,98	55,39	0,0369	IV 2002
150,8	254,9	6,52	54,99	0,0432	V 2000
160,2	270,6	8,21	48,80	0,0512	V 2001

Des graphes des relations entre les coefficients K_s et les valeurs initiales et les amplitudes de la concentration en méthane $[CH_4]$ et du débit Q ont été tracés (Figure 73 et 74).

On n'observe pas de relations directes entre K_s et Q_{init} ou ΔQ . On remarque une relation non-linéaire entre K_s et $[CH_4]_{init}$ avec le coefficient $R^2 = 0,85$ (Figure 73). La valeur maximale possible de la teneur en méthane semble être 61% v/v (valeur asymptotique pour $Q = 0$).

On constate une relation linéaire entre K_s et $\Delta[CH_4]$ avec le coefficient $R^2 = 0,86$ (Figure 74), qui peut être présentée comme :

$$K_s = a \cdot \Delta[CH_4] + b \quad (23)$$

Avec une approximation de moindres carrés on trouve :

$$a = -0,0050210 \quad b = -0,0088315 \quad (24)$$

et en remplaçant K_s d'après équation (23) on a :

$$\Delta Q = \frac{\Delta[CH_4]}{a \cdot \Delta[CH_4] + b} \quad (25)$$

Les valeurs des amplitudes de débit ΔQ ont été calculées en utilisant les valeurs (24) et l'équation (25). Le graphe de relation entre ΔQ calculés et mesurés *in situ* et $\Delta[CH_4]$ a été tracé (Figure 75). Les valeurs d'amplitude du débit ΔQ calculées suivent bien la tendance de celles mesurées.

⇒ En conséquence on peut estimer que, par exemple, pour augmenter la concentration en méthane de 3% v/v il faudrait diminuer le débit du biogaz de 125 Nm³/h.

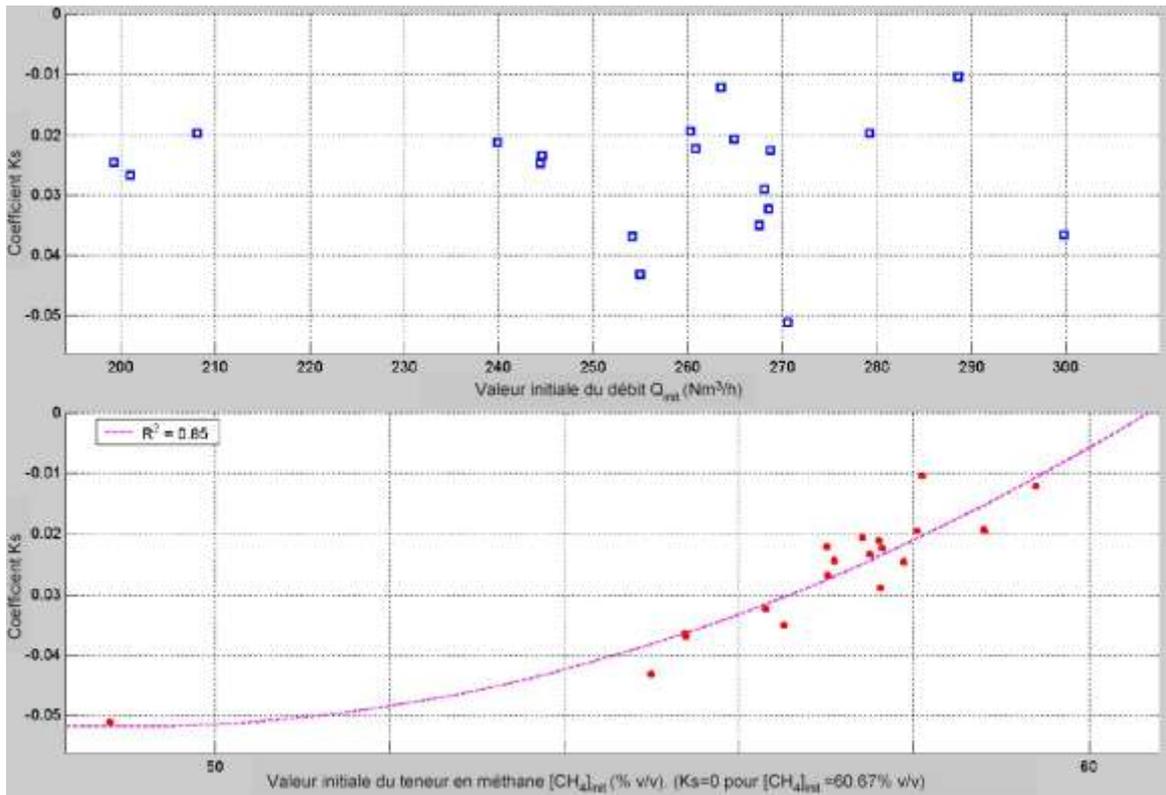


Fig. 73. Graphe des relations entre les coefficients K_S et les valeurs initiales du débit Q_{init} et de la concentration du méthane $[CH_4]_{init}$

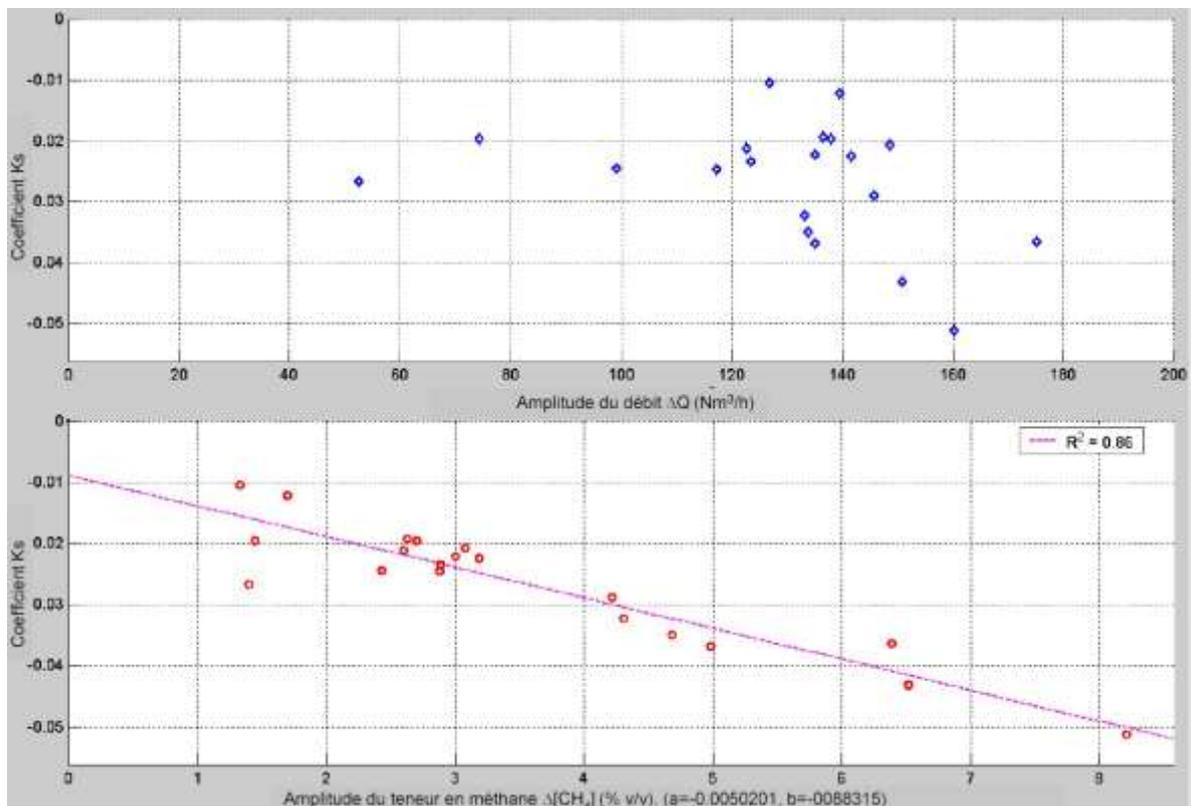


Fig. 74. Graphe des relations entre les coefficients K_S et les amplitudes du débit ΔQ et de la concentration du méthane $\Delta [CH_4]$

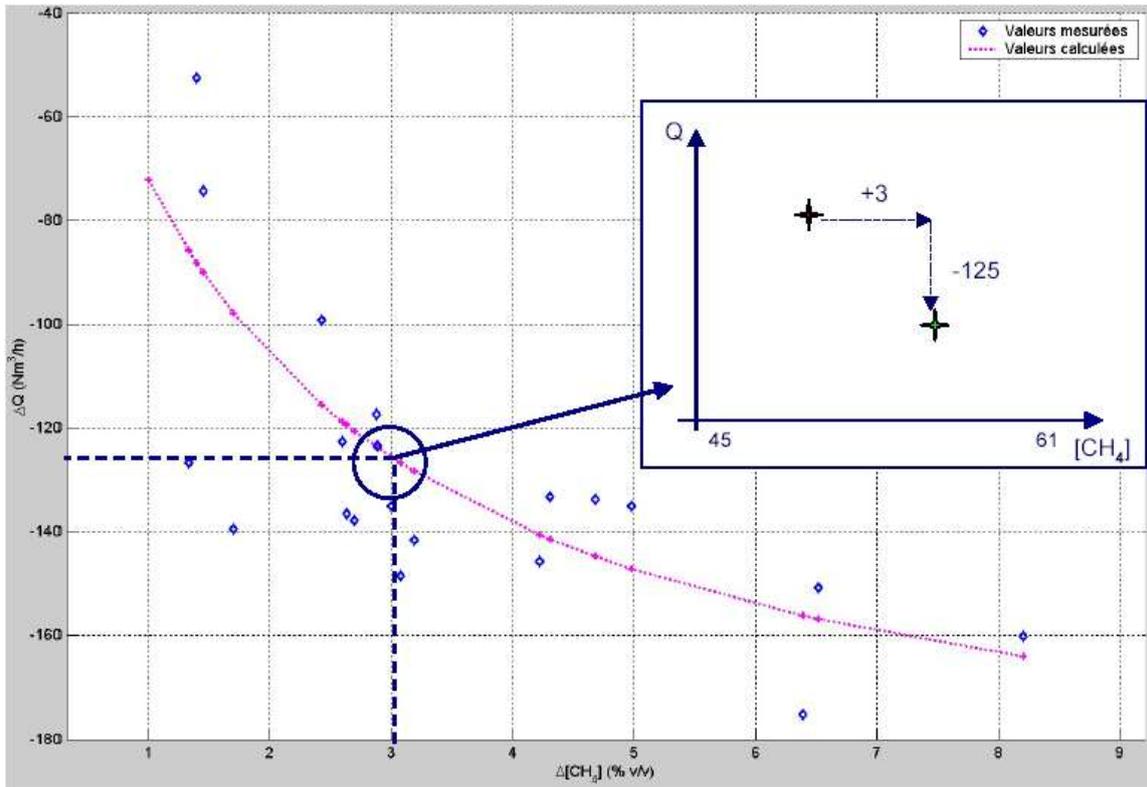


Fig. 75. Graphe de relation entre ΔQ calculés et mesurés *in situ* et $\Delta[CH_4]$

3.3. Étude des corrélations à moyen terme (mois, année)

Grâce à une méthode factorielle – analyse en composantes principales (ACP) des corrélations entre les paramètres étudiés, à Borde-Matin et à Barycz ont été calculées et visualisées. Cela nous a permis de détecter des relations à moyen terme (mois, année) entre les paramètres étudiés (météorologiques et d'exploitation).

Au CDS Borde-Matin les paramètres suivants (valeurs moyennes journalières) ont été étudiés:

- PCI_{dispo} (MW) – puissance calorifique inférieure ;
- teneurs en méthane, dioxyde de carbone et oxygène (% v/v) pour chaque réseau R1, R2, R3 ;
- dépression (mbar) pour chaque réseau R1, R2, R3 ;
- débit du biogaz (Nm^3/h) pour chaque réseau R1, R2, R3 ;
- les rapports CH_4/CO_2 pour chaque réseau R1, R2, R3 ;
- paramètres météorologiques (précipitation, température, température max – température min., humidité, pression).

Les données de janvier 2001 à décembre 2004 ont été analysées, en préparant des fichiers annuels. Les résultats des calculs de corrélations pour les années étudiées, sous la forme de la matrice des corrélations, sont présentés en *Annexe 8*.

Les résultats de l'étude des corrélations à moyen terme ne sont pas réellement probants. Ainsi, aucune corrélation significative (coefficients $> 0,70$) n'a été trouvée pour les données de 2001. Cette année-là on observe souvent des variations de PCI_{dispo} significatives (± 5 MW), liées aux nombreux travaux sur les réseaux et les problèmes liés au démarrage de la station de la valorisation du biogaz. Cela a pu perturber les corrélations existantes entre les paramètres étudiés. En conséquence, un fichier avec toutes les données (de 2002 à 2004) a été préparé et les corrélations entre les paramètres étudiés ont été analysées. Les résultats de ces calculs, sous la forme de la matrice des corrélations, sont présentés en *Annexe 9*.

Les corrélations entre PCI_{dispo} et paramètres météorologiques pour quatre saisons de l'année (printemps, été, automne et hiver), pour les données de 2002, 2003 et 2004, ainsi que pour toutes les données (de 2002 à 2004) ont été également calculées. Résultats des calculs sont présentés en *Annexe 10*.

Les valeurs moyennes de PCI_{dispo} et des paramètres météorologiques pour quatre saisons de l'année, pour les données de 2002, 2003 et 2004, ainsi que pour les données de 2002 à 2004 ont été calculées (*Annexe 11*).

La valeur de PCI_{dispo} semble dépendre essentiellement du débit et de la dépression (Figure 76A). Les corrélations calculées pour la PCI_{dispo} et le débit de chaque réseau montrent que la majorité du biogaz provient de R1 et R2. Cela peut être expliqué par le fait que ces réseaux sont beaucoup plus vastes que le réseau R3. On n'observe pas de corrélation entre PCI_{dispo} et teneur en méthane puisque cette dernière est régulée.

Aucune corrélation franche à moyen terme entre PCI_{dispo} et les paramètres météorologiques n'a pu être mise en avant. Cela n'est pas surprenant pour nous du fait que, d'une part, la météo influence la production du biogaz à court terme (heures ou jours) et, d'autre part, les corrélations calculées sur une année entière comprennent les influences de plusieurs facteurs. Il faudrait donc choisir une période où l'on observe l'influence dominante d'un paramètre, ce qui a été fait dans le chapitre précédant par une identification d'un modèle comportemental traduisant la dynamique des changements de PCI_{dispo} en fonction d'un paramètre météorologique choisi.

Cependant, il est intéressant d'analyser les résultats obtenus pour les relations entre la température et la PCI_{dispo} . Dans ce cas il s'agit d'un rapport inverse (Figure 76B). On observe la plus forte corrélation pour le printemps (surtout en 2002 : -0,82 et 2004 : -0,86) qui est en général une saison ensoleillée avec des températures et précipitations modérées. Cette corrélation est beaucoup moins remarquable en hiver – saison généralement plus humide et plus froide. Ceci peut s'expliquer par le phénomène évoqué en § 3.1.3., à savoir la formation et disparition quotidienne des obstructions (condensats, glace), en fonction de la température et de l'ensoleillement.

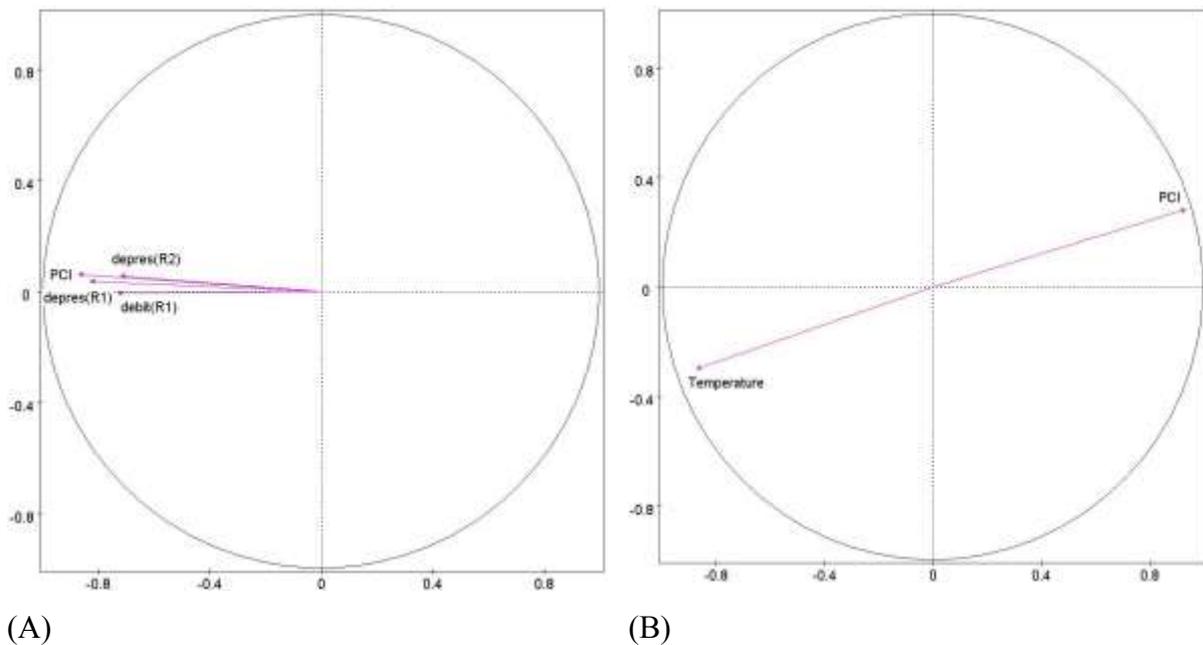


Fig. 76. Exemples de corrélations trouvées pour les données de Borde-Matin : (A) PCI_{dispo} et débit, dépression (calcul pour toutes les données : de 2002 à 2004), (B) PCI_{dispo} et température (printemps 2004)

Au CDS Barycz on a étudié les paramètres suivants :

- PCI_{dispo} (kW) – puissance calorifique inférieure ;
- teneurs en méthane (% v/v) ;
- débit du biogaz (Nm^3/h) ;
- paramètres météorologiques (précipitation, température, humidité, pression).

En raison des nombreux problèmes de stabilité des mesures automatiques (par exemple les sauts significatifs et inexplicables du débit), on a choisi les données les plus « stables » pour l'analyse des corrélations, à savoir de mars à juin 2003. Les résultats, sous la forme de la matrice des corrélations, sont présentés en *Annexe 12*.

La valeur du coefficient de corrélation élevée pour la PCI_{dispo} et le débit (0,97) n'est pas surprenante du fait que la PCI_{dispo} est calculée sur la base de débit (l'équation 19). On n'a pas trouvé de corrélation franche entre PCI_{dispo} et les paramètres météorologiques, cependant on remarque une certaine tendance de proportionnalité inverse entre la teneur en méthane et la température (coefficient de corrélation de $-0,68$). Les résultats, sous la forme du cercle des corrélations, sont présentés sur la Figure 77.

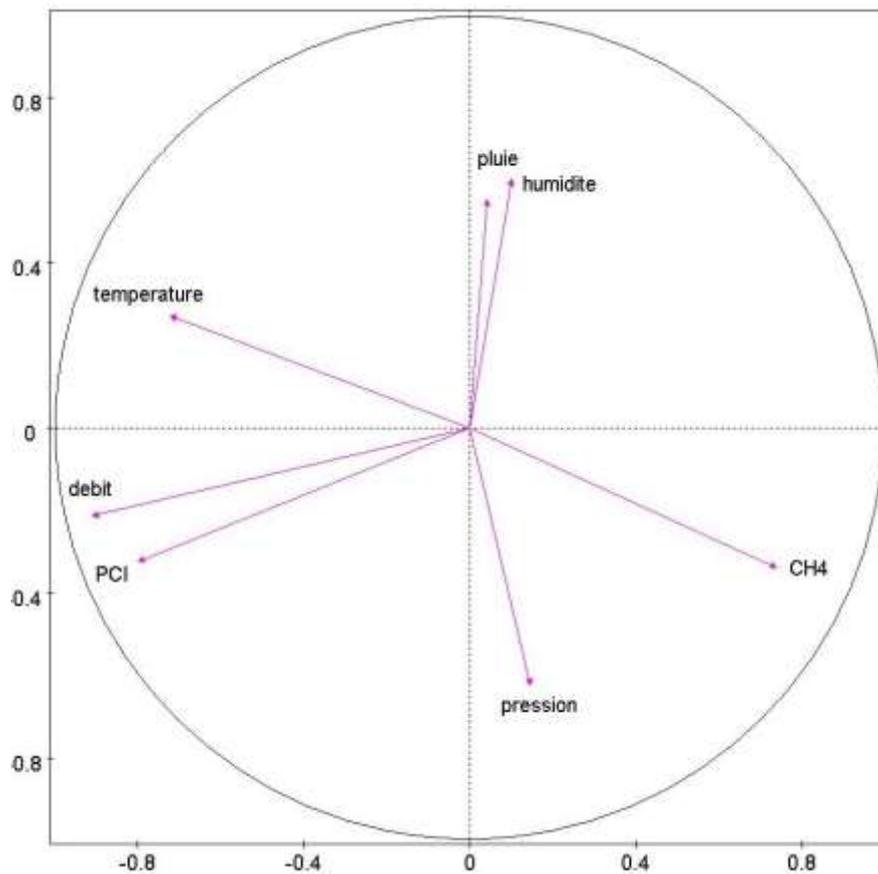


Fig. 77. Corrélations trouvées pour les données de Barycz (période : mars – juin 2003)

⇒ L'ACP peut être un outil efficace de mise en évidence des corrélations. Nous l'avons donc utilisé pour tenter de mettre en évidence les corrélations à moyen terme entre les paramètres caractéristiques influant la valorisation du biogaz. Nous constatons que, en ce qui concerne les applications analysées dans ce travail, l'ACP n'a permis de mettre en évidence que quelques couples de corrélations, *a priori* intuitives, comme par exemple :

- ♦ débit \rightarrow PCI_{dispo}
- ♦ dépression \rightarrow PCI_{dispo}
- ♦ température \rightarrow $- PCI_{dispo}$
- ♦ température \rightarrow $-$ teneur en CH_4

3.4. Modèles globaux (années)

Les contraintes économiques, par exemple l'amortissement le plus rapide possible de l'investissement en équipement de la valorisation et le retour économique, exigent une connaissance la plus précise possible de la ressource du biogaz, d'où l'utilité des modèles d'estimation de la production du biogaz.

3.4.1. Modèle LANDGEM

Le travail a été démarré sur les modèles globaux de la production du biogaz en utilisant un logiciel EPA (U.S. Environmental Protection Agency – LANDGEM - Landfill Gas Emission Model [LANDGEM 2002]), qui permet de prévoir la production des composants du biogaz (méthane, dioxyde de carbone, ...) dans les temps sur le CDS.

La production du méthane au CDS Borde-Matin et à la partie II de Barycz (Barycz II) a été estimée en trois étapes :

1. Avec les paramètres par défaut CAA (Clean Air Act) :
 $k= 0,05 \text{ an}^{-1}$, $L_0= 170 \text{ m}^3/\text{Mg}$
2. Avec les paramètres par défaut NSPS (New Source Performance Standards : AP-42) :
 $k= 0,04 \text{ an}^{-1}$, $L_0= 100 \text{ m}^3/\text{Mg}$
3. Avec les paramètres spécifiques pour Borde-Matin (présentés en *Annexe 13*) et Barycz II (présentés en *Annexe 14*), déterminés après discussion avec les représentants de deux CDS.

Les résultats de ces analyses sont présentés sur les Figures 78 et 79.

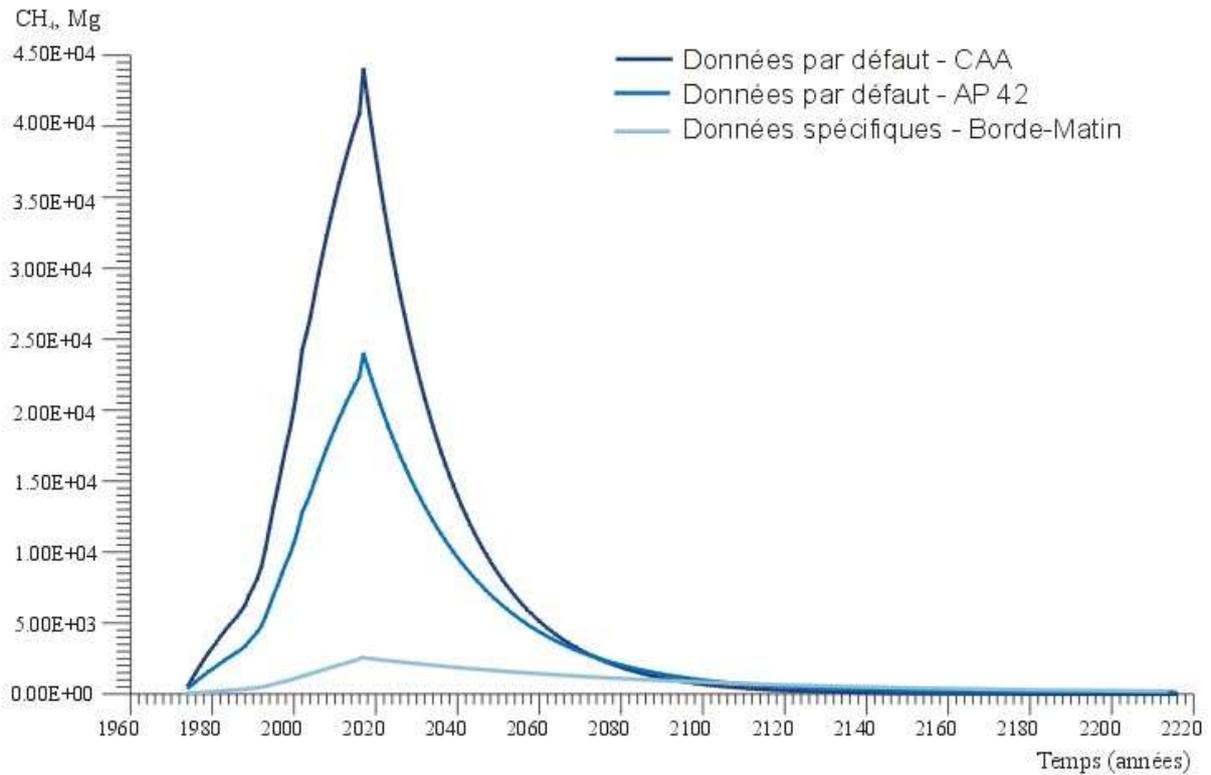


Fig. 78. Estimations de la quantité du méthane produit à Borde-Matin – résultats du logiciel LANDGEM

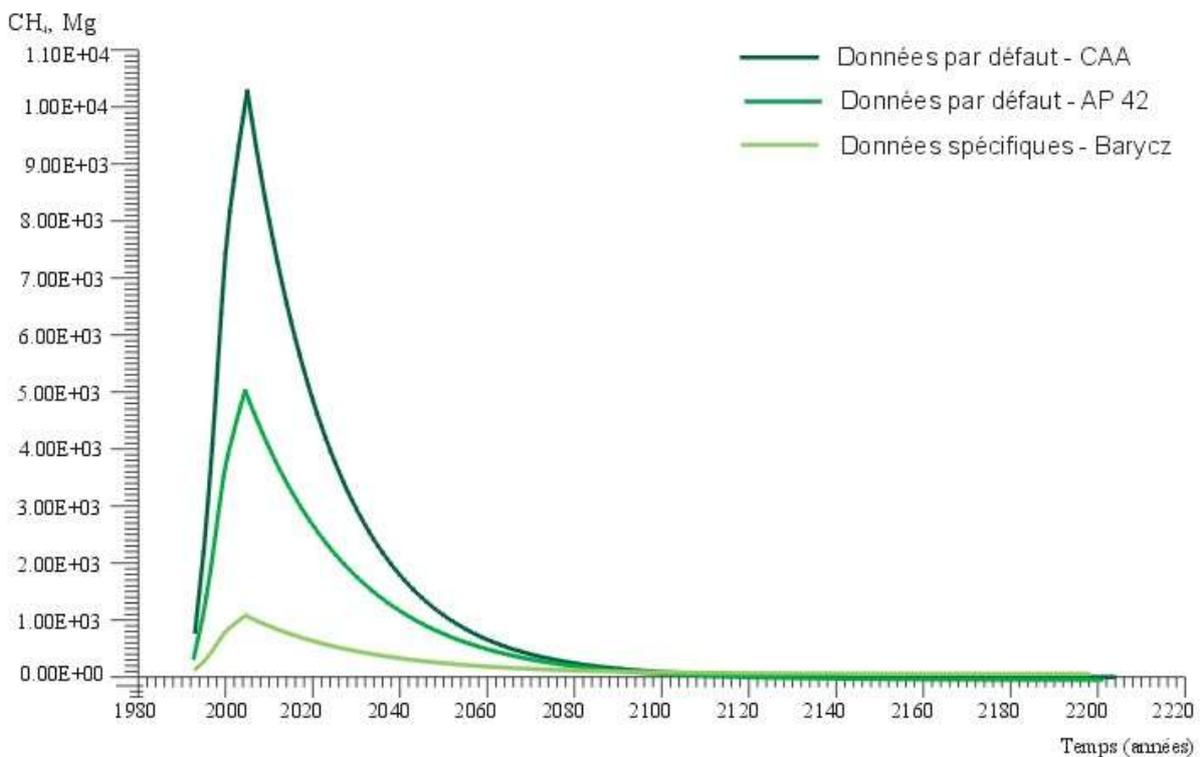


Fig. 79. Estimation de la quantité du méthane produit à Barycz – résultats du logiciel LANDGEM

On remarque, qu'en utilisant les paramètres par défaut on estime la quantité de méthane produit beaucoup plus élevée que pour les paramètres spécifiques ; les écarts pouvant être même d'un ordre de grandeur. En plus, on ne connaît pas précisément les valeurs de capacité potentielle de génération du méthane (L_0 , m^3/Mg) pour les deux décharges étudiées, qui sont indispensables pour pouvoir estimer le taux de génération du méthane k (an^{-1}) avec le logiciel LANDGEM. L'algorithme qui est utilisé pour calculer ce paramètre n'est pas expliqué non plus.

⇒ En conséquence, il a été décidé de développer des fonctionnalités (code – *Annexe 15*) qui nous permettront de déterminer les valeurs k et L_0 sur la base de données spécifiques de deux Centres de Stockage étudiés pour pouvoir estimer la production du biogaz et son évolution dans le temps les plus proches possible de la réalité.

3.4.2. Modèle « EPA-modifié »

Des fonctionnalités dédiées ont été développées, à la base de modèle EPA (équation 18), pour estimer la quantité de biogaz produit et son évolution dans le temps sur les deux CDS. Pour déterminer les valeurs respectives de taux de génération du méthane k (an^{-1}) et de capacité potentielle de génération du méthane L_0 (m^3/Mg) on a utilisé les données spécifiques pour Borde-Matin et Barycz II, telles que la durée d'ouverture et la capacité de CDS, le tonnage de déchets stockés chaque année, les teneurs en méthane et quelques données *in situ* de la quantité du biogaz produit. Pour le CDS Borde-Matin le tonnage de déchets stockés après l'année 2004 a été fixé à 450 000 Mg/an, la valeur un peu plus basse que celle autorisée (500 000 Mg/an). Toutes les valeurs utilisées pour des estimations sont présentées en *Annexe 16*. Les graphes d'estimation de la production du biogaz ont été tracés sur la base des valeurs k et L_0 identifiées. La consommation du biogaz par moteur, la quantité de déchets stockés, l'année de la fermeture de CDS et les valeurs mesurées *in situ* de la production du biogaz ont été aussi visualisées. Les résultats pour Borde-Matin et Barycz II sont présentés sur les Figures 80 et 81. Les valeurs de taux de génération du méthane k (an^{-1}) et de capacité potentielle de génération du méthane L_0 (m^3/Mg) déterminées pour les deux CDS en comparaison avec les données de la littérature sont présentées dans le Tableau 19.

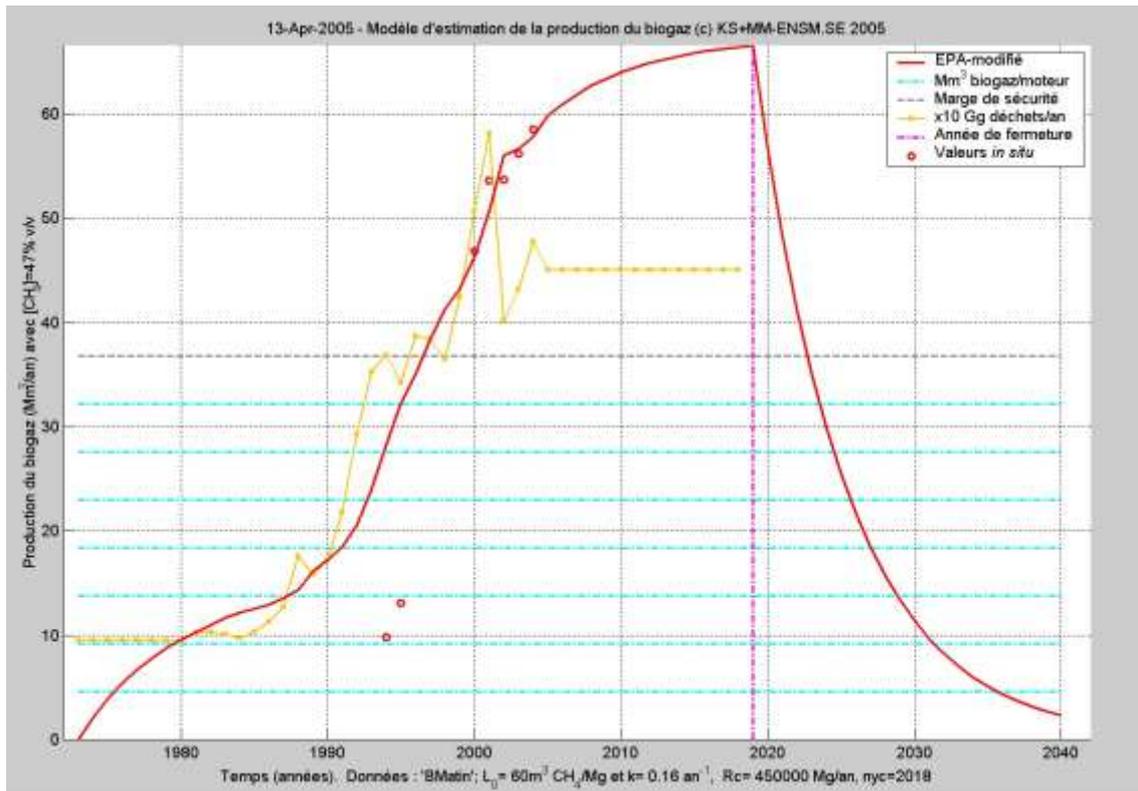


Fig. 80. Estimation de la production du biogaz et de son évolution dans le temps pour le CDS Borde-Matin (année de fermeture : 2018)

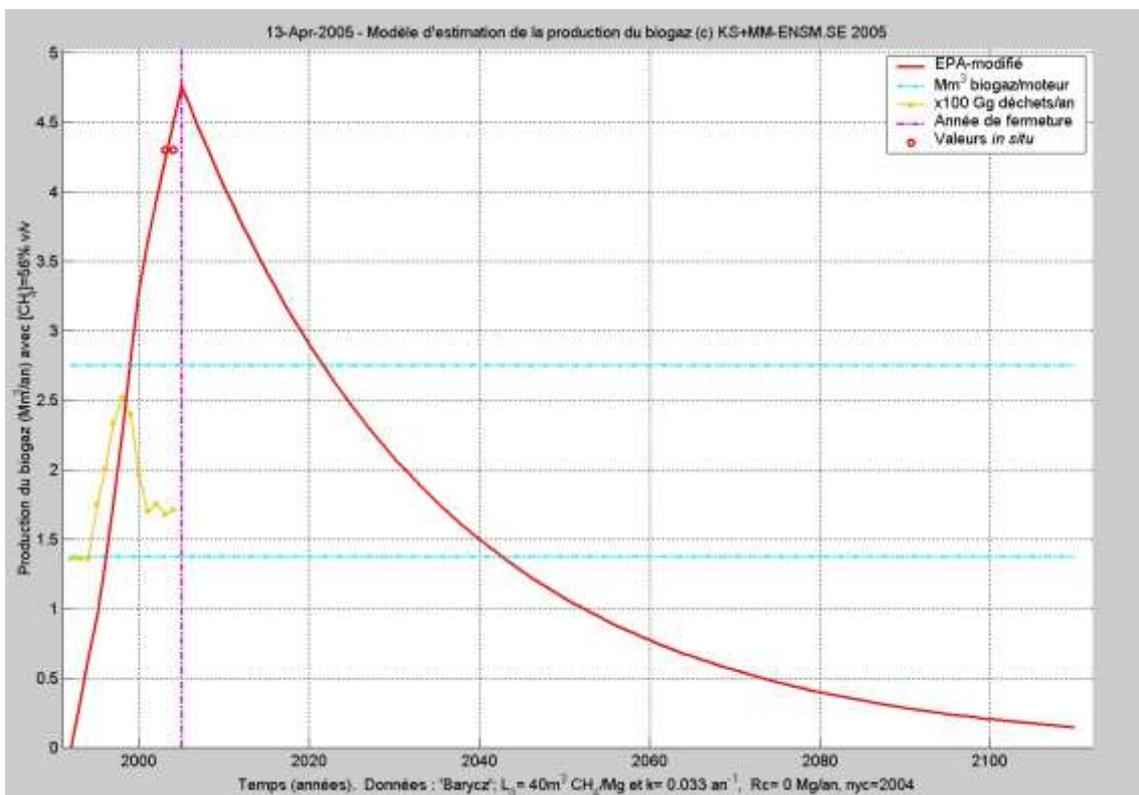


Fig. 81. Estimation de la production du biogaz et de son évolution dans le temps pour la partie II de CDS Barycz (année de fermeture : 2004).

Tableau 19. Valeurs k et L_0 pour Borde-Matin, Barycz II et la littérature [Christensen 1996]

	k, an^{-1}	$L_0 (\text{CH}_4), \text{m}^3/\text{Mg}$	$L_0 (\text{biogaz}), \text{m}^3/\text{Mg}$
Borde-Matin	0,16	60	128
Barycz	0,033	40	71
[Christensen 1996]	0,03 – 1,8		20 – 500

L'estimation de la quantité de biogaz produit et son évolution dans le temps pour Barycz II (Figure 81) montre, entre autres, que tous les moteurs pourraient fonctionner jusqu'à 2020, donc 16 ans après la fermeture de la deuxième partie de décharge. La génération du biogaz durerait jusqu'en 2100, ce qui obligerait de surveiller cette décharge pendant plusieurs dizaines d'années. Cependant, la production du biogaz sur le CDS Borde-Matin diminuerait beaucoup plus vite (Figure 80). La station de la valorisation du biogaz pourrait utiliser sa puissance maximale jusqu'à 2023 (en prenant en compte le marge de sécurité pour les variations diurnes de $\text{PCI}_{\text{dispo}}$), donc seulement 5 ans après la fermeture de la décharge. La production du biogaz à Borde-Matin durerait jusqu'à 2040, donc le temps de la surveillance nécessaire serait plus court que pour Barycz (seulement 20 ans après la fermeture de CDS). On remarque deux mesures *in situ* de la quantité de biogaz produit qui ne sont pas placées sur la courbe d'estimation. Ce sont les données de 1994 et 1995, où il n'y avait pas encore la station de la valorisation du biogaz (tout le biogaz était brûlé dans des torchères), donc ces valeurs peuvent être sous-estimées.

Ensuite une diminution de la quantité de déchets stockés à Borde-Matin à partir de 2005 a été simulée pour vérifier s'il y avait la possibilité de prolonger le fonctionnement de la station de la valorisation du biogaz. Les résultats de cette estimation sont présentés sur la Figure 82. On note que tous les moteurs pourraient fonctionner jusqu'à l'année de la fermeture de CDS (saturation en masse de déchets), y compris la marge de sécurité au niveau du $\text{PCI}_{\text{dispo}}$; dans ce cas jusqu'à 2031. La production du biogaz durerait, comme dans le cas précédent, 20 ans après la fermeture de CDS.

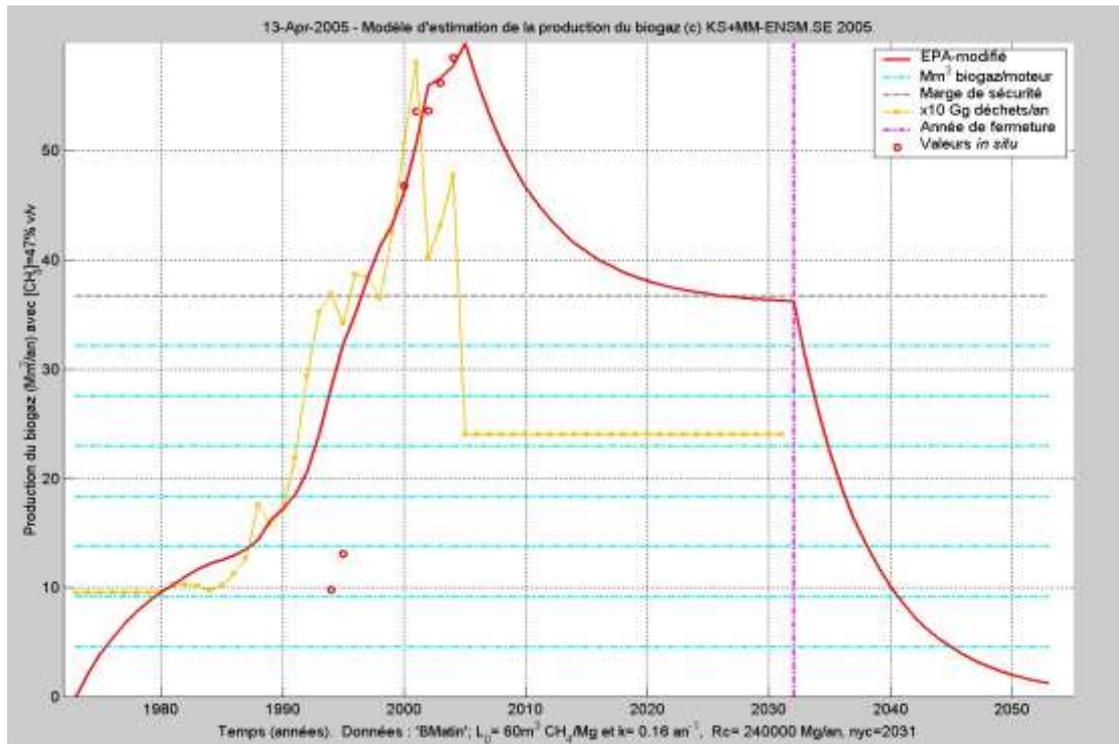


Fig. 82. Estimation de la production du biogaz et de son évolution dans le temps pour le CDS Borde-Matin avec diminution de la quantité de déchets stockés à partir de 2005 à 240 000 Mg/an.

3.4.3. Validation de modèle « EPA-modifié »

La fonctionnalité du modèle « EPA-modifié » a été vérifiée en estimant la quantité de biogaz prévue pour une décharge à Nontaburi (Thaïlande). Ensuite, les estimations ont été comparées avec celles obtenues par Obayashi Corporation [Obayashi 2004]. Il s'agissait d'estimer la quantité de biogaz généré par une décharge composée de trois parties : A, B et C, qui seraient exploitées successivement pendant des laps de temps assez courts (quelques années). Cette hypothèse a permis de simuler également l'évolution du biogaz selon le modèle SWANA (équation 17) qui suppose que tous les déchets sont stockés d'un seul coup, l'année de la fermeture de décharge. Les paramètres utilisés pour l'estimation sont présentés dans le Tableau 20 et les résultats sur les Figures 83-85.

⇒ On observe que les courbes de notre modèle suivent très bien les courbes d'Obayashi. Il y a seulement une différence de la quantité du biogaz produit – notre modèle donne les valeurs un peu plus élevées : de 4% pour la partie B, de 18% pour la partie C et de 16% pour la partie A. On remarque par ailleurs que l'estimation de SWANA ne coïncide pas bien avec les résultats initiaux ; elle devient un peu plus précise pour les estimations plus tardives (au bout de quelques années).

Tableau 20. Paramètres utilisés pour l'estimation de la production du biogaz au CDS à Nontaburi [Obayashi 2004].

Paramètres	CDS – B (1)	CDS – C (2)	CDS – A (3)
Début de stockage	2004	2006	2007
Fin de stockage	2006	2007	2010
Tonnage de déchets stockés, Mg	500 871	355 432	933 300
k , an^{-1}	0,15		
L_0 (CH_4), m^3/Mg	49,1		
Teneur en méthane, % v/v	50		

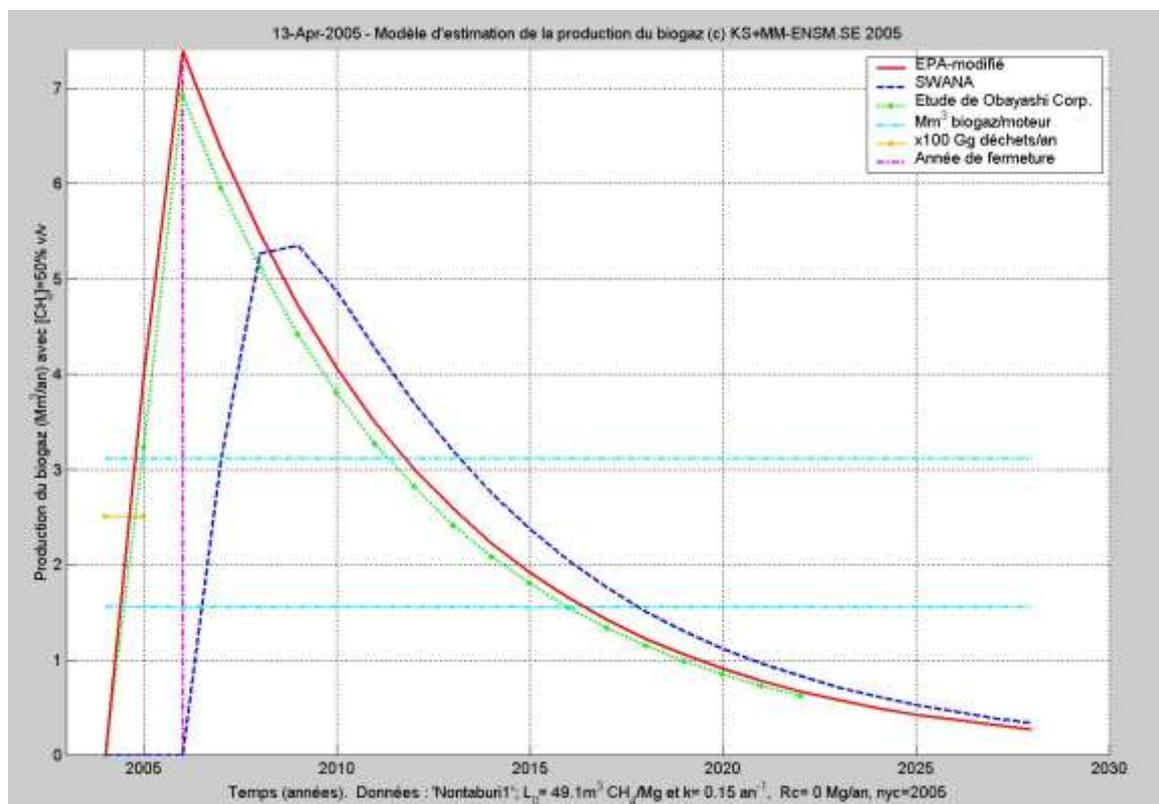


Fig.83. Estimations de la production du biogaz sur le CDS-B à Nontaburi

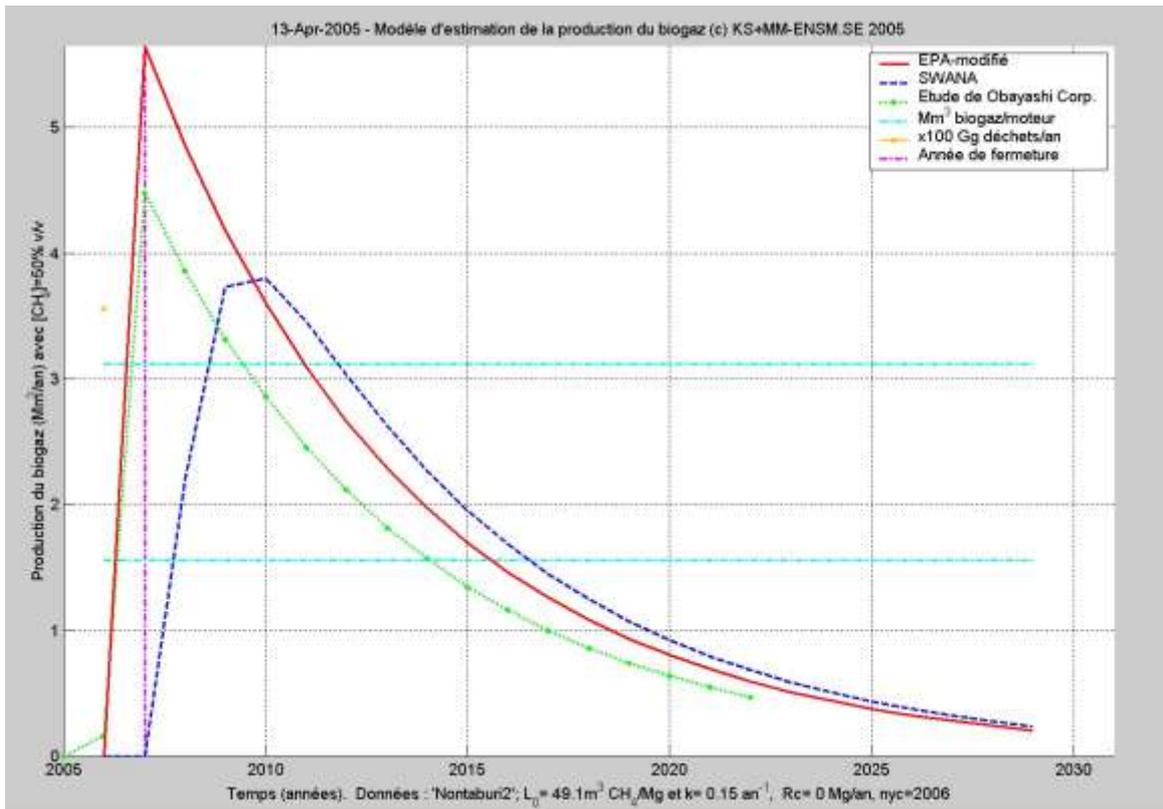


Fig. 84. Estimations de la production du biogaz sur le CDS-C à Nontaburi

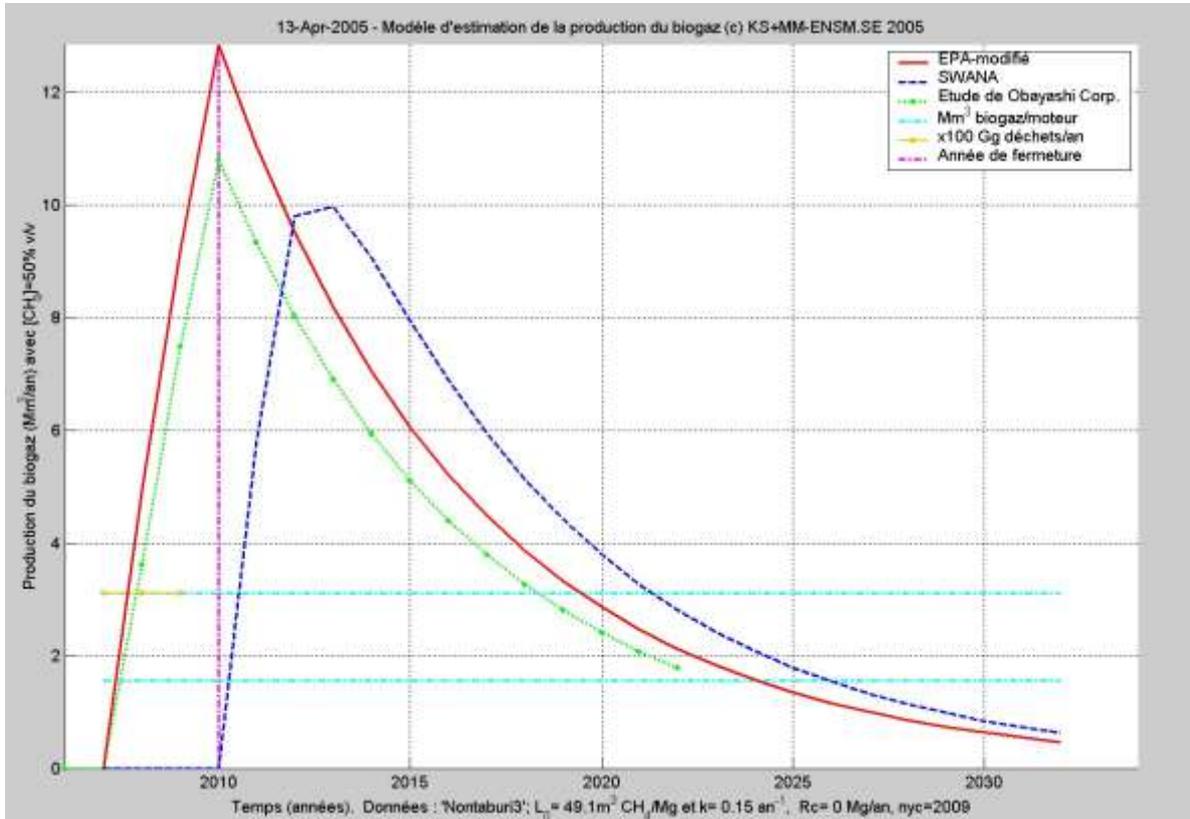


Fig. 85. Estimations de la production du biogaz sur le CDS-A à Nontaburi

3.5. Récapitulatif des modèles

La synthèse des modèles et leur imbrication sont illustrées sur la Figure 86. Ils présentent une réelle complémentarité, en particulier par les échelles de temps concernées par leurs estimations respectives.

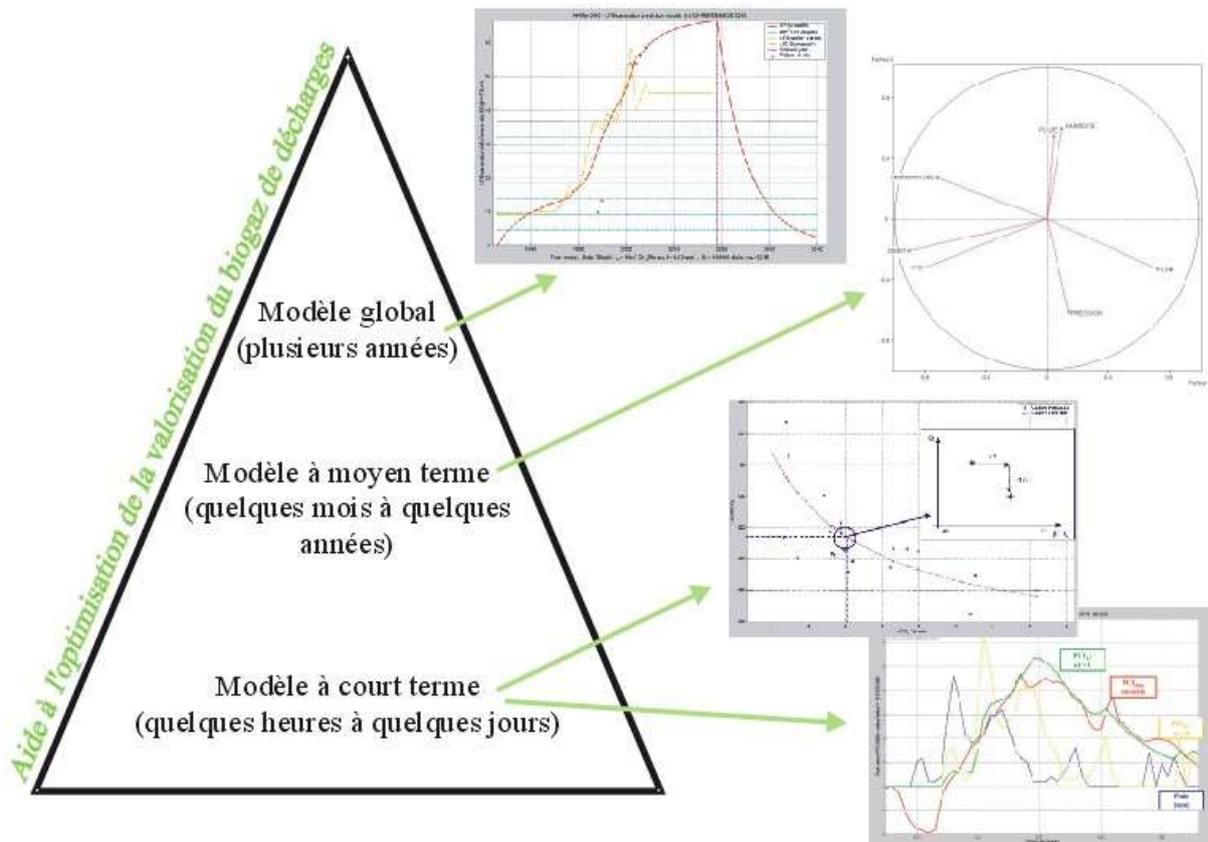


Fig. 86. Illustration synthétique des modèles étudiés.

L'étude critique des relations à court terme entre la pluie et la PCI_{dispo} a permis de confirmer l'importance de l'influence des précipitations à Borde-Matin. On a réussi à quantifier cette relation en identifiant trois groupes de comportements : réaction plus rapide, plus lente et très lente, ainsi qu'un modèle plus général, estimé sur un ensemble d'évènements pluvieux. Cependant, le nombre de cas analysés est encore faible (11 pluies) pour préciser complètement cette relation et l'existence des trois groupes. Il faut souligner que les évènements pluvieux analysés ont été choisis dans la période de quatre années. Il serait donc nécessaire de continuer les recherches pendant plusieurs années pour pouvoir valider statistiquement les modèles trouvés. Afin de confirmer ces résultats on envisage la possibilité

de « raviver » la ressource du biogaz par injection d'humidité grâce aux expériences sur le terrain – percolations et/ou arrosages ciblés sur la masse des déchets.

Grâce à l'étude critique des relations à court terme entre le débit du biogaz et la teneur en méthane à Barycz, cette dernière pourrait être régulée plus vite et plus précisément, ce qui aiderait le gestionnaire du site à assurer les conditions de valorisation optimales.

L'étude des relations à moyen terme a précisé quelques relations entre les paramètres d'exploitation et la PCI_{dispo} , et signalé une tendance d'influence de la température. Le manque des résultats plus complets dans ce cas peut être expliqué par le fait que les données « brutes » ont été analysées annuellement et les corrélations ont été calculées pour certains paramètres choisis, alors que sur une telle durée il y a plusieurs facteurs influençant la production du biogaz en même temps. De plus, la météo influence la production du biogaz essentiellement à court terme (heures, jours).

On s'est également penché sur les outils d'estimation globale de la production du biogaz et de son évolution à long terme (plusieurs années) en fonction de l'apport annuel de la masse des déchets. Ceci pourrait aider à planifier l'exploitation des stations de la valorisation et la surveillance des ces décharges. Les modèles globaux ont été largement évoqués dans la littérature [Vavilin 1994, El-Fadel, 1996, Pohland 1994, etc.]. Sur la base de ces références, dans le cadre de ce projet un modèle « EPA-modifié » a été implanté. Il a permis d'estimer les ordres de grandeurs de la production du biogaz au cours des années à venir dans des configurations différentes, par exemple :

- ♦ sur Barycz II : après la fermeture récente de cette partie du CDS,
- ♦ sur Borde-Matin : en supposant la quantité de déchets admis constante,
- ♦ sur Borde-Matin : en simulant une quantité de déchets « minimale » ; de façon à garantir une production de biogaz suffisante (avec marge de sécurité) pour la valorisation tout en prolongeant la vie du CDS.

4. CONCLUSION - PERSPECTIVES



L'ensemble du travail a concerné une étude à trois niveaux (à court, moyen terme et global) de la dynamique des processus de la production et du comportement du biogaz sur des Centres de Stockage (CDS) des déchets ménagers en fonction de différents paramètres extérieurs (météorologiques, d'exploitation).

Ce travail résulte de la collaboration entre le Centre SITE de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France et la Faculté de Chimie de l'Université Jagiellone à Cracovie, Pologne (thèse en cotutelle), ainsi qu'avec deux partenaires industriels : sociétés Satrod et Elyo qui gèrent le CDS et la valorisation du biogaz à Borde-Matin, et Miejskie Przedsiębiorstwo Oczyszczania à Cracovie (l'Entreprise Municipale d'Assainissement) qui gère le CDS Barycz.

L'étude bibliographique nous a montré la complexité de la problématique des Centres de Stockage et du processus de la production du biogaz, ainsi que les risques induits par sa présence dans les CDS. Les différences et les similitudes entre les sites retenus (caractéristiques des CDS, climats) ont été également signalées. On observe une différence significative entre la quantité d'énergie électrique produite à Borde-Matin et à Barycz (respectivement 52 GWh/an et 2 GWh/an), liée aux quantités de PCI_{dispo} disponibles à la valorisation. Cela peut être expliqué par une quantité de déchets stockés plus faible et le dégazage moins intensif à Barycz (~2 puits/ha contre ~4 puits/ha à Borde-Matin), ainsi que par les différences entre les paramètres climatiques (pressions atmosphériques, précipitations, températures moyennes). Ainsi, un climat plus chaud avec des précipitations plus importantes dans la région de Borde-Matin semble encourager la production du biogaz dans la masse des déchets, cependant les hivers très longs en Pologne paraissent avoir l'influence contraire.

Dès les analyses visuelles préliminaires des données, on a pu constater que le fait d'étudier les Centres de Stockage en fonctionnement implique les influences importantes et fréquentes des paramètres d'exploitation et des interventions de l'homme sur la PCI_{dispo} et sur les concentrations en méthane et en dioxyde de carbone dans le biogaz. Cela induit la nécessité de les prendre en compte et/ou de les isoler avant d'analyser l'influence de paramètres ciblés.

Au cours de l'analyse visuelle des données issues de deux CDS les mêmes types d'influences ont été trouvés, par exemple des paramètres météorologiques (le temps sec, ensoleillé et chaud ; les précipitations, la température basse) sur la PCI_{dispo} . L'influence la plus

marquée semble être celle des précipitations longues (>12h), impliquant des changements de PCI_{dispo} les plus rapides et les plus significatifs.

Les mesures *in situ* effectuées sur les réseaux de dégazage de deux parties de CDS Barycz (reclivée et en exploitation) ont permis de constater une plus grande influence des paramètres météorologiques et d'exploitation sur la composition du biogaz issu de la partie reclivée. Cela peut être expliqué par le déclin de la matière organique dans la masse de déchets stockés (donc manque de substances nutritives pour les microorganismes) sur cette partie, ce qui est confirmé par une baisse de la teneur en méthane dans le biogaz observée depuis octobre 2002. On observe l'influence des paramètres météorologiques (par exemple la pression atmosphérique) seulement sur la concentration en méthane dans le biogaz (et non sur la concentration en dioxyde de carbone), ce qui peut être expliqué par le fait que le méthane est plus léger et plus volatil.

Différents types de modèles ont été proposés, selon l'horizon de temps concerné. Les modèles à court terme expriment des influences de cause à effet sur plusieurs heures à plusieurs jours (par exemple : pluie \rightarrow PCI_{dispo} , débit \rightarrow CH_4), ceux à moyen terme concernent des relations sur quelques mois à quelques années et enfin les modèles dits « globaux » ont pour objectif de permettre d'estimer la quantité de biogaz produit à long terme, sur plusieurs années. Ainsi, les modèles à court terme peuvent avoir un intérêt dans la gestion « au jour le jour » alors que les modèles « globaux » peuvent constituer un outil d'aide à la décision dans la gestion des sites sur un horizon de plusieurs années.

Les outils d'aide à la gestion du biogaz de CDS peuvent avoir des retombées économiques non négligeables ; à titre d'illustration, en partant sur un tarif de rachat d'électricité générée de l'ordre de 4,5 c€/kWh [Dossier 2003], la quantité d'énergie électrique valorisée annuellement à Borde-Matin est de l'ordre de 52 GWh soit ~2,34 M€, et à Barycz : 2GWh soit ~90 k€.

Au cours de ce travail de thèse on s'est penché sur des approches d'aide à l'optimisation de la valorisation du biogaz à différents niveaux ; à court, moyen et long terme. Les résultats théoriques ont systématiquement été confrontés aux données (mesures, informations, expériences, ...) de terrain. Plusieurs relations dynamiques ont ainsi pu être identifiées.

Il reste cependant à les valider et approfondir statistiquement (i.e. sur plusieurs cas, mis en évidence sur des durées importantes) et expérimentalement (expériences *in situ* ciblées).

BIBLIOGRAPHIE

.....

ADEME, *Maîtriser les coûts et la gestion. Synthèse de l'étude 1998 [en ligne]*, Disponible sur : http://www.ademe.fr/collectivites/Dechets-new/Maitrise_couts/Connaissance/couts/Rubrique/cou00.htm (consulté 27.01.04)

ADEME, *Le biogaz et sa valorisation. Guide méthodologique.*, ADEME-GDF, Paris, 1999, 63 p.

ADEME, *Gérer le gaz de décharge. Techniques et recommandations, Guides et cahiers techniques*, ADEME, Angers, 2001, 148 p.

ADEME (a), *Enquête sur les installations de traitement des déchets ménagers et assimilés en 2002. La mise en Centre de Stockage*, ITOM, 2002, 33 p.

ADEME (b), *Enquête sur les installations de traitements des déchets ménagers et assimilés en 2002. Bilan général*, ITOM, 2002, 52 p.

ADEME (c), *Dix ans de politique déchets : premier bilan, Dossier de la Lettre ADEME*, 2002, n° 20, pp. 1-8.

ALLEN M.R., BRAITHWAITE A., HILLS C.C., Analysis of the trace volatile organic compounds in landfill gas using automated thermal desorption gas chromatography-mass spectrometry, *International Journal Environmental Analytical Chemistry*, 1996, vol. 62, pp. 43-52.

ALLEN M.R., BRAITHWAITE A., HILLS C.C., Trace organic compounds in landfill gas at seven U.K. waste disposal sites, *Environmental Sciences Technology*, 1997, vol. 31, n° 4, pp. 1054-1061.

ANALYSER - Operating Manual *Infra-Red Landfill Gas Analyser (Model GA 94)*, Geotechnical Instruments (UK) Ltd., Sovereign House, Queensway Leamington Spa, Warwickshire CV31 3JR, UK, 2001.

AP-42, *Emission factor documentation for AP-42 section 2.4. Municipal Solid Waste Landfills. Revised*, Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air and Radiation, U.S. Environmental Protection Agency, August 1997 [en ligne], Disponible sur : www.epa.gov (consulté 07.06.04)

APRILI P.G., BERGONZONI M., BUTTOL F. *et al.*, Life cycle assesment of a municipal solid waste landfill, **In**: *Seventh International Waste Management and Landfill Symposium: Proceedings Sardinia 99*, 4-8 October 1999, Cagliari, Italy, vol. IV, pp. 346-352.

BARLAZ M.A., HAM R.K., SCHAEFER D.M., Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics, *Critical Reviews in Environmental Control*, 1990, vol. 19, n° 6, pp. 557-584.

BARLAZ M., CAMOBRECO V., REPA E. *et al.*, Life-cycle inventory of a modern municipal solid waste landfill, **In**: *Seventh International Waste Management and Landfill Symposium: Proceedings Sardinia 99*, 4-8 October 1999, Cagliari, Italy, vol. IV, pp. 394-408.

BATES J., A strategy for reducing methane emissions. Air pollution in the XXI century : priority issues and policy, *Studies in Environmental Science*, 1998, vol. 72, pp. 245-264.

BEREZA M., LE CORRE O., TAZEROUT M., Valorisation du biogaz par moteur à allumage commandé. Une approche méthodologique du dimensionnement, *Déchets, Sciences et Techniques*, 1999, n° 13, pp. 24-28.

BERGIER T., Powstawanie i ujmowanie biogazu na wysypiskach odpadów komunalnych (Production et captage du biogaz sur des décharges de déchets ménagers), **In** : *Konferencja naukowo-techniczna: Odpady przemysłowe i komunalne. Powstawanie oraz możliwości ich wykorzystania (Conférence Scientifique-technique : Déchets industriels et ménagers. Production et possibilités de les utiliser)*, 15-16 kwietnia 1999, Kraków, Polska, pp.125-127.

BIELIŃSKA E., KASPRZYK J., LEGIERSKI T., MOŚCIŃSKI J., OGONOWSKI Z., *Laboratorium identyfikacji procesów (Laboratoire d'identification des processus)*, Politechnika Śląska, skrypty uczelniane nr 1232, Gliwice, 1986, 122 p.

BILLARD H., Centres de stockage des déchets – exploitation, *Techniques de l'ingénieur*, 2001, vol. G, n° G2102, pp. 1-22.

BINOS 100, *NDIR-gas-analysator* (Mode d'emploi Binos 100, NDIR-analiseur du méthane), Leybold AG Niemcy, 1989.

BOLTZE U., DE FREITAS M.H., Monitoring gas emissions from landfill sites, *Waste Management & Research*, 1997, vol. 15, pp. 463-476.

BOMAG, *Refuse compaction techniques [en ligne]*, Disponible sur : <http://www.bomag.com/france/> © 1997-2004 (consulté 31.10.04)

BROSSEAU J., HEITZ M., Trace gas compound emissions from municipal landfill sanitary sites, *Atmospheric Environment*, 1994, vol. 28, n° 2, pp. 285-293.

BRZÓZKA J., DOROBCZYŃSKI L., *Programowanie w MATLAB (Programmation avec Matlab)*, MIKOM, Warszawa, Polska, 1998, 312 p.

BUCKSCH S., EGEBÄCK K.-E., The Swedish program for investigations concerning biofuels, *The Science of the Total Environment*, 1999, n° 235, pp. 293-303.

CATERPILLAR, *Equipement – compacteurs [en ligne]*, Disponible sur : <http://www.cat.com/index.html> © 2004 (consulté 3.11.04)

CHAN G.Y.S., CHU L.M., WONG M.H., Effects of leachate recirculation on biogas production from landfill co-disposal of municipal solid waste, sewage sludge and marine sediment, *Environmental Pollution*, 2002, n° 118, pp. 393-399.

CHATFIELD C., *Problem solving. A statistician's guide*, Champan & Hall, UK, 1995, 325 p.

CHIRIAC R.E., *Les composés organiques volatils issus de décharges d'ordures ménagers*, thèse d'INSA de Lyon-ENSM.SE, 2001, 81 p.

CHRISTENSEN T.H., COSSU R., STEGMAN R., *Landfilling of waste: biogas*, E&FN SPON, London, 1996, 840 p.

CHRISTOPHERSEN M., KJELDTSEN P., HOLST H., *et al.*, Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation, *Waste Management and Research*, 2001, vol. 19, pp. 595-612.

CHWASTEK J., GRABOWSKI Z., Technologia i technika składowania odpadów komunalnych w Krakowie (Technologie et technique du stockage de déchets à Cracovie), **In**: *Konferencja Naukowo-Techniczna: Analiza gazów emitowanych przez składowiska odpadów (Conférence Scientifique-Technique : Analyse des gaz émis par des Centres de Stockage)*, 1995, Kraków, Polska.

CHWASTEK J., KULTYS H., MIKOŁAJCZYK J., Techniczne podstawy składowania odpadów na składowisku odpadów komunalnych Barycz w Krakowie (Bases techniques du stockage des déchets ménagers sur le CDS Barycz à Cracovie), **In**: *III Konferencja Naukowo-Techniczna: Odpady przemysłowe i komunalne, powstawanie oraz możliwości ich wykorzystania (Conférence Scientifique-technique : Déchets industriels et ménagers. Production et des possibilités de les utiliser)*, 15-16 kwiecień 1999, Kraków, Polska, pp. 63-70.

CIUPRYK M., GAJ K., Możliwości i korzyści utylizacji biogazu ze składowisk odpadów komunalnych (Possibilités et intérêts de la valorisation du biogaz de Centres de Stockage des déchets ménagers), *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 2004, vol. 38, n°1, pp. 28-32.

COOPS O., LUNING L., OONK H., *et al.*, Validation of landfill gas formation modelk, **In**: *Fifth International Landfill Symposium: Proceedings Sardinia 95, 2-6 October 1995*, Cagliari, Italy, pp. 635-646

CUE - CONSEIL de l'UNION EUROPEENNE, Directive du Conseil de l'Union européenne du 26 avril 1999, 19 p.

DEUTZ ENERGY, *Deutz – energy products [en ligne]*, Disponible sur: <http://www.deutzenergy.com/Products/index.html> (consulté 7.06.04)

DOSSIER : Biogaz, *Energie Plus*, 2001, Suppl., n° 268, pp. 1-16.

DOSSIER : Energies, *Energie Plus*, 2003, Suppl., n° 300, pp. 3-8.

EL-FADEL M., FINDIKAKIS A.N., LECKIE J.O., Numerical modelling of generation and transport of gas and heat in landfills I. Model formulation, *Waste Management & Research*, 1996, vol. 14, pp. 483-504.

ELYO, *Elyo – service à l'énergie [en ligne]*, Disponible sur : www.elyo.fr (consulté 24.01.04)

EPA, *U.S. methane emission 1999 – 2000 : inventories, projections, and opportunities for reductions.*, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, 1999, pp. (2-1)-(2-16).

EPA – EMISSION INVENTORY, *Landfills. Revised final*, vol. III, chapter 15, Emission inventory – improvement program, Eastern Research Group, Inc., January 2001 [en ligne], Disponible sur: www.epa.gov (consulté 24.05.04)

EPA (a), *Basic facts. Municipal Solid Waste (MSW)* [en ligne], Disponible sur: www.epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl/facts.htm © 2004 (consulté 26.01.05)

EPA – CLIMATE LEADERS (b), *Direct emissions from Municipal Solid Waste Landfilling*, Draft for comment through October 2004, Environmental Protection Agency [en ligne], Disponible sur : www.epa.gov (consulté 16.11.04)

EUROOBSERVE'ER, *Le baromètre du biogaz – 9,8 % de croissance en 2002*, Systèmes Solaires n° 157, october 2003 [en ligne], Disponible sur : <http://www.observ-er.org/eufores/baro157.pdf> (consulté 26.01.05)

FARQUHAR G.J., ROVERS F.A., Gas production during refuse decomposition, *Water, Air and Soil Pollution*, 1973, n° 2, pp. 483-495.

FUJI ELECTRIC, *Fuji Electric Electronic Transmitter* [en ligne], Disponible sur: <http://www.fic-net.co.jp/eng/index.html> © 2001 (consulté 14.01.04)

GAJ K., CYBULSKA H., KNOP F. *et al.*, Składowiska odpadów komunalnych jako źródła emisji zanieczyszczeń powietrza (Décharges des déchets ménagers comme des sources d'émission des pollutions de l'air), *Chemia i inżynieria ekologiczna*, 1999, t. 6, n° 4, pp. 337-344.

GAJ K., CYBULSKA H. (a), Modélisation de l'émission du biogaz des décharges des déchets ménagers. Partie I (Modelowanie emisji biogazu ze składowisk odpadów komunalnych. Część I), *Chemia i inżynieria ekologiczna*, 2002, t. 9, n° 1, pp. 91-100.

GAJ K., CYBULSKA H.(b), Modélisation de l'émission du biogaz des décharges des déchets ménagers. Partie II (Modelowanie emisji biogazu ze składowisk odpadów komunalnych. Część II), *Chemia i inżynieria ekologiczna*, 2002, t. 9, n° 1, pp. 213-220.

GAJ K., CYBULSKA H.(c), Modélisation de l'émission du biogaz des décharges des déchets ménagers. Partie III (Modelowanie emisji biogazu ze składowisk odpadów komunalnych. Część III), *Chemia i inżynieria ekologiczna*, 2002, t. 9, n° 7, pp. 741-750.

GALLE B., SAMUELSSON J., SVENSSON B.H. *et al.*, Measurements of methane emissions from landfills using a time correlation tracer method based on FTIR absorption spectroscopy, *Environmental Science and Technology*, 2001, n° 35, pp. 21-25.

GENTIL S., BARRAUD A.Y., SZAFNICKI K., SEXI: an expert identification package, *Automatica*, 1990, vol.26, n°4, pp. 803-809.

GIOS (Główny Inspektorat Ochrony Środowiska), *Raport – stan środowiska w Polsce w latach 1996 – 2001 (Rapport – état de l'environnement en Pologne dans des années 1996-2001)*, Warszawa, Polska, 2003 [en ligne], Disponible sur: <http://www.gios.gov.pl> (consulté 6.07.04)

GOURDON R., *Rapport final – Aide à la définition des déchets dits biodégradables, fermentescibles, méthanisables, compostable*, INSA de Lyon, France, février 2002 [en ligne], Disponible sur : <http://www.record-net.org> (consulté 6.12.04)

GRABOWSKI Z., *Technika składowania odpadów w Polsce – stan dzisiejszy i perspektywy (Technique du stockage de déchets en Pologne – état d’aujourd’hui et perspectives)*, **In:** *Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna: Gospodarka odpadami w Austrii. Przykłady rozwiązań dla Polski w drodze do Unii europejskiej (Conférence Internationale Scientifique-Technique : Gestion des déchets en Autriche. Exemples des solutions pour la Pologne en route à l’Union européenne)*, 20 – 22 marca 2002, Wiedeń, Austria, pp.97-103.

GUIBET J-C., *Les carburants et la combustion*, *Techniques de l’ingénieur*, 2000, n° BM 2520, pp. 1-28.

HABER J., *Zanieczyszczenie atmosfery a niszczenie zabytków Krakowa (Pollution d’atmosphère et destruction des monuments à Cracovie)*, **In:** *Kłęska ekologiczna Krakowa (Défaite écologique de Cracovie)*, Polski Klub Ekologiczny, Kraków, Polska, 1990, pp. 263-271.

INSTRUKCJA OBSŁUGI STACJI BIOGAZU IGNiG dla instalacji: do wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej, do spalania biogazu na składowisku odpadów komunalnych Barycz (*Instruction de service de la station du biogaz pour l’installation de la production de l’électricité et de la chaleur, du brûlage du biogaz sur le Centre de Stockage Barycz*), Instytut Górnictwa Naftowego i Gazownictwa, Kraków, Polska, 1999.

JOURNAL OFFICIEL, *Arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés* modifié par Arrêté du 31 décembre 2001 (JO du 2 mars 2002), Arrêté du 3 avril 2002 (JO du 19 avril 2002), Journal officiel de la République Française, 2 octobre 1997, 8 p.

JOURNAL OFFICIEL, *La loi du 13 juillet 1992 relative à l’élimination des déchets ainsi qu’aux installations classées pour la protection de l’environnement*, Journal officiel de la République Française du 14 juillet 1992, 9 p.

JOURNAL OFFICIEL, *La loi du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l’électricité* modifié par l’ordonnance n° 2002-1451 du 12 décembre 2002, par loi du 3 janvier 2003 *relative aux marchés du gaz et de l’électricité et au service public de l’énergie*, par l’article 61 de la loi du 2 juillet 2003 et par l’article 65 de la loi du 21 juillet 2003, Journal officiel de la République Française du 11 février 2000, 27 p.

JOURNAL OFFICIEL, *Arrêté du 3 octobre 2001 fixant les conditions d’achat de l’électricité produite par les installations qui valorisent des déchets ménagers ou assimilés en utilisant le biogaz de décharge*, Journal officiel de la République Française du 21 novembre 2001, 2p.

KINETIC PRODUCT (a), *Advance Optima – High Performance Measurement Technology Infrared Analyzer Module Uras 14* [en ligne], Disponible sur : <http://www.kinetic.com.tw/product/ABB/Uras%2014.pdf> © 2003 (consulté 12.01.04)

KINETIC PRODUCT (b), *Advance Optima – High Performance Measurement Technology Oxygen Analyzer Module Magnos 16/17* [en ligne], Disponible sur : <http://www.kinetic.com.tw/product/ABB/Magnos%2016%20&%2017.pdf> © 2003 (consulté 12.01.04)

KINETIC PRODUCT (c), *ABB Analytical – The World of Analysis* [en ligne], Disponible sur <http://www.kinetic.com.tw/product/ABB/General%20Brochure%20of%20ABB%20Product.pdf> © 2003 (consulté 12.01.04)

KOMILIS D.P., HAM R.K., STEGMANN R., The effect of landfill design and operation practices on waste degradation behavior : a review, *Waste Management and Research*, 1999, vol. 17, pp. 20-26.

KRAJEWSKI Z., Odpady komunalne – wybrane zagadnienia (Déchets ménagers – problèmes choisis), **In**: *I Konferencja Narodowa: Odpady (I^e Conférence Nationale : Résidus)*, 2002, Toruń, Polska, pp. 25-30.

KRAKÓW, **In**: *Encyklopedia Krakowa PWN (Eyclopédie de Cracovie PWN)*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Kraków, Polska, 2000, 416 p.

LANDGEM, *Landfill Gas Emission Model* U.S. Environmental Protection Agency [en ligne], Disponible sur <http://www.epa.gov/oar/oaqps/landfill.html> © 2002 (consulté 16.11.04)

LAPRESTE J-T., *Introduction à MATLAB*, Ellipses, Paris, 1992, 211 p.

L'art du dégazage, *Environnement & Technique/Info-déchets*, 1996, n° 158, pp. 36-40.

LEBART L., MORINEAU A., PIRON M., *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, DUNOD, 2000, 400 p.

LEMANSKI J., Zasady uszczelniania wysypisk, ujmowanie gazu i odcieków (Règles de l'étanchéification des décharges, captage du gaz et des lixiviats), **In**: KEMPA E.S., *Gospodarka odpadami na wysypiskach (Gestion des déchets sur des décharges)*, Arka Konsorcjum s.c., Poznań, Polska, 1992, pp. 77-119.

LISK D.J, Environmental effects of landfills, *The Science of the Total Environment*, 1991, vol. 100, pp. 415-468.

LYN P.A., FUERST W., *Digital signal processing with computer applications*, John Willey & Sons Ltd., 1990, 371 p.

MANNA L., ZANETTI M.C., GENON G., Modeling biogas production at landfill site, *Resources, Conservation and Recycling*, 1999, n° 26, pp. 1-14.

MATA-ALVAREZ J., Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, *IWA Publishing*, London, UK, 2003, 336 p.

MATHWORKS, *The MathWorks* [en ligne], Disponible sur : www.mathworks.com © 2005 (consulté 24.03.05)

MEDD - Ministre de l'Ecologie et du Développement Durable, Circulaire du 27 juin 2002 relative à l'échéance du 1^{er} juillet 2002 sur les déchets, Paris, 27 juin 2002, 2 p.

MERAZ R.L., VIDALES A.M., DOMINGUEZ A., A fractal-like kinetics equation to calculate landfill methane production, *Fuel*, 2004, n° 83, pp. 73-80.

MERES M., SZCZEPANIEC-CIECIAK E., PIEJKO K., SADOWSKA A., SZAFNICKI K., Operational and meteorological influence on the utilised biogas composition at the Barycz landfill site in Cracow, Poland, *Waste Management & Research*, 2004, vol. 22, n° 3, pp.195-201.

MERES M., SZAFNICKI K., FORMISYN P., SZCZEPANIEC-CIECIAK E., Landfill gas (LFG) utilization: how to optimise it vs. the influence of meteorological parameters?, **In**: 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2004, CD-ROM of full texts, 1st Edition ISBN 80-86059-40-5, 22-26 August 2004, Czech Republic, 8 p.

METEO FRANCE, *Météo France, Centre départemental – Loire [en ligne]*, Disponible sur : <http://www.meteo.fr/meteonet/meteo/pcv/cdm/dept42/cdm2.htm> © 2003 (consulté 5.01.04)

MOREAU-LE GOLVAN Y., GOSSET TH., Storage: a key element in waste management, *TSM*, 2000, n° 5, pp. 103-111.

MORTGAT B., Le biogaz une source d'énergie qui fermente, *Environnement & Technique/Info-déchets*, 1998, n° 181, pp. 17-26.

MURPHY J.D., MCKEOGH E., KIELY G., Technical/economic/ environmental analysis of biogas utilisation, *Applied Energy*, 2004, n° 77, pp. 407-427

OBAYASHI Corporation, *LFG to Electricity Project in Nontaburi, Thailand*, March 2004 **[en ligne]**, Disponible sur: <http://gec.jp/gec/en/Activities/cdm/FS200301SE.pdf> (consulté 28.01.2005).

ONISZK-POPLAWSKA A., ROGULSKA M., WISNIEWSKI G., Renewable – energy developments In Poland to 2020, *Applied Energy*, 2003, vol. 76, pp. 101-110.

OTZO - Ogólnopolskie Towarzystwo Zagospodarowania Odpadów, *Argumenty przeciwko budowie spalarni odpadów komunalnych (Arguments contre la construction d'usine d'incinération des déchets ménagers) [en ligne]*, Disponible sur: <http://www.otzo.most.org.pl/spalarNIE!/spalarnie!.html> © 2003 (consulté 7.07. 2004)

OXYNOS 100, *Sauerstoff – Analysator*, (Mode d'emploi Oxynos 100, analyseur de l'oxygène), Leybold AG Niemcy, 1989.

PACZOSA A., Energetyka odnawialna w polityce energetycznej i przepisach ochrony środowiska UE i Polski (Energie renouvelable dans la politique energetique et dans les normes de la protection de l'environnement d'UE et Pologne), **In**: *Korzyści i szanse rozwoju wynikające z wykorzystania odnawialnych źródeł energii (Interets et possibilités du*

development résultant d'utilisation des sources d'énergie renouvelable), Fundacja Wspierania Inicjatyw Ekologicznych, Kraków-Oświęcim, Polska, 2003.

PAJAK T., WARZECHA W., Model gospodarki odpadami komunalnymi dla polskich miast na przykładzie Krakowa (Modèle de la gestion des déchets ménagers pour des villes polonaises sur l'exemple de Cracovie), **In:** *Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna: Gospodarka odpadami w Austrii. Przykłady rozwiązań dla Polski w drodze do Unii europejskiej (Conférence Internationale Scientifique et Technique : Gestion des déchets en Autriche. Exemples des solutions pour la Pologne en route vers l'Union européenne)*, 20 – 22 marca 2002, Wiedeń, Austria, pp. 43-51.

PELT R., BASS L.R., HEATON E.R., *et al.*, *Landfill Gas Emissions Model, User's Manual for Version 2*, U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, February 1998, p. 94

PELTRON, *Przetwornik różnicy ciśnień seria NPXD (Appareil de mesure du débit et de la pression NPXD)* [en ligne], Disponible sur: <http://www.peltron.home.pl/pub/npxd.pdf>, © 2003 (consulté 25.03.2004).

POHLAND F.G., YOUSFI B. Al., Design and operation of landfills for optimum stabilization and biogas production, *Water Science Technology*, 1994, n° 12, pp. 117-124.

PRO 2, *Pro2 Anlagentechnik GmbH* [en ligne], Disponible sur : http://www.pro-2.net/FR/F_home.htm (consulté 27.01.03)

PULSONIC, *Station météorologique Pulsia* [en ligne], Disponible sur : <http://www.pulsonic.net/wwcgi/wwcgi.exe/connect/pulsonic> © 2000 (consulté 12.01.04)

RAPPORT D'ACTIVITE - Dossier D'information, *Centre de Stockage (Classe II) du Vallon de Borde-Matin, Roche-la-Molière (Loire)*, avril 2003, SITA France, 52 p.

RECY.NET, *Situation des déchets au Japon* [en ligne], Disponible sur : www.recy.net/actualites/japon.html © 2000 (consulté 29.01.03)

RHONE-ALPES - Prefecture de Region Rhone-Alpes, *Région Rhône-Alpes – territoire et population* [en ligne], Disponible sur : http://www.rhone.pref.gouv.fr/navigation/fs_3.html (consulté 5.01.04)

ROZPORZADZENIE (a) Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 roku w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów (L'arrêté du 24 mars 2003 *au domaine d'exigences détaillées concernant la localisation, la construction, l'exploitation et la fermeture des décharges de différents types*), Dz. U. Nr 61, poz. 549.

ROZPORZADZENIE (b) Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 30 maja 2003 roku w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych źródeł energii oraz energii elektrycznej wytwarzanej w skojarzeniu z wytwarzaniem ciepła (L'arrêté du 30 mai 2003 *relatif au domaine détaillé d'obligation*

d'achat de l'électricité et de la chaleur issus des sources de l'énergie renouvelable et de l'électricité produite en cogénération avec le chaleur), Dz. U. Nr 104, poz. 971.

SATROD, *Satrod* [en ligne], Disponible sur : www.satrod.fr © 2000 (consulté 8.01.2004)

SCILAB, *Scilab* [en ligne], Disponible sur : www.scilab.org © 2005 (consulté 24.03.2005)

SIEJA L., Aktualny stan i niezbędne działania wyznaczone w planach gospodarki odpadami w Polsce (Etat actuel et les actions indispensables précisés dans des plans de la gestion de déchets en Pologne), **In:** *Nowoczesna gospodarka odpadami komunalnymi (Gestion moderne de déchets ménagers)*, Polsko-niemieckie seminarium 23-24 marca 2004 [en ligne], Disponible sur: http://www.ietu.katowice.pl/aktual/pol_niem_seminarium.html (consulté 6.07.2004)

SOLAGRO, Valorisation du biogaz en Europe, *Les nouvelles de Solagro*, 2000, n° 28, pp. 2-8.

SOLINSKI I., *Biomasa: energia odnawialna (Biomasse : energie renouvelable)*, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, 2001, 172 p.

SORTIR DU NUCLEAIRE, *Réseau Sortir du Nucléaire* [en ligne], Disponible sur : <http://www.sortirdunucleaire.org> © 2003 (consulté 24.01.03)

SPAD, *Data mining & text mining*, [en ligne], Disponible sur : <http://www.decisia.com> © 2003 (consulté 17.03.05)

STATION - Operating Manual Remote Controlled Weather Station, 2001.

SUMADHU G.A., TSOTSIS T.T., WEBSTER I.A. *et al.*, Gas generation, transport and Extraction in landfills, *Journal of Environmental Engineering*, 1995, vol. 121, n° 1, pp. 33-45.

SZAFNICKI K., *Système à base de connaissances pour l'identification des procédés*, thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1991, 293 p.

SZAFNICKI K., GENTIL S., A knowledge base for an expert identification package, *Control Engineering Practice*, 1995, vol. 3, n° 6, pp. 783-792.

TANA, *Tana G series general brochure* [en ligne], Disponible sur : http://www.tana.fi/downloads/TANA_G_Series.pdf (consulté 3.11.03)

TEMPERATURA - Dokumentacja Techniczno – Ruchowa, *Czujnik temperatury TB- 100/N (Senseur de la température TB – 100/N)*, Carboautomatyka S.A., 2002, Tychy, Polska.

THORNELOE S.A., REISDORPH A., LAUR M. *et al.*, The US Environmental protection Agency's landfill gas emissions model (LANDGEM), **In:** *Seventh International Waste Management and Landfill Symposium: Proceedings Sardinia 99*, 4-8 October 1999, Cagliari, Italy, pp. 11-18.

USTAWA (a) z dnia 27 kwietnia 2001 roku *o odpadach (ujednolicona)* (*La loi sur les déchets du 27 avril 2001 (après changements)*), opracowano na podstawie: Dz. U. z 2001 r. Nr 62, poz. 628; Dz. U. z 2002 r. Nr 41, poz. 365, Nr 113, poz. 984, Nr 199, poz. 1671; Dz. U. z 2003 r. Nr 7, poz. 78; Dz. U. z 2004 r. Nr 96, poz. 959, Nr 116, poz. 1208

USTAWA (b) z dnia 11 maja 2001 roku *o opakowaniach i odpadach opakowaniowych (ujednolicona)* (*La loi sur les emballages et les déchets d'emballage du 11 mai 2001 (après changements)*) opracowano na podstawie: Dz. U. z 2001 r. Nr 63, poz. 638; Dz. U. z 2003 r. Nr 7, poz. 78; Dz. U. z 2004 r. Nr 11, poz. 97, Nr 96, poz. 959.

USTAWA (c) z dnia 27 kwietnia 2001 roku *prawo ochrony środowiska (ujednolicona)* (*La loi sur la protection de l'environnement du 27 avril 2001 (après changement)*) opracowano na podstawie: Dz. U. z 2001 r. Nr 62, poz. 627, Nr 115, poz. 1229; Dz. U. z 2002 r. Nr 74, poz. 676, Nr 113, poz. 984, Nr 153, poz. 1271, Nr 233, poz. 1957; Dz. U. z 2003 r. Nr 46, poz. 392, Nr 80, poz. 717 i 721, Nr 162, poz. 1568, Nr 175, poz. 1693, Nr 190, poz. 1865, Nr 217, poz. 2124; Dz. U. z 2004 r. Nr 19, poz. 177, Nr 49, poz. 464.

USTAWA z dnia 10 kwietnia 1997 roku *prawo energetyczne (ujednolicone)* (*La loi énergétique du 10 avril 1997 (après changements)*), opracowano na podstawie: Dz. U. z 2003 r. Nr 153, poz. 1504, Nr 203, poz. 1966; Dz. U. z 2004 r. Nr 29, poz. 257, Nr 34, poz. 293, Nr 91, poz. 875, Nr 96, poz. 959.

VANDEL, *Calcul des forces de compactage [en ligne]*, Disponible sur : <http://www.vandel.fr/force.asp> (consulté 29.10.03)

VAVILIN V.A., VASILIEV V.B., PONOMAREV A.V. *et al.*, Simulation model « methane » as a tool for effective biogas production during anaerobic conversion of complex organic matter, *Bioresource Technology*, 1994, vol. 48, pp. 1-8.

WAUKESHA, *Waukesha Engine [en ligne]*, Disponible sur : <http://www.waukeshaengine.com> © 2004 (consulté 9.01.04)

WEST M.E., BROWN K.W., THOMAS J.C., Methane production of raw and composted solid waste in simulated landfill cells, *Waste Management & Research*, 1998, vol. 16, n° 5, pp. 430-436.

WILSON S., Estimate of costs incurred by local authorities for space occupied by plastic bottles in waste trucks and landfill sites, **In:** *Plastic bottle recycling in the UK*, The Waste and Resources Action Programme (WRAP) **[en ligne]**, Disponible sur : www.wrap.org.uk (consulté 02.11.03)

WIOS - Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska, *Raport o stanie środowiska w 1998 roku na obszarze województwa Małopolskiego. Kraków 1999 (Rapport d'état de l'environnement en 1998 sur le terrain de voivode de Małopolska. Cracovie 1999) [en ligne]*, Disponible sur: http://www.krakow.pios.gov.pl/raport98/rozdz_02.html (consulté 11.06.04).

WOŚ A., *Klimat Polski (Climat de la Pologne)*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Polska, 1999.

WREFORD K.A., ATWATER J.W., LAVKULICH L.M., The effects of moisture inputs on landfill gas production and composition and leachate characteristics at the Vancouver Landfill Site at Burns Bog, *Waste Management and Research*, 2000, vol. 18, pp. 386-390

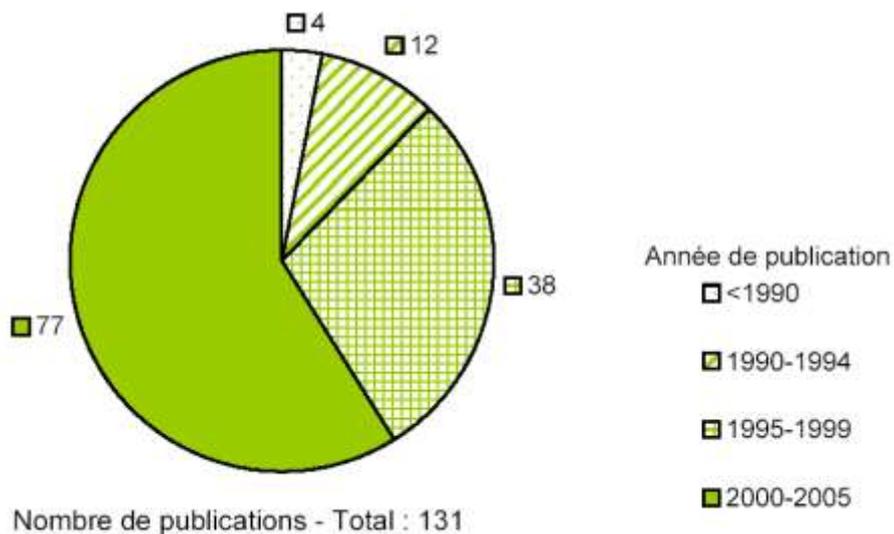
ZACHAROF A.I., BUTLER A.P., Modelling biodegradation processes in heterogeneous landfill waste, In: *Seventh International Waste Management and Landfill Symposium: Proceedings Sardinia 99*, 4-8 October 1999, Cagliari, Italy, vol. IV.

ZACHAROF A.I., BUTLER A.P., Stochastic modeling of landfill processes incorporating waste heterogeneity and data uncertainty, *Waste Management*, 2004, n° 24, pp. 241-250.

ŻYGADŁO M., *Gospodarka odpadami komunalnymi (Gestion des déchets ménagers)*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, Polska, 1999, 281 p.



Récapitulatif des références citées



REFERENCES



Publications et conférences

Publications :

- 1) M.Meres, K.Szafnicki, P. Formisyn, E. Szczepaniec-Cięciak, Landfill Gas (LFG) utilization: how to optimise it vs. the influence of meteorological parameters?, **In**: 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2004, CD-ROM of full texts, 1st Edition ISBN 80-86059-40-5, 22-26 August 2004, Czech Republic, 8 p.
- 2) M.Meres, K. Szafnicki, Landfill as a valuable source of experience for (E-) learning in continuous professional development, and not only..., **In**: 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2004, CD-ROM of full texts, 1st Edition ISBN 80-86059-40-5, 22-26 August 2004, Czech Republic, 8 p.
- 3) M.Meres, E. Szczepaniec-Cięciak, K. Piejko, K. Szafnicki, "Operational and meteorological influence on the utilized biogas composition at the Barycz landfill site in Cracow, Poland", *Waste Management & Research*, 2004, vol. 22, n° 3, p. 195-201.
- 4) M.Meres, K.Szafnicki, „Optimisation de la valorisation du biogaz issu des Centres d'Enfouissement Technique (CET : décharges urbaines). Thèse en cotutelle”, *Bulletin électronique de Pologne (Service Scientifique de l'Ambassade de France à Varsovie)*, 22 septembre 2003, n° 1.
- 5) E.Szczepaniec-Cięciak, P.Formisyn, K.Szafnicki, M.Meres, „Optimisation of the process of landfill gas production and utilisation”, *Newsletter, International Relations Office Jagiellonian University*, Autumn 2003, No 22, 9-11.

Conférences :

- 1) 22-26 août 2004: 16th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2004, Prague. **Deux communications orales** : M.Meres, K.Szafnicki, P.Formisyn, E.Szczepaniec-Cięciak "Landfill Gas (LFG) utilization: how to optimise it vs. the influence of meteorological parameters? "; M.Meres, K.Szafnicki "Landfills as a valuable source of experience for E-learning in continuous professional development, and not only ... ". (<http://www.chisa.cz/2004/>)
- 2) 1-3 septembre 2003: Conférence *Variety in Chemistry Education*, Dublin. **Présentation de poster** : M.Brindell, M.Meres, P.Nowak-Śliwińska, I.Maciejowska, "Three ways of preventing students from falling asleep during classes".
- 3) 9-13 septembre 2002 : *XLV^e Congrès annuel de la Société polonaise de chimie - PTChem*, Cracovie. **Présentation orale** : M.Meres, K.Piejko, E.Szczepaniec-Cięciak, T.Gierada, A.Węgrzyn "Influence des paramètres météorologiques et d'exploitation sur la composition du biogaz de décharge"
- 4) 18-20 octobre 2001: *X^e Conf. Europe Centrale ECOpole'2001*, Jamrozowa Polana, Pologne-Hradec Králové, Tchèque. **Présentation de poster** : M.Meres, K.Piejko, E.Szczepaniec-Cięciak "Influence de paramètres météorologiques sur la qualité du biogaz".
- 5) 11-12 mai 2001: *II^e Festival Scientifique Jagiellon* (Cracovie, Pologne). **Présentation de posters** : "Nouvel regard sur la Terre, nouvelle voie aux étoiles" et "Exemples d'applications de la cryogénie". **Démonstrations grand-public** : gaz liquéfiés, très basses températures

ANNEXE 1



Exemples des concentrations
de plusieurs composants du biogaz
[Allen 1996, Bergier 1999, Gaj 1999]

Tableau A-1.I. Exemples des concentrations de plusieurs composants du biogaz

Composant		Concentration, % v/v	
Méthane		30-60	
Dioxyde de carbone		34-51	
Azote		0-21	
Oxygène		0-2	
Hydrogène		0-0,1	
Oxyde de carbone		0-0,1	
Hydrogène sulfuré		0-1	
Composant	Concentration, mg/m ³	Composant	Concentration, mg/m ³
<u>Alcanes</u>		Méthylcyclohexane	15
Butane	14	Triméthylcyclopentane	<2
Pentane	105	Diméthylcyclohexane	<1
Hexane	100	Triméthylcyclohexane	<2
Heptane	99	Propylcyclohexane	<2
Octane	17	Butylcyclohexane	<2
Nonane	147	<u>Terpènes</u>	
Décane	125	Limonène	240
<u>Alcènes, Alcadiènes</u>		Autres terpènes	160
Butène, Butadiène	18, <1	<u>Hydrocarbures aromat.</u>	
Pentène, Pentadiène	0,5, <2	Benzène	5
Hexène	15	Toluène	15
Heptène, Heptadiène	<2, <2	Styrène	7
Octène	21	Xylène	34
Nonène, Nonadiène	22, 5	Ethylbenzène	14
Decène	82	Méthylstyrène	<2
<u>Cycloalcanes</u>		C ₃ -alkilobenzenes	36
Cyclopentane	<2	C ₄ -alkilobenzenes	5,8
Cyclohexane	33	C ₅ -alkilobenzenes	<2
Méthylcyclopentane	<2		
Diméthylcyclopentane	1		
Ethylcyclopentane	<2		

Tableau A-1.I. Exemples des concentrations de plusieurs composants du biogaz (suite)

Composant	Concentration, mg/m ³	Composant	Concentration, mg/m ³
<u>Hydrocarbures halogénés</u>		<u>Comp. sulfoorganiques</u>	
Chlorométhane	1	Oxysulfure de carbone	<1
Chlorofluorométhane	1	Disulfure de carbone	5
Dichlorométhane	140	Méthanthiol	60
Chlorodifluorométhane	4	Ethanthiol	<1
Dichlorofluorométhane	5	Sulfure diméthyl	14
Chloroforme	5	Disulfure diméthyl	10
Dichlorodifluorométhane	<1	Disulfure diéthyl	<2
Trichlorofluorométhane	10	Butanthiol	<2
Chloréthane	20	Pentanthiol	<2
1,1-Dichloréthane	25	<u>Alcools</u>	
1,2-Dichloréthane	120	Méthanol	<2
Chlorure de vinyle	<2	Éthanol	>80
1,1,1-Trichloréthane	16	Butan-2-ole	110
1,2-Dichloréthylène	29	<u>Esters</u>	
Trichloréthylène	68	Octane d'éthyle	60
Tetrachloréthylène	10	Butyrate de méthyle	5
1,2-Dichlorotetrafluoroéthane	1	Propionate d'éthyle	50
1,1,1-Trichlorotrifluoroéthane	<2	Octane de propyle	50
Brométhyle	<2	Octane d'isopropyle	6
Chloropropane	<2	Valérianate méthyle	1
Dichlorobutène	<2	Butyrate d'éthyle	350
Chlorobenzène	<2	Propionate de propyle	200
Dichlorobenzène	<2	Octane de butyle	60
		Valérianate d'éthyle	20
		Butyrate de propyle	100
		<u>Ethers</u>	
		Ether diméthylique	<2
		Ether éthylméthylique	<2
		Ether diéthylique	<2
		Ether dipropylique	<2

ANNEXE 2

.....

Les mesures de données « biogaz » effectuées
sur le réseau de dégazage de CDS Barycz
de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003

Tableau A-2.II. Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS

Barycz de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003

Date	Réf. puits	Concentration, % v/v			Nmbr de GE en fonct.
		CH ₄	CO ₂	O ₂	
25/02 2002	V9	59,9	34,0	0,3	2
	V10	59,1	35,1	0,3	
	V7	60,1	32,8	0,3	
	V4	60,1	34,3	0,3	
	V8	60,4	33,7	0,3	
	V5	60,1	32,9	0,3	
	V12	59,2	35,0	0,3	
	ZR	49,8	22,3	0,3	
	ZB	60,8	35,4	0,3	
26/02 2002	V9	59,9	34,1	0,3	2
	V10	58,7	35,1	0,3	
	V7	59,8	33,6	0,3	
	V4	58,7	32,6	0,6	
	V8	61,0	34,0	0,3	
	V5	60,0	33,6	0,3	
	V12	59,3	35,2	0,3	
	ZR	50,9	22,7	0,3	
	ZB	60,5	35,3	0,3	
27/02 2002	V9	60,3	33,4	0,3	2
	V10	59,3	34,9	0,3	
	V7	60,4	33,7	0,3	
	V4	60,4	33,7	0,3	
	V8	60,7	34,2	0,3	
	V5	60,9	34,3	0,3	
	V12	60,1	35,7	0,3	
	ZR	50,7	23,0	0,3	
	ZB	61,3	35,8	0,3	
28/02 2002	V9	59,9	34,8	0,7	2
	V10	60,1	37,1	0,3	
	V7	60,8	35,3	0,3	
	V4	61,3	35,9	0,3	
	V8	61,6	35,5	0,3	
	V5	61,1	35,3	0,3	
	V12	60,8	37,4	0,3	
01/03 2002	V9	62,2	37,7	0,3	2
	V10	61,2	39,2	0,3	
	V7	63,3	38,5	0,3	
	V4	63,4	38,8	0,3	
	V8	62,7	37,3	0,3	
	V5	63,3	37,7	0,3	
	V12	63,7	40,7	0,3	
	ZR	52,6	26,2	0,3	
	ZB	64,5	40,5	0,3	
11/03 2002	V9	61,5	32,8	0,3	2
	V10	61,0	34,6	0,3	
	V7	60,8	33,4	0,3	
	V4	60,8	33,2	0,4	
	V8	60,1	33,0	0,4	
	V5	60,5	32,8	0,3	
	V12	59,6	34,3	0,3	
	ZR	46,5	22,2	0,3	
	ZB	61,3	34,6	0,3	
13/03 2002	V9	60,1	33,6	0,3	1
	V10	59,4	35,1	0,3	
	V7	62,0	34,2	0,3	
	V8	60,5	34,9	0,3	
	V5	60,1	35,2	0,3	
	ZR	60,5	34,8	0,3	
	ZB	60,7	34,2	0,3	
14/03 2002	V9	60,8	33,1	0,3	0
	V10	59,7	34,2	0,3	
	V8	60,7	33,8	0,3	
	V5	60,1	34,0	0,3	
	ZR	60,3	33,2	0,3	
ZB	60,8	33,7	0,3		
15/03 2002	V9	59,5	34,1	0,3	1
	V10	58,7	35,1	0,3	
	V7	59,7	33,9	0,3	
	V4	59,5	33,7	0,3	
	V8	59,4	33,7	0,3	
	V5	59,3	34,0	0,3	
	V12	59,0	34,0	0,3	
	ZR	59,5	30,8	0,3	
	ZB	60,1	33,7	0,3	
18/03 2002	V9	59,7	34,3	0,3	1
	V10	59,3	35,2	0,3	
	V8	59,6	34,9	0,3	
	V5	59,4	33,9	0,3	
	ZR	59,8	34,3	0,3	
	ZB	59,8	34,7	0,3	
19/03 2002	V9	60,1	34,7	0,3	1
	V10	59,1	35,6	0,3	
	V7	60,5	35,0	0,3	
	V4	60,8	34,9	0,3	
	V8	60,8	35,1	0,3	
	V5	61,1	35,6	0,3	
	ZR	60,6	28,0	0,3	
	ZB	61,6	34,9	0,3	
	20/03 2002	V9	61,0	34,3	
V10		59,6	35,8	0,3	
V7		60,7	34,7	0,3	
V4		60,5	34,9	0,3	
V8		60,8	34,6	0,3	
V5		61,0	35,0	0,3	
V12		60,4	35,3	0,3	
ZR		60,0	28,4	0,3	
ZB		60,6	35,2	0,3	
21/03 2002	V9	61,2	34,0	0,3	0
	V10	61,2	34,1	0,3	
	V8	61,3	34,0	0,3	
	ZR	61,6	34,0	0,3	
	ZB	62,1	33,9	0,3	
22/03 2002	V9	61,2	36,5	0,3	1
	V10	59,8	34,7	0,3	
	V7	60,2	33,9	0,3	
	V4	60,7	34,0	0,3	
	V8	60,7	34,1	0,3	
	V5	61,4	34,0	0,3	
	V12	60,7	34,9	0,3	
	ZR	60,2	29,1	0,3	
	ZB	61,0	35,5	0,3	

Tableau A-2.II. Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS Barycz de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003 (suite)

Date	Réf. puits	Concentration, % v/v			Nmbr de GE en fonct.
		CH ₄	CO ₂	O ₂	
08/04 2002	V9	59,9	32,8	0,3	2
	V10	59,8	33,7	0,3	
	V7	60,2	34,0	0,3	
	V4	60,7	34,5	0,3	
	V8	60,3	34,2	0,3	
	V5	60,4	34,6	0,3	
	V12	59,7	35,2	0,3	
	ZR	40,8	22,6	0,3	
	ZB	60,1	34,2	0,3	
09/04 2002	V9	59,8	33,1	0,3	2
	V10	59,3	34,2	0,3	
	V7	59,9	32,1	0,3	
	V4	59,8	32,3	0,3	
	V8	60,1	32,8	0,3	
	V5	59,7	32,7	0,3	
	V12	60,3	33,6	0,3	
	ZR	43,5	21,2	0,3	
	ZB	60,4	33,9	0,3	
10/04 2002	V9	59,4	32,8	0,5	2
	V10	59,6	33,0	0,3	
	V7	60,0	33,0	0,3	
	V4	60,0	33,0	0,3	
	V8	60,1	32,7	0,3	
	V5	60,1	32,9	0,3	
	V12	60,7	33,7	0,3	
	ZR	43,7	21,5	0,3	
	ZB	60,4	33,8	0,3	
11/04 2002	V9	59,9	33,6	0,5	2
	V10	59,7	34,4	0,3	
	V7	60,6	33,4	0,3	
	V4	60,3	33,3	0,3	
	V8	60,2	33,1	0,3	
	V5	60,4	32,9	0,3	
	ZR	46,0	21,4	0,5	
	ZB	60,1	33,1	0,3	
	12/04 2002	V9	61,0	33,6	
V10		60,3	34,0	0,3	
V7		61,0	33,4	0,2	
V4		60,1	33,1	0,5	
V8		60,1	33,4	0,5	
V5		60,1	32,9	0,5	
V12		60,0	33,3	0,3	
ZR		47,2	21,6	0,5	
ZB		61,1	33,2	0,3	
27/05 2002	V9	58,0	36,5	0,3	2
	V10	57,5	37,8	0,2	
	V7	58,4	36,7	0,2	
	V4	58,9	36,2	0,2	
	V8	58,7	36,4	0,2	
	V5	58,0	37,3	0,2	
	V12	59,9	37,8	0,2	
	ZR	45,8	24,8	0,1	
	ZB	60,9	37,2	0,2	
28/05 2002	V9	58,1	36,1	0,3	2
	V10	56,7	38,7	0,3	
	V7	58,6	36,4	0,3	
	V4	59,1	38,2	0,1	
	V8	59,2	36,2	0,3	
	V5	58,8	37,0	0,2	
	V12	59,6	37,4	0,2	
	ZR	50,2	25,0	0,2	
	ZB	61,5	37,2	0,1	
29/05 2002	V9	58,6	37,3	0,3	2
	V10	59,2	39,4	0,0	
	V7	59,3	42,2	0,2	
	V4	59,5	40,4	0,3	
	V8	59,5	37,7	0,3	
	V5	59,7	37,6	0,3	
	V12	60,4	38,6	0,2	
	ZR	45,0	26,1	0,0	
	ZB	61,3	39,0	0,0	
30/05 2002	V9	59,1	37,2	0,3	2
	V10	57,4	38,3	0,3	
	V7	58,5	37,0	0,3	
	V4	59,1	36,8	0,3	
	V8	59,3	37,9	0,3	
	V5	59,7	37,0	0,3	
	V12	60,4	38,6	0,1	
	ZR	41,7	25,3	0,3	
	ZB	61,5	39,3	0,2	
31/05 2002	V9	58,4	36,8	0,3	2
	V10	57,7	37,8	0,3	
	V7	58,6	36,7	0,3	
	V4	59,1	36,4	0,3	
	V8	59,9	36,8	0,2	
	V5	59,1	36,8	0,3	
	V12	60,8	37,6	0,0	
	ZR	42,8	24,9	0,1	
	ZB	61,8	38,6	0,0	
02/07 2002	V9	59,5	37,0	0,3	2
	V10	57,9	37,8	0,3	
	V7	58,2	37,2	0,3	
	V4	58,8	37,7	0,3	
	V8	58,8	37,0	0,3	
	V5	58,6	37,7	0,3	
	V12	59,3	37,1	0,3	
	ZR	51,7	23,4	0,3	
	ZB	61,6	37,9	0,3	
04/07 2002	V9	58,5	37,2	0,3	2
	V10	57,8	38,3	0,3	
	V7	59,0	37,4	0,3	
	V4	58,3	37,2	0,4	
	V8	57,7	37,4	0,4	
	V5	59,3	37,7	0,3	
	V12	60,3	37,6	0,1	
	ZR	52,5	24,7	0,1	
	ZB	60,9	38,0	0,2	
05/07 2002	V9	58,4	37,7	0,6	2
	V10	58,4	38,5	0,3	
	V7	57,9	37,4	0,6	
	V4	59,0	38,0	0,4	
	V8	58,7	37,6	0,3	
	V5	58,9	37,9	0,3	
	V12	59,6	38,0	0,3	
	ZR	50,4	24,1	0,3	
	ZB	60,3	37,9	0,3	

Tableau A-2.II. Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS Barycz de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003 (suite)

Date	Réf. puits	Concentration, % v/v			Nmbr de GE en fonct.
		CH ₄	CO ₂	O ₂	
08/07 2002	V9	57,6	36,8	0,3	2
	V10	57,3	37,8	0,3	
	V7	57,8	37,0	0,3	
	V4	57,9	36,7	0,3	
	V8	57,8	36,9	0,3	
	V5	57,5	36,6	0,3	
	V12	59,4	37,0	0,1	
	ZR	52,9	24,5	0,3	
	ZB	60,6	37,6	0,3	
09/07 2002	V9	57,9	36,9	0,3	2
	V10	57,1	38,3	0,3	
	V7	58,5	36,9	0,2	
	V4	58,4	36,5	0,3	
	V8	57,9	36,4	0,3	
	V5	57,8	36,9	0,3	
	V12	59,3	36,9	0,1	
	ZR	52,8	24,7	0,1	
	ZB	60,4	38,5	0,1	
10/07 2002	V9	58,4	36,9	0,3	2
	V10	57,4	37,7	0,3	
	V7	59,5	36,9	0,3	
	V4	58,9	36,9	0,3	
	V8	60,4	37,2	0,3	
	V5	60,9	39,0	0,1	
	V12	60,3	38,3	0,1	
	ZR	54,1	24,0	0,3	
	ZB	60,5	38,7	0,3	
11/07 2002	V9	58,3	37,3	0,4	1
	V10	58,3	38,9	0,3	
	V7	58,9	37,5	0,3	
	V4	59,4	37,4	0,3	
	V8	59,7	37,4	0,3	
	V5	59,5	37,9	0,3	
	V12	60,7	37,8	0,1	
	ZR	61,1	31,4	0,3	
	ZB	61,0	38,7	0,3	
12/07 2002	V9	60,9	38,9	0,0	1
	V10	61,5	37,9	0,0	
	V7	60,9	38,7	0,0	
	V4	61,5	37,8	0,0	
	V8	61,5	38,8	0,0	
	V5	61,0	39,0	0,0	
	V12	61,5	38,1	0,0	
	ZR	63,6	32,8	0,0	
	ZB	61,2	38,2	0,0	
07/10 2002	V9	54,0	36,0	1,5	2
	V10	59,0	39,0	0,5	
	V7	55,5	37,0	1,5	
	V4	55,6	37,1	1,5	
	V8	55,1	35,1	1,9	
	V5	55,0	36,5	1,6	
	V12	58,6	39,2	0,5	
	ZR	58,4	26,0	0,5	
	ZB	60,0	38,0	0,3	
08/10 2002	V9	56,7	37,1	1,5	2
	V10	59,6	40,2	0,5	
	V7	56,4	37,3	1,5	
	V4	55,6	36,5	1,5	
	V8	55,0	34,8	2,0	
	V5	55,6	34,8	1,6	
	V12	58,7	39,5	0,5	
	ZR	56,4	27,9	0,5	
	ZB	58,4	37,1	1,5	
09/10 2002	V9	56,4	36,9	1,5	2
	V10	60,2	40,0	0,5	
	V7	56,8	36,9	1,5	
	V4	60,9	40,1	0,5	
	V8	60,5	39,0	0,7	
	V5	60,6	41,0	0,5	
	V12	62,3	38,3	0,3	
	ZR	57,3	26,0	0,5	
ZB	62,2	41,1	0,3		
10/10 2002	V9	59,1	39,0	1,0	2
	V10	60,2	41,0	0,3	
	V7	60,4	39,8	0,5	
	V4	60,5	39,3	0,5	
	V8	60,0	39,1	0,7	
	V5	61,0	39,7	0,4	
	V12	62,0	38,6	0,3	
	ZR	57,2	25,6	0,4	
	ZB	61,4	40,5	0,4	
11/10 2002	V9	60,0	39,6	0,8	2
	V10	60,9	40,8	0,3	
	V7	61,3	39,6	0,6	
	V4	60,7	39,2	0,8	
	V8	60,1	39,1	1,0	
	V5	61,4	40,2	0,5	
	V12	63,0	39,1	0,3	
	ZR	57,6	25,7	0,5	
	ZB	55,6	37,1	1,0	
21/10 2002	V9	61,6	38,8	0,6	2
	V10	61,4	40,5	0,3	
	V7	62,1	39,4	0,4	
	V4	61,6	38,9	0,5	
	V8	61,7	38,6	0,6	
	V5	62,2	38,3	0,5	
	V12	62,8	38,1	0,3	
	ZR	53,7	24,5	0,5	
	ZB	62,0	40,6	0,4	
22/10 2002	ZR	55,1	23,7	0,5	2
	ZB	60,7	38,1	0,5	
23/10 2002	V9	61,1	38,3	0,5	2
	V10	60,3	40,4	0,3	
	V7	61,3	38,1	0,5	
	V4	61,3	37,9	0,5	
	V8	61,1	37,6	0,6	
	V5	61,7	37,6	0,6	
	V12	61,4	38,6	0,3	
	ZR	54,0	24,0	0,5	
ZB	60,5	38,1	0,5		

Tableau A-2.II. Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS
Barycz de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003 (suite)

Date	Réf. puits	Concentration, % v/v			Nmbr de GE en fonct.
		CH ₄	CO ₂	O ₂	
24/10 2002	V9	62,1	38,8	0,4	1
	V10	61,4	39,8	0,3	
	V7	62,2	38,6	0,4	
	V4	62,1	38,5	0,5	
	V8	62,0	38,9	0,4	
	V5	61,9	37,1	0,6	
	V12	62,6	38,1	0,3	
	ZR	55,1	25,2	0,3	
25/10 2002	V9	63,0	39,2	0,3	1
	V10	63,2	39,0	0,3	
	V7	63,2	38,9	0,3	
	V4	63,1	38,8	0,3	
	V8	63,8	38,4	0,3	
	V5	63,7	38,7	0,3	
	V12	63,8	38,6	0,3	
	ZR	63,3	38,8	0,3	
04/11 2002	V9	62,0	38,9	0,5	2
	V10	61,6	40,3	0,3	
	V7	62,0	38,5	0,5	
	V4	62,8	38,6	0,5	
	V8	61,6	37,9	0,7	
	V5	62,6	37,9	0,5	
	V12	63,2	38,1	0,3	
	ZR	55,0	25,4	0,5	
05/11 2002	V9	63,7	39,1	0,3	1
	V10	63,0	39,8	0,3	
	V8	63,2	39,1	0,3	
	V5	63,4	39,2	0,3	
	V12	63,8	38,5	0,3	
	ZR	62,5	34,7	0,7	
	ZB	63,5	40,1	0,3	
	06/11 2002	V9	63,8	38,8	
V10		63,3	39,8	0,3	
V8		63,6	39,2	39,2	
V5		63,5	39,5	39,5	
V12		63,9	38,3	38,3	
ZR		60,4	27,2	27,2	
ZB		63,5	39,9	39,9	
07/11 2002		V9	63,3	39,8	0,3
	V10	62,5	40,7	0,3	
	V8	63,4	39,7	0,3	
	V5	63,1	39,5	0,3	
	V12	63,3	38,8	0,3	
	ZR	61,9	21,1	0,3	
	ZB	62,8	39,3	0,3	
	08/11 2002	V9	62,3	38,6	0,3
V10		61,9	39,2	0,3	
V8		63,0	38,5	0,3	
V5		62,6	38,8	0,3	
V12		62,7	37,7	0,3	
ZR		63,2	27,5	0,4	
ZB		62,8	39,1	0,3	
18/11 2002		V9	62,6	38,7	0,4
	V10	61,5	40,1	0,3	
19/11 2002	V7	62,3	39,1	0,4	1
	V4	61,9	38,9	0,5	
	V8	62,4	39,1	0,3	
	V5	62,9	39,0	0,3	
	V12	62,9	38,2	0,3	
	ZR	61,8	29,8	0,4	
	ZB	62,5	39,4	0,3	
21/11 2002	V9	62,5	38,5	0,4	1
	V10	61,8	39,5	0,3	
	V8	62,4	38,8	0,3	
	V5	62,7	38,4	0,3	
	V12	62,5	38,2	0,3	
	ZR	64,1	23,0	0,4	
	ZB	62,6	39,5	0,3	
22/11 2002	V9	62,5	39,1	0,3	1
	V10	61,4	40,0	0,3	
	V7	62,7	39,0	0,5	
	V4	62,4	39,0	0,5	
	V8	62,4	38,8	0,3	
	V5	62,7	38,8	0,3	
	V12	62,6	38,1	0,4	
ZR	63,3	26,6	0,4		
02/12 2002	V9	62,2	38,8	0,4	1
	V10	61,2	40,6	0,3	
	V8	62,6	39,0	0,4	
	V5	62,8	38,6	0,3	
	V12	62,4	38,2	0,3	
	ZR	63,0	26,0	0,5	
	ZB	63,0	38,0	0,5	
03/12 2002	V9	61,2	37,5	0,3	1
	V10	61,8	38,2	0,3	
	V5	61,6	38,7	0,3	
	V12	61,7	38,9	0,3	
	ZR	62,0	27,5	0,5	
04/12 2002	V9	61,2	38,9	0,3	1
	V10	61,3	39,5	0,3	
	V8	61,5	38,8	0,3	
	V5	61,5	38,5	0,3	
	V12	62,3	38,7	0,3	
05/12 2002	V9	61,9	39,3	0,5	1
	V10	61,4	40,2	0,5	
	V7	62,4	39,1	0,4	
	V4	62,4	38,9	0,4	
	V8	62,5	39,3	0,4	
	V5	62,6	39,0	0,4	
	V12	63,0	37,8	0,4	
ZB	61,7	40,0	0,5		
05/12 2002	V9	62,1	39,6	0,3	1
	V10	61,6	40,3	0,4	
	V7	61,5	40,1	0,4	
	V4	61,7	40,1	0,4	
	V8	62,4	39,9	0,4	
	V5	62,5	39,5	0,3	
	V12	63,2	38,8	0,9	
	ZR	62,4	26,4	0,5	
	ZB	62,3	39,6	0,5	

Tableau A-2.II. Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS Barycz de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003 (suite)

Date	Réf. puits	Concentration, % v/v			Nmbr de GE en fonct.
		CH ₄	CO ₂	O ₂	
16/12 2002	V9	61,0	38,0	0,5	3
	V10	60,5	40,0	0,3	
	V7	60,2	38,7	0,5	
	V4	59,7	39,5	0,7	
	V8	60,6	37,6	0,5	
	V5	59,2	37,5	0,5	
	V12	63,0	38,5	0,3	
	ZR	51,3	23,5	0,5	
	ZB	61,5	38,9	0,5	
17/12 2002	V9	59,8	38,7	0,8	3
	V10	60,1	40,7	0,5	
	V7	59,7	38,6	0,7	
	V4	60,2	38,5	0,7	
	V8	60,1	37,7	0,7	
	V5	58,5	36,6	0,7	
	V12	62,6	37,9	0,3	
	ZR	50,4	23,3	0,7	
	ZB	61,1	38,6	0,5	
18/12 2002	V9	59,3	37,5	0,7	3
	V10	60,3	39,1	0,4	
	V7	60,4	37,9	0,5	
	V4	60,4	38,0	0,5	
	V8	60,1	37,2	0,5	
	V5	57,2	35,2	0,9	
	V12	62,8	38,0	0,3	
	ZR	48,4	23,1	0,7	
	ZB	61,3	39,0	0,5	
19/12 2002	V9	59,3	38,1	0,7	3
	V10	59,9	40,0	0,4	
	V7	60,3	38,1	0,5	
	V4	59,6	37,4	0,7	
	V8	59,3	36,8	0,7	
	V5	59,6	38,0	0,7	
	V12	62,8	38,4	0,3	
	ZR	46,5	22,6	0,8	
	ZB	61,1	38,0	0,5	
20/12 2002	V9	59,1	38,0	0,8	3
	V10	59,6	39,7	0,4	
	V7	60,4	38,3	0,5	
	V4	60,3	38,1	0,5	
	V8	60,0	37,9	0,5	
	V5	57,4	36,1	1,0	
	V12	62,5	38,0	0,3	
	ZR	50,5	23,5	0,5	
	ZB	61,2	39,5	0,4	
06/01 2003	V9	62,0	38,3	0,6	3
	V10	61,7	39,8	0,3	
	V7	61,8	37,3	0,7	
	V4	61,8	38,0	0,6	
	V8	61,7	37,8	0,6	
	V5	62,8	38,8	0,5	
	V12	64,0	37,1	0,3	
	ZR	46,6	22,0	1,0	
	ZB	59,3	38,9	0,8	
07/01 2003	V9	61,8	38,4	0,8	3
	V10	61,3	40,9	0,4	
	V7	61,2	37,9	0,5	
08/01 2003	V4	62,5	38,3	0,5	3
	V8	60,2	37,0	1,3	
	V5	60,2	37,0	1,0	
	V12	64,0	37,8	0,3	
	ZR	48,0	23,5	0,8	
	ZB	61,1	38,6	1,0	
09/01 2003	V9	61,3	37,2	0,5	3
	V10	61,0	38,9	0,4	
	V7	61,6	38,4	0,5	
	V4	60,7	37,0	0,8	
	V8	60,5	37,0	1,0	
	V5	60,8	37,2	0,8	
	V12	63,4	37,0	0,3	
	ZR	47,3	23,2	0,9	
	ZB	60,7	37,9	0,9	
10/01 2003	V9	61,5	37,6	0,5	3
	V10	60,2	39,3	0,5	
	V7	61,3	37,6	0,5	
	V4	61,2	37,7	0,6	
	V8	61,4	37,5	0,7	
	V5	59,0	35,9	1,3	
	V12	63,7	36,9	0,4	
	ZR	49,2	23,4	0,5	
	ZB	62,5	40,0	0,5	
20/01 2003	V9	61,3	38,2	0,6	3
	V10	61,5	40,4	0,3	
	V7	62,1	38,1	0,6	
	V4	58,8	36,6	1,5	
	V8	61,9	37,9	0,6	
	V5	60,5	36,7	1,0	
	V12	63,9	37,5	0,3	
	ZR	47,3	22,8	0,9	
	ZB	59,6	37,6	1,1	
21/01 2003	V9	59,3	37,0	1,0	2
	V10	59,4	40,0	0,5	
	V7	60,5	37,4	0,7	
	V4	60,0	36,8	1,0	
	V8	61,1	38,3	0,6	
	V5	60,3	37,2	1,0	
	V12	63,8	36,7	0,4	
	ZR	54,0	23,6	0,8	
	ZB	60,6	36,7	0,6	
22/01 2003	V9	60,2	37,5	0,6	3
	V10	60,0	39,4	0,5	
	V7	60,5	38,0	0,6	
	V4	60,8	37,8	0,6	
	V8	60,1	37,1	0,9	
	V5	60,5	37,0	0,8	
	V12	63,6	37,1	0,4	
	ZR	55,3	24,1	0,5	
	ZB	60,7	38,2	0,5	
06/01 2003	V9	59,1	37,1	1,0	3
	V10	59,4	39,5	0,6	
	V7	60,3	37,4	0,7	
	V4	60,1	37,0	0,9	
	V8	60,4	38,0	0,7	
	V5	59,5	37,1	1,1	
07/01 2003	V12	62,8	37,0	0,5	3
	ZR	54,0	24,1	0,5	
	ZR	54,0	24,1	0,5	

Tableau A-2.II. Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS Barycz de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003 (suite)

Date	Réf. puits	Concentration, % v/v			Nmbr de GE en fonct.
		CH ₄	CO ₂	O ₂	
23/01 2003	V9	59,7	37,1	0,9	3
	V10	60,1	38,6	0,5	
	V7	60,2	37,6	0,8	
	V4	59,9	37,8	0,8	
	V8	59,1	37,0	1,0	
	V5	59,2	36,9	0,9	
	V12	62,3	36,7	0,5	
	ZR	52,1	24,3	0,6	
	ZB	60,3	38,2	0,6	
03/02 2003	V9	55,1	34,9	2,5	3
	V10	60,8	38,6	0,5	
	V7	61,2	38,3	0,5	
	V4	61,4	38,0	0,5	
	V8	61,7	37,9	0,6	
	V5	58,9	36,8	1,2	
	V12	63,7	37,2	0,3	
	ZR	54,7	24,4	0,5	
	ZB	61,4	38,9	0,5	
04/02 2003	V9	60,5	38,0	0,7	3
	V10	60,5	38,9	0,5	
	V7	60,6	37,9	0,6	
	V4	61,0	37,8	0,7	
	V8	60,1	37,8	0,9	
	V5	60,2	37,6	1,0	
	V12	63,3	37,5	0,5	
	ZR	52,5	24,6	0,5	
	ZB	61,5	39,2	0,5	
05/02 2003	V9	63,0	38,6	0,4	3
	V10	62,2	40,0	0,3	
	V7	61,0	37,8	0,6	
	V4	60,7	37,8	0,9	
	V8	61,1	37,6	0,8	
	V5	60,2	37,0	1,0	
	V12	64,0	37,4	0,4	
	ZR	52,0	24,4	0,6	
	ZB	61,8	38,6	0,6	
06/02 2003	V9	62,5	39,1	0,5	3
	V10	61,9	24,7	0,4	
	V7	62,1	38,9	0,5	
	V4	62,0	38,0	0,6	
	V8	62,1	39,5	0,5	
	V5	61,1	37,7	0,9	
	V12	64,3	37,6	0,4	
	ZR	51,5	37,3	0,6	
	ZB	62,2	36,7	0,5	
07/02 2003	V9	59,4	37,0	0,9	2
	V10	60,4	39,3	0,5	
	V7	59,5	36,5	1,0	
	V4	60,2	37,0	0,9	
	V8	60,3	36,7	0,8	
	V5	59,0	36,0	1,0	
	V12	63,1	36,8	0,5	
	ZR	49,4	23,4	0,5	
	ZB	61,0	38,7	0,5	
24/02 2003	V9	60,0	38,4	0,6	2
	V10	60,4	37,5	0,5	
	V7	59,9	37,6	0,8	
25/02 2003	V4	60,6	37,6	0,6	2
	V8	60,1	37,2	1,2	
	V5	61,7	38,8	0,5	
	V12	63,0	36,5	0,5	
	ZR	48,4	21,4	0,5	
	ZB	61,4	38,6	0,4	
26/02 2003	V9	60,5	37,1	0,5	2
	V10	60,5	37,4	0,5	
	V7	61,2	37,6	0,4	
	V4	61,3	37,5	0,4	
	V8	61,4	38,9	0,8	
	V5	61,4	37,3	0,4	
	V12	63,2	37,6	0,4	
	ZR	49,6	22,5	0,5	
	ZB	61,6	38,4	0,4	
27/02 2003	V9	62,3	38,5	0,4	2
	V10	61,9	38,1	0,4	
	V7	62,2	38,1	0,4	
	V4	61,9	37,8	0,5	
	V8	61,6	38,1	0,5	
	V5	62,0	37,4	0,5	
	V12	64,1	36,2	0,3	
	ZR	50,1	21,8	0,5	
	ZB	61,9	38,3	0,4	
28/02 2003	V9	62,3	37,4	0,5	2
	V10	61,4	37,2	0,5	
	V7	62,0	38,0	0,5	
	V4	60,7	36,6	0,8	
	V8	60,5	38,2	0,5	
	V5	60,8	37,9	0,5	
	V12	62,8	35,7	0,5	
	ZR	50,9	22,8	0,5	
	ZB	61,8	38,2	0,5	
10/03 2003	V9	60,4	38,2	0,5	2
	V10	60,2	38,6	0,5	
	V7	60,5	38,5	0,5	
	V4	59,9	38,1	0,7	
	V8	59,7	39,1	0,5	
	V5	59,1	36,8	1,0	
	ZR	49,8	21,8	0,6	
	ZB	60,2	38,9	0,5	
	11/03 2003	V9	60,8	36,2	
V10		61,0	36,7	0,4	
V7		61,3	36,7	0,5	
V4		60,3	36,0	0,6	
V8		59,4	38,7	0,4	
V5		60,8	36,0	0,6	
V12		62,6	35,6	0,4	
ZR		46,0	22,5	0,4	
ZB		61,3	37,0	0,4	
11/03 2003	V9	60,0	36,2	0,8	2
	V10	60,1	37,0	0,4	
	V7	60,9	36,7	0,3	
	V4	61,8	36,3	0,4	
	V8	59,4	39,0	0,4	
	V5	62,4	37,3	0,3	
	V12	63,0	35,5	0,3	
	ZR	46,5	21,3	0,5	
	ZB	61,2	37,3	0,5	

Tableau A-2.II. Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS
Barycz de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003 (suite)

Date	Réf. puits	Concentration, % v/v			Nmbr de GE en fonct.
		CH ₄	CO ₂	O ₂	
12/03 2003	V9	60,4	36,5	0,6	2
	V10	60,5	37,0	0,4	
	V7	60,2	36,5	0,6	
	V4	59,5	36,8	1,0	
	V8	59,0	38,9	0,5	
	V5	59,7	37,9	0,5	
	V12	62,2	36,0	0,5	
	ZR	46,2	21,7	0,6	
	ZB	61,0	37,5	0,6	
13/03 2003	V9	60,0	37,0	0,8	2
	V10	60,3	37,5	0,7	
	V7	60,9	37,0	0,5	
	V4	60,8	37,1	0,6	
	V8	59,4	39,8	0,5	
	V5	59,7	38,8	0,8	
	V12	62,3	36,6	0,5	
	ZR	46,3	22,7	0,6	
	ZB	61,5	37,5	0,6	
14/03 2003	V9	60,5	36,7	0,7	2
	V10	60,1	36,8	0,7	
	V7	61,0	37,0	0,6	
	V4	60,8	36,6	0,7	
	V8	59,5	38,9	0,5	
	V5	60,5	36,9	0,6	
	V12	62,3	35,8	0,5	
	ZR	46,5	22,9	0,6	
	ZB	61,3	37,8	0,5	
24/03 2003	V9	60,7	37,7	0,6	1
	V10	60,7	38,0	0,4	
	V7	61,0	38,0	0,4	
	V4	61,0	38,2	0,4	
	V8	60,1	38,4	0,5	
	V5	61,3	38,0	0,5	
	V12	62,4	36,5	0,4	
	ZR	60,6	37,7	0,5	
	ZB	61,0	38,5	0,5	
25/03 2003	V9	58,8	36,5	0,8	2
	V10	59,2	36,8	0,5	
	V7	59,8	37,0	0,4	
	V4	58,9	36,2	0,5	
	V8	58,7	39,1	0,4	
	V5	59,2	37,0	0,4	
	V12	61,4	35,8	0,4	
	ZR	45,2	20,4	0,5	
	ZB	60,8	36,7	0,5	
26/03 2003	V9	59,1	37,0	0,7	2
	V10	57,4	36,9	0,8	
	V7	59,6	37,0	0,5	
	V4	59,4	37,1	0,5	
	V8	58,5	39,2	0,5	
	V5	58,5	36,8	0,8	
	ZR	43,4	21,0	0,5	
	ZB	60,2	37,0	0,5	
	27/03 2003	V9	59,2	36,7	
V10		60,6	38,2	0,7	
V7		59,3	36,8	0,8	
V4		59,2	37,0	0,8	
07/04 2003	V8	58,2	39,3	0,5	
	V5	59,0	35,9	0,9	
	V12	61,3	35,9	0,6	
	ZR	43,8	20,8	0,6	
	ZB	61,0	37,2	0,6	
07/04 2003	V9	58,8	36,4	0,8	2
	V10	59,3	37,2	0,6	
	V7	58,2	36,0	0,6	
	V4	59,1	37,0	0,5	
	V8	58,9	36,8	0,5	
	V5	58,9	37,2	0,5	
	V12	61,4	36,4	0,4	
	ZR	45,5	21,8	0,8	
	ZB	60,2	38,6	0,7	
08/04 2003	V9	60,3	37,0	0,6	2
	V10	59,9	36,9	0,6	
	V7	59,2	36,4	0,8	
	V4	58,8	36,0	0,9	
	V8	60,1	38,3	0,5	
	V5	59,0	35,6	0,8	
	V12	62,2	36,0	0,5	
	ZR	44,4	21,8	0,8	
	ZB	61,0	37,5	0,5	
09/04 2003	V9	59,1	36,9	1,1	2
	V10	60,2	37,4	0,5	
	V7	60,1	37,0	0,6	
	V4	60,3	37,0	0,5	
	V8	60,0	37,5	0,5	
	V5	60,1	37,2	0,5	
	V12	62,0	36,9	0,5	
	ZR	45,1	21,3	0,5	
	ZB	60,8	38,0	0,5	
10/04 2003	V9	58,6	35,7	1,0	2
	V10	58,4	37,7	0,8	
	V7	58,8	37,5	0,8	
	V4	58,4	37,3	0,7	
	V8	59,0	37,1	0,8	
	V5	57,9	36,4	1,0	
	V12	61,3	35,9	0,6	
	ZR	46,7	38,6	0,9	
	ZB	59,3	38,6	0,7	
11/04 2003	V9	58,6	35,9	1,5	2
	V10	58,4	37,9	1,0	
	V7	59,2	37,8	0,7	
	V4	58,9	37,6	0,8	
	V8	59,5	38,5	0,5	
	V5	59,0	37,1	0,9	
	V12	61,4	35,8	0,6	
	ZR	45,3	21,2	0,9	
	ZB	58,7	39,0	0,7	
22/04 2003	V9	58,8	35,6	1,0	2
	V10	58,2	35,9	0,6	
	V7	58,5	35,7	0,5	
	V4	59,0	36,2	0,5	
	V8	58,9	36,7	0,5	
	V5	59,1	36,6	0,5	
	V12	61,3	35,3	0,5	
	ZR	43,0	20,6	0,8	
	ZB	60,5	37,9	0,5	

Tableau A-2.II. Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS Barycz de février 2002 à juillet 2002 et d'octobre 2002 à mai 2003 (suite)

Date	Réf. puits	Concentration, % v/v			Nmbr de GE en fonct.
		CH ₄	CO ₂	O ₂	
23/04 2003	V9	59,6	36,6	0,8	2
	V10	59,5	36,6	0,5	
	V7	59,4	36,5	0,5	
	V4	60,0	36,6	0,5	
	V8	58,9	37,3	0,6	
	V5	58,3	36,9	1,0	
	V12	61,3	35,4	0,4	
	ZR	42,5	20,8	0,5	
ZB	59,5	36,6	0,5		
25/04 2003	V9	60,0	36,5	0,7	2
	V10	60,2	36,3	0,6	
	V7	59,9	36,1	0,7	
	V4	59,6	35,9	0,9	
	V8	59,2	37,6	0,5	
	V5	60,2	35,6	0,7	
	V12	61,8	35,3	0,5	
	ZR	39,5	20,2	1,0	
ZB	58,8	36,9	0,7		
05/05 2003	V9	55,5	35,5	1,6	2
	V10	57,0	37,6	0,7	
	V7	57,5	38,2	0,6	
	V4	56,1	36,7	1,0	
	V8	58,4	38,2	0,5	
	V5	56,1	36,4	0,8	
	V12	60,0	35,5	0,6	
	ZR	43,0	20,5	1,0	
ZB	56,7	38,1	1,0		
06/05 2003	V9	56,2	35,7	1,3	2
	V10	54,8	36,2	1,2	
	V7	56,8	37,0	1,0	
	V4	55,8	36,6	0,9	
	V8	57,9	37,6	0,6	
	V5	54,8	35,3	1,3	
	V12	60,1	35,4	0,6	
	ZR	44,4	20,1	0,7	
ZB	61,0	37,1	0,6		
07/05 2003	V9	56,7	35,6	1,4	2
	V10	57,4	38,1	0,8	
	V7	57,4	38,0	0,7	
	V4	57,2	37,3	0,8	
	V8	58,6	38,6	0,9	
	V5	56,0	36,2	0,9	
	V12	60,4	35,7	0,7	
	ZR	41,8	20,5	0,9	
ZB	57,7	38,3	0,8		
08/05 2003	V9	59,7	38,4	0,6	1
	V10	59,6	38,4	0,6	
	V7	60,0	38,3	0,5	
	V4	59,8	38,6	0,6	
	V8	60,4	37,1	0,6	
	V5	60,1	38,6	0,5	
	V12	61,7	36,0	0,6	
	ZR	53,1	24,9	0,7	
ZB	60,0	38,7	0,6		
09/05 2003	V9	57,6	37,4	0,8	2
	V10	56,6	37,0	0,9	
	V7	57,8	37,6	0,8	
	V4	57,5	38,2	0,9	
	V8	58,4	38,7	0,5	
	V5	55,8	36,6	1,0	
	V12	60,8	36,3	0,6	
	ZR	44,9	18,9	0,8	
	ZB	58,2	38,6	0,7	
19/05 2003	V9	58,9	37,5	0,7	2
	V10	58,8	37,3	0,6	
	V7	56,6	37,3	1,3	
	V4	58,6	38,2	0,8	
	V8	59,1	37,6	0,7	
	V5	58,7	37,8	0,6	
20/05 2003	V12	60,4	36,0	0,5	2
	ZR	40,3	19,2	1,0	
	ZB	57,7	38,9	0,6	
	V9	59,1	36,5	0,8	
	V10	59,6	37,1	0,6	
	V7	59,2	37,0	0,8	
21/05 2003	V4	59,5	36,9	0,7	2
	V8	59,0	38,2	0,5	
	V5	58,5	36,1	0,9	
	V12	61,3	36,1	0,5	
	ZR	37,8	19,2	1,0	
	ZB	59,2	37,0	0,6	
22/05 2003	V9	59,6	37,4	0,6	2
	V10	59,8	37,2	0,5	
	V7	58,9	37,5	0,6	
	V4	59,2	36,7	0,8	
	V8	58,8	38,4	0,6	
	V5	59,2	37,2	1,0	
23/05 2003	V12	61,3	36,0	0,5	2
	ZR	37,7	19,2	1,0	
	ZB	59,3	37,9	0,8	
	V9	60,3	35,8	0,9	
	V10	60,8	37,8	0,4	
	V7	60,4	36,6	0,6	
23/05 2003	V4	59,4	36,3	1,0	2
	V8	59,6	38,3	0,5	
	V5	59,8	35,9	0,8	
	V12	62,5	36,3	0,4	
	ZR	39,2	19,5	0,8	
	ZB	60,3	37,1	0,9	
23/05 2003	V9	60,1	35,7	0,8	2
	V10	59,9	37,2	0,6	
	V7	60,0	37,0	0,6	
	V4	59,8	36,9	0,5	
	V8	59,9	36,7	0,6	
	V5	59,9	36,2	0,7	
	V12	61,7	36,2	0,5	
	ZR	42,3	20,0	0,8	
	ZB	60,2	37,0	0,6	

ANNEXE 3

.....

Les mesures de données « biogaz » effectuées
sur le réseau de dégazage de CDS Barycz
d'octobre 2003 à mai 2004

Tableau A-3.III. Mesures de données « biogaz » effectuées sur le réseau de dégazage de CDS
Barycz d'octobre 2003 à mai 2004

Date	Réf. puits	Concentration, % v/v			Nmbr de GE en fonct.
		CH ₄	CO ₂	O ₂	
15/10 2003	ZR ZB	36,2 60,3	22,4 39,0	0,8 0,5	2
16/10 2003	ZR ZB	35,9 62,2	23,3 39,3	0,7 0,3	2
17/10 2003	ZR ZB	37,2 61,2	22,0 39,2	0,5 0,5	2
26/11 2003	ZR ZB	44,0 64,8	22,8 37,9	0,8 0,5	2
27/11 2003	ZR ZB	43,4 64,7	22,7 37,8	0,7 0,5	2
28/11 2003	ZR ZB	43,0 64,9	22,8 37,8	0,7 0,5	2
11/12 2003	ZR ZB	46,9 66,2	23,5 37,7	0,8 0,5	2
17/12 2003	ZR ZB	52,1 65,2	24,6 41,8	0,8 0,3	1
18/12 2003	ZR ZB	56,0 64,0	23,3 39,2	0,6 0,4	1
07/01 2004	ZR ZB	62,0 67,9	27,2 38,4	0,5 0,3	1
09/01 2004	ZR ZB	62,7 66,1	27,4 40,3	0,4 0,3	1
13/01 2004	ZR ZB	66,1 67,0	37,2 38,1	0,4 0,3	1
14/01 2004	ZR ZB	66,1 67,0	37,2 37,7	0,5 0,3	1
15/01 2004	ZR ZB	64,9 65,5	38,3 39,0	0,5 0,3	1
16/01 2004	ZR ZB	63,3 65,5	39,0 40,2	0,4 0,3	0
10/02 2004	ZR ZB	42,1 66,1	24,6 39,0	0,4 0,3	2
11/02 2004	ZR ZB	48,9 65,2	25,5 39,8	0,5 0,5	2
24/02 2004	ZR ZB	9,5 66,8	26,2 37,4	0,5 0,4	1
25/02 2004	ZR ZB	59,3 65,4	25,3 39,1	0,5 0,4	1
26/02 2004	ZR ZB	63,6 65,7	28,1 38,4	0,5 0,4	1
08/03 2004	ZR ZB	47,8 66,7	21,4 37,3	0,5 0,4	2
09/03 2004	ZR ZB	47,2 65,9	21,3 37,9	0,8 0,4	3
10/03 2004	ZR ZB	47,7 65,5	20,9 36,8	0,8 0,5	3
11/03 2004	ZR ZB	44,0 65,4	20,7 37,2	0,9 0,5	3
15/03 2004	ZR ZB	42,0 65,3	19,8 36,5	1,0 0,5	2
16/03 2004	ZR ZB	41,6 64,4	19,2 35,2	1,0 0,6	3
17/03 2004	ZR ZB	40,9 64,4	19,2 35,0	1,0 0,6	3
18/03 2004	ZR ZB	41,8 64,6	19,2 36,1	1,0 0,5	3
22/03 2004	ZR ZB	44,1 64,8	20,0 37,2	1,0 0,5	2
23/03 2004	ZR ZB	44,7 64,7	19,9 37,3	1,0 0,5	3
24/03 2004	ZR ZB	46,6 64,5	20,1 37,2	0,9 0,5	3
25/03 2004	ZR ZB	42,5 64,7	20,7 39,5	1,0 0,5	2
29/03 2004	ZR ZB	48,8 65,5	23,1 37,7	0,9 0,5	3
30/03 2004	ZR ZB	42,6 64,7	19,2 35,6	1,0 0,7	3
31/03 2004	ZR ZB	44,6 65,2	19,4 36,6	0,9 0,5	3
01/04 2004	ZR ZB	43,1 65,2	19,4 37,0	1,0 0,5	3
05/04 2004	ZR ZB	47,3 65,5	19,6 37,5	0,5 0,5	3
06/04 2004	ZR ZB	66,6 67,0	38,6 38,6	0,5 0,5	1
07/04 2004	ZR ZB	67,2 67,1	38,5 38,9	0,5 0,5	1
14/04 2004	ZR ZB	44,0 66,0	19,8 36,6	0,9 0,6	2
15/04 2004	ZR ZB	43,3 67,5	19,3 35,6	0,8 0,4	2
16/04 2004	ZR ZB	43,8 67,1	18,9 35,2	0,8 0,5	2
19/04 2004	ZR ZB	43,9 65,4	19,4 37,2	0,7 0,6	2
20/04 2004	ZR ZB	41,1 66,1	19,7 37,4	0,8 0,6	2
21/04 2004	ZR ZB	49,2 66,3	27,4 37,1	0,6 0,5	2
27/04 2004	ZR ZB	38,4 64,1	18,0 35,7	0,8 0,7	2
29/04 2004	ZR ZB	48,0 66,2	18,6 36,7	0,8 0,5	2
05/05 2004	ZR ZB	45,9 65,0	18,9 39,1	0,9 0,6	2
06/05 2004	ZR ZB	46,6 67,0	19,3 37,9	0,6 0,4	2
07/05 2004	ZR ZB	42,3 66,3	19,0 36,7	0,9 0,6	2
11/05 2004	ZR ZB	37,5 65,0	19,3 36,2	0,9 0,6	2
12/05 2004	ZR ZB	38,0 66,0	19,0 37,3	0,9 0,5	2
13/05 2004	ZR ZB	39,9 65,6	18,9 36,8	0,8 0,5	2
14/05 2004	ZR ZB	39,2 65,9	20,6 36,7	0,8 0,6	2
18/05 2004	ZR ZB	37,8 67,0	18,6 36,4	0,8 0,5	2
19/05 2004	ZR ZB	37,2 66,4	19,0 36,8	0,9 0,6	2
20/05 2004	ZR ZB	38,2 66,2	18,9 37,3	0,9 0,5	2

ANNEXE 4

.....

Exemples des graphes mensuels
préparés avec les données récupérées
à Borde-Matin (juillet 2003)

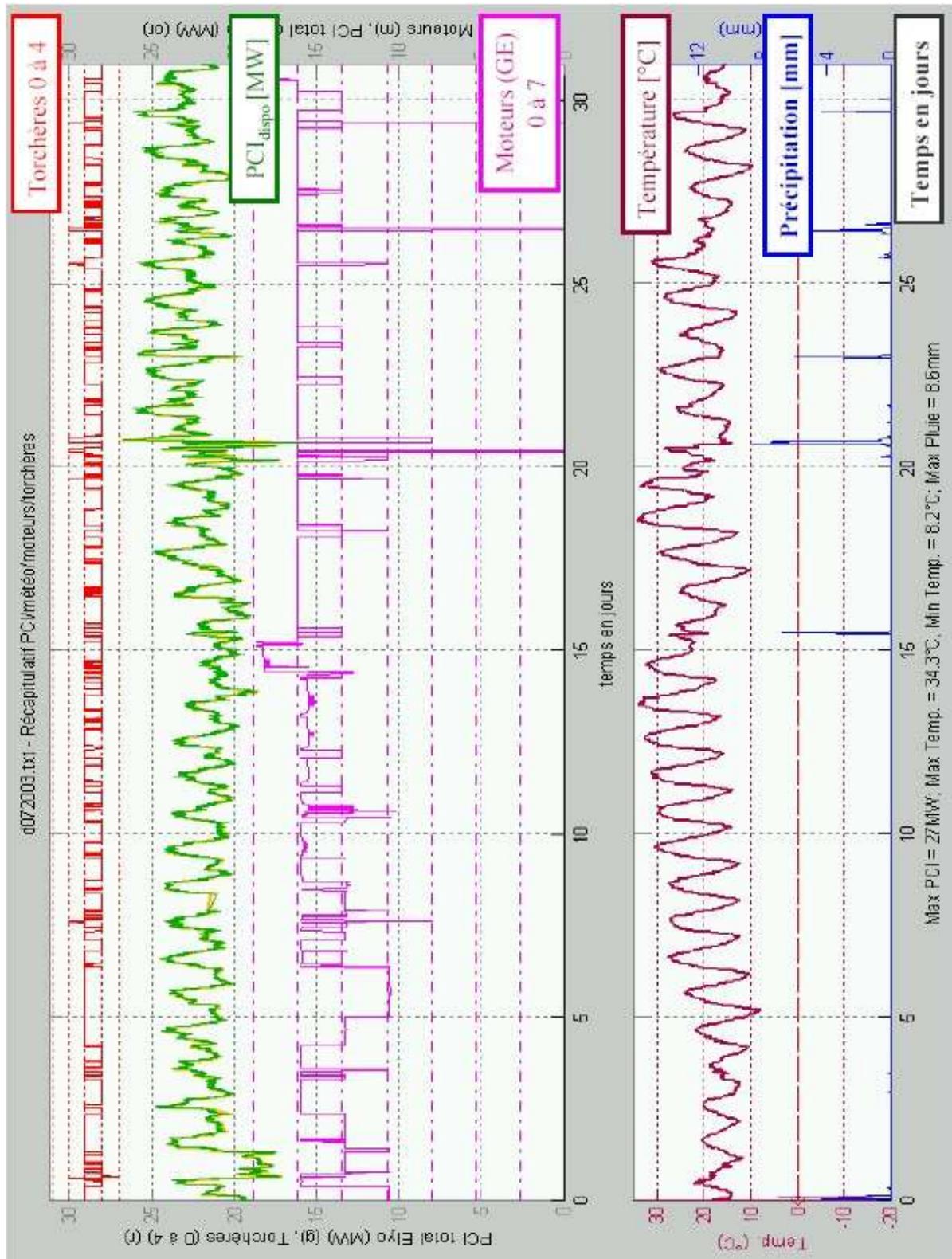


Fig. A-4.I. Exemple des graphes mensuels de la variation des paramètres météorologiques et des paramètres « biogaz » à Borde-Matin (juillet 2003)

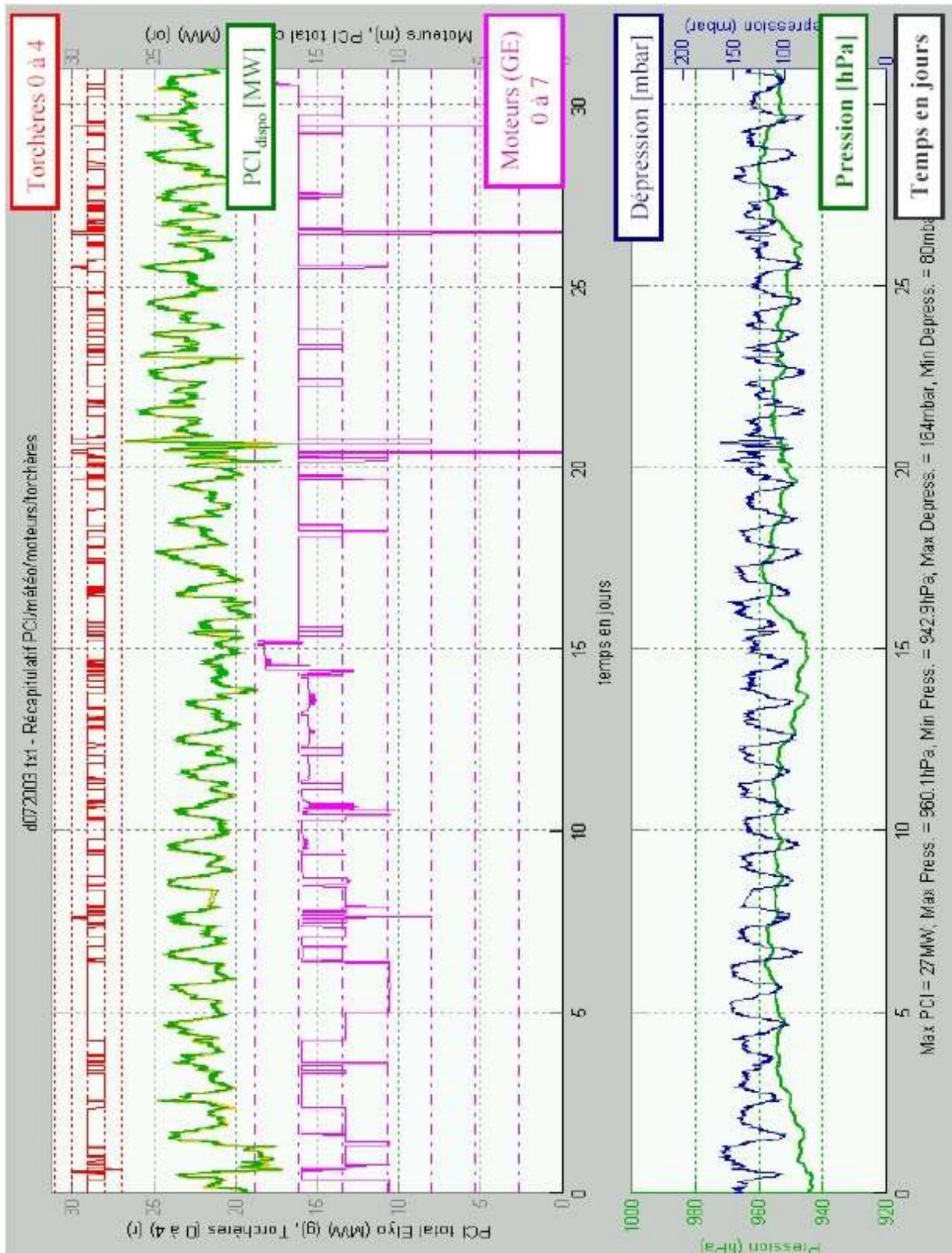


Fig. A-4.II. Exemple des graphes mensuels de la variation des paramètres météorologiques et des paramètres « biogaz » à Borde-Matin (juillet 2003)

ANNEXE 5

.....

Exemples des graphes mensuels
préparés avec les données récupérées
à Barycz (mai 2003)

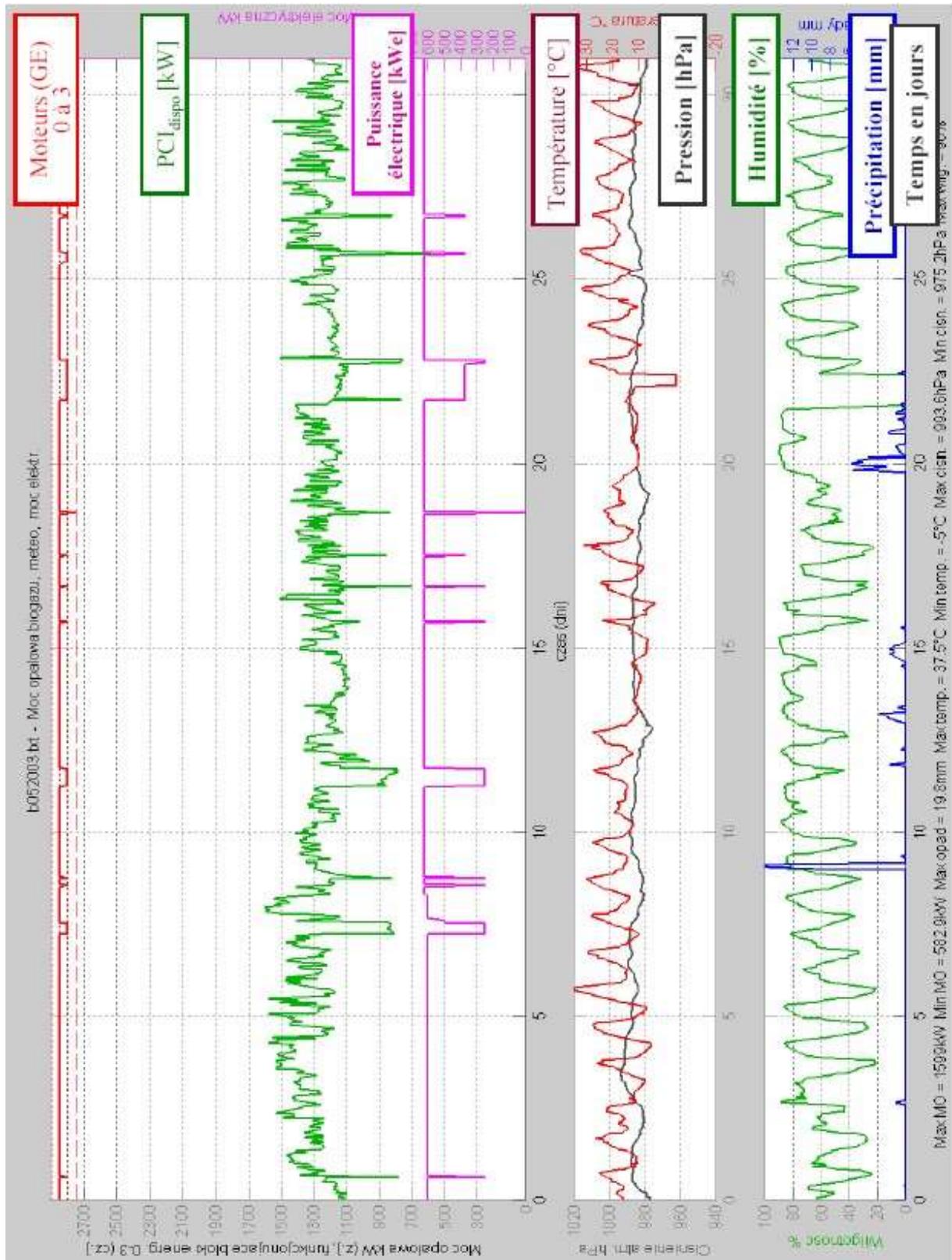


Fig. A-5.III. Exemple des graphes mensuels de la variation des paramètres météorologiques et des paramètres « biogaz » à Barycz (mai 2003)

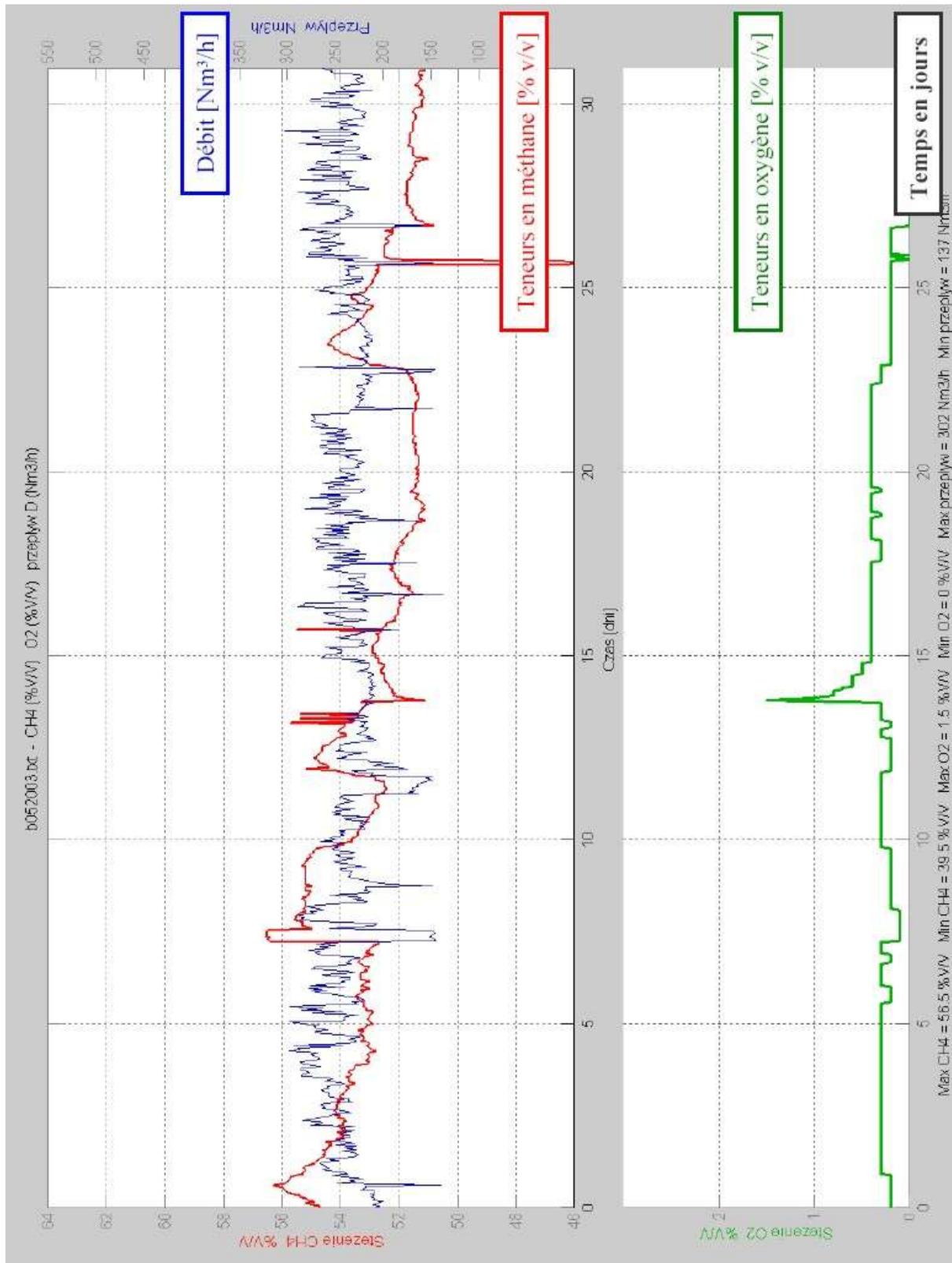


Fig. A-5.IV. Exemple des graphes mensuels de la variation des paramètres « biogaz » à Barycz (mai 2003)

ANNEXE 6

.....

Code pour l'identification des modèles

PLUIE → PCI_{dispo}


```

%% Modèle PLUIE -> PCIdispo ; 24 XI 2003
clear all; close all; confcolo;
cverm=eval(['version']); iverm = real(cverm(1:1))-48;
chem='D:\MMeres\Calculs\Modele_pluie\'; dts=30*60;
%%Marges des figures :
marg=0.05; mard=0.05; marb=0.05; marh=0.05;
hspdm=0.15; %%hauteur 1/4 des 2 ssplots en bas.
icar=11; %%'fontsize'
ilinw=2; %%'linewidth'
imars=9; %%'MarkerSize'
iann=input('Choisissez l'année : ');
imois=input('Choisissez le mois : ');
echant=100*iann+imois;
nomm=['m',int2str(echant),'.txt'];
nomt=['t',int2str(echant),'.txt'];
%%Matrice valeurs météo :
eval(['load ',nomm,'];');
eval(['matm=',nomm(1:findstr('.',nomm)-1),'];');
eval(['clear ',nomm(1:findstr('.',nomm)-1),'];');
%%Matrice valeurs biogaz (PCI) :
eval(['load ',nomt,'];');
eval(['matt=',nomt(1:findstr('.',nomt)-1),'];');
eval(['clear ',nomt(1:findstr('.',nomt)-1),'];');
%%Choix temps début et fin de l'évènement pluvieux
ifrag=0;
if echant==200103,
    tdeb=15.5000; tfin=17.0000; end;
%% ... etc. (d'autres fragments de données pour analyse)
[dpluie, dpci]= fextrmorc(tdeb,tfin,matm,matt);
if 1,
    spp=subplot('position', [marg, marb, 1-marg-mard, 1-(marb+marh) ]);
    subplot(spp);
    plot(dpluie(:,1),dpluie(:,2),'-b', 'linewidth', 3); hold on; grid;
    plot(dpci(:,1),dpci(:,2),'-g', 'linewidth', 2);
    xlabel('Jours','fontsize',icar); ylabel('pluie en mm, PCI en MW',
        'fontsize',icar);
    legend('Pluie','PCI',2);
    title([date, ' - [',num2str(echant),'] Visualisation du segment PCI vs.
pluie'],'fontsize',icar); end;
input('>> ENTER pour continuer...'); [dpcic]=fbouchtrou(dpluie, dpci);
if 1,
    clf
    spp=subplot('position', [marg, marb, 1-marg-mard, 1-(marb+marh) ]);
    subplot(spp);
    plot(dpcic(:,1),dpcic(:,2),'LineStyle','-','Marker','.','Color',db);
    hold on; grid;
    xlabel('Jours','fontsize',icar); ylabel('PCI en MW','fontsize',icar);
    title([date, ' - [',num2str(echant),'] Segment PCI complété'],'
        'fontsize',icar); end;
input('>> ENTER pour continuer...');
ldpluie=length(dpluie); aa=0.75;
[dpci6, dpcim, dpcif]=fadaptpci(dpluie, dpcic, aa);
dessinPCI
chx=menu('Pointez la valeur "zero" du PCI sur la figure...', 'Continuer');
[XPCI, YPCI]=ginput(1);
dpcid=dpcif; dpcid(:,2)=dpcid(:,2)-YPCI;
if 1,
    plot(dpcid(:,1),dpcid(:,2),'-r', 'linewidth', 2); end;
input('>> ENTER pour continuer...');
pci_cen=dpcid(:,2); tt_cen=dpcid(:,1);
tt_pluie=dpluie(:,1); pluie=dpluie(:,2);
modelise

```


ANNEXE 7

.....

Code pour l'identification du modèle

DEBIT \rightarrow CH₄


```

%% Badanie relacji Przeplyw (Q) -> CH4; 23 II 2004, 07 IV 2004
clear all; close all; confcol;
chemdon='D:\MMeres_PL\Biogaz_pl\';
path([chemdon,'trait_donn'],path);
inp=menu('Wybierz zapis:', 'przeplyw0.txt', 'przeplyw.txt')-1;
if inp==0, nomprzepl='przeplyw0.txt';
else nomprzepl='przeplyw.txt'; end;
chxd=menu('Dopisac DATY wartosci?', 'NIE', 'Tak')-1;
clear Aprzepl Zprzepl Ach4 Zch4 Ks vdata
fid=fopen(nomprzepl);
for ii=1:1:100,
    line = fgetl(fid);
    if ~isstr(line), break, end
    vitab=findstr(line,char(9));
    Aprzepl(ii)=str2num(line(1:vitab(1)-1)); % Amplituda Nm3/h
    Zprzepl(ii)=str2num(line(vitab(1)+1:vitab(2)-1)); % Zero Nm3/h
    Ach4(ii)=str2num(line(vitab(2)+1:vitab(3)-1)); % Amplituda %V/V
    Zch4(ii)=str2num(line(vitab(3)+1:vitab(4)-1)); % Zero %V/V
    Ks(ii)=-str2num(line(vitab(4)+1:vitab(5)-1)); % wspolczynnik Ks
    data=line(vitab(5)+1+1:length(line)-1); % t1-t2.m.rr
if ii==1, vdata=data; else
    vdata=strvcat(vdata, data); end;
end
fclose(fid); numval=ii-1;
if 0,
    Aprzepl=noprzepl(:,1); Zprzepl=noprzepl(:,2);
    Ach4=noprzepl(:,3); Zch4=noprzepl(:,4);
    Ks=-noprzepl(:,5); data=noprzepl(:,6); end;
marg=0.05; mard=0.05; marb=0.07; marh=0.05;
hspdm=0.15; hspbh=(1- 2*marb- marh)/2; icar=11; ilinw=2; imars=9;
%%-----> Figure 1. Zalezność Ks od amplitud: Q i CH4 <-----
hfig1=figure;
set(hfig1, 'NumberTitle', 'off');
set(hfig1, 'name', 'Ks, amplituda: Q i CH4' );
sph=subplot('position', [marg marb+hspbh+marb 1-marg-mard hspbh] );
title([date, ' - Zalezność Ks vs. amplituda: {\Delta}[CH_4] (%v/v) i przeplywu
{\Delta}Q (Nm^3/h)', '(',int2str(numval),' wartosci)'], 'fontsize', icar);
hold on; grid;
spb=subplot('position', [marg marb 1-marg-mard hspbh]); hold on; grid;
subplot(spb);
set(sph, 'XLim', [0 200], 'XTick', [0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
200], 'YLim', [min(Ks)-0.005 0 ], 'YTick', revec(-1*[0 0.01 0.02 0.03 0.04
0.05]), 'fontsize', icar);
plot(Aprzepl, Ks, 'diamond', 'linewidth', 2, 'color', 'b');
if chxd,
text(Aprzepl, Ks, vdata, 'fontangle','italic', 'color', 'b',
'VerticalAlignment','bottom'); end;
ylabel('Wspolczynnik Ks', 'fontsize', icar);
xlabel('Amplituda przeplywu {\Delta}Q (Nm^3/h)', 'fontsize', icar);
subplot(spb);
apas=0.25; [PA,SA]=polyfit( Ach4 , Ks , 1);
Ach4i=[0, min(Ach4)-apas:apas:max(Ach4)+2*apas]; Ksp=polyval(PA, Ach4i );
plot(Ach4i, Ksp, '--m', 'linewidth', 1.5);
plot(0 , 0, '.k'); plot( Ach4 , Ks , 'o', 'linewidth', 2, 'color', 'r');
if chxd,
text(Ach4, Ks, vdata, 'fontangle','italic', 'color', 'r',
'VerticalAlignment','bottom'); end;
ylabel('Wspolczynnik Ks', 'fontsize', icar);
xlabel(['Amplituda {\Delta}[CH_4] (% v/v) (a=', num2str(PA(1)), ',
b=', num2str(PA(2)), ')'], 'fontsize', icar); legend('R^2 = 0.86', 0);
set(spb, 'XLim', [0 max(Ach4i)], 'XTick', [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10], 'YLim',
[min(Ks)-0.005 0], 'YTick', revec(-1*[0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05]),
'fontsize', icar);

```

```

%%-----> Figure 2. Zaleznosc Ks od wartosci pocz.: Q i CH4 <-----
hfig2=figure;
set(hfig2, 'NumberTitle', 'off');
set(hfig2, 'name', 'Ks, wartosc pocz.: Q i CH4' );
sph=subplot('position', [marg marb+hspbh+marb 1-marg-mard hspbh]);
title([date, ' - Zaleznosc Ks vs. wartosc pocz.: [CH_4]_i_n_i_t (%v/v) i
przeplewu Q_i_n_i_t (Nm^3/h)', (' ,int2str(numval), ' wartosci)'], 'fontsize',
icar); hold on; grid;
spb=subplot('position', [marg marb 1-marg-mard hspbh] ); hold on; grid;
subplot(sph);
set(sph, 'XLim', [min(Zprzepl)-5 max(Zprzepl)+10], 'YLim', [min(Ks)-0.005 0],
'YTick', revect(-1*[0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05]), 'fontsize', icar);
plot(Zprzepl, Ks, 'square', 'linewidth', 2, 'color', 'b');
if chxd,
text(Zprzepl, Ks, vdata, 'fontangle', 'italic', 'color', 'b',
'VerticalAlignment', 'bottom'); end;
ylabel('Wspolczynnik Ks', 'fontsize', icar);
xlabel('Wartosc pocz. przeplewu Q_i_n_i_t (Nm^3/h)', 'fontsize', icar);
subplot(spb);
zpas=0.5; [PZ, SZ]=polyfit(Zch4, Ks, 2);
Zch4i=[min(Zch4)-zpas:zpas:max(roots(PZ))+zpas]; Ksp=polyval(PZ, Zch4i);
plot(Zch4i, Ksp, '--m', 'linewidth', 1.5);
plot(Zch4, Ks, '*', 'linewidth', 2, 'color', 'r');
if chxd,
text(Zch4, Ks, vdata, 'fontangle', 'italic', 'color', 'r',
'VerticalAlignment', 'bottom'); end;
ylabel('Wspolczynnik Ks', 'fontsize', icar);
xlabel(['Wartosc pocz. [CH_4]_i_n_i_t (% v/v). (Ks=0 dla [CH_4]_i_n_i_t
=', num2str(max(roots(PZ)), 4), '% v/v)'], 'fontsize', icar);
legend('R^2 = 0.85', 0)
set(spb, 'XLim', [min(Zch4i) max(Zch4i)], 'YLim', [min(Ks)-0.005 0 ], 'YTick',
revect(-1*[0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05]), 'fontsize', icar);
%%-----> Figure 3. Zaleznosc Ks od wartosci poczatkowych: Q i CH4
hfig3=figure;
set(hfig3, 'NumberTitle', 'off'); set(hfig3, 'name', 'Ks, pocz.: Q i CH4' );
plot3(Zprzepl, Zch4, Ks, 'x', 'linewidth', 4, 'color', 'g'); hold on; grid;
xlabel('Q', 'fontsize', icar); ylabel('CH4', 'fontsize', icar);
zlabel('Ks', 'fontsize', icar);
title([date, ' - Zaleznosc Ks vs. wart. poczatkowa: [CH_4]_i_n_i_t (%v/v) i
przeplewu Q_i_n_i_t (Nm^3/h)', (' ,int2str(numval), ' wartosci)'], 'fontsize',
icar);
%% %%-----> Figure 4. AQ od ACH4 <-----
hfig4=figure;
set(hfig4, 'NumberTitle', 'off'); set(hfig4, 'name', 'AQ vs. ACH4' );
sph=subplot('position', [marg marb 1-marg-mard 1-marb-marh]);
title([date, ' - Zaleznosc {\Delta}Q (Nm^3/h) vs. {\Delta}[CH_4] (% v/v)'],
'fontsize', icar); hold on; grid;
subplot(sph);
set(sph, 'XLim', [min(Ach4)-1 max(Ach4)+1], 'fontsize', icar)
Ach4_sort=[1, sort(Ach4)];
Aprzepl_s = Ach4_sort./(PA(1).*Ach4_sort + PA(2)); plot(Ach4_sort,
Aprzepl_s, '+m', 'linewidth', 2);
calc=plot(Ach4_sort, Aprzepl_s, ':m', 'linewidth', 2);
mes=plot(Ach4, -Aprzepl, 'diamond', 'linewidth', 2, 'color', 'b');
if chxd,
text(Ach4, -Aprzepl, vdata, 'fontangle', 'italic', 'color', 'b',
'VerticalAlignment', 'bottom'); end;
if chxd,
text(Ach4, Aprzepl, vdata, 'fontangle', 'italic', 'color', 'b',
'VerticalAlignment', 'bottom'); end;
legend([mes, calc], 'Wartosci mierzone', 'Wartosci obliczone', 1);
ylabel('{\Delta}Q (Nm^3/h)', 'fontsize', icar);
xlabel('{\Delta}[CH_4] (% v/v)', 'fontsize', icar);

```

ANNEXE 8

.....

Résultats des calculs de corrélations annuelles (ACP),
sous forme de la matrice des corrélations,
pour les données de 2001, 2002, 2003 et 2004
à Borde-Matin

Abréviations utilisées dans les tableaux :

PCI – puissance calorifique inférieure, MW

R1, R2, R3 – réseaux de captage de biogaz 1, 2, 3

CH₄, CO₂, O₂ – teneurs en méthane, dioxyde de carbone, oxygène, % v/v

D – dépression dans les réseaux, mbar

Q - débit du biogaz, Nm³/h

R – rapport CH₄/CO₂

Pluie – précipitation, mm

Temp – température atmosphérique, °C

T_{max}-T_{min} – différence entre température maximale et minimale, °C

Hum – humidité, %

Press – pression atmosphérique, hPa

Tableau A-8.IV. Résultats des calculs de corrélations pour les données de 2001-Borde-Matin

2001	Press	Hum	T _{max} - T _{min}	Temp	Pluie	R3					R2					R1					PCI			
						R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	R	Q	D		O ₂	CO ₂	CH ₄
PCI	0,21	0,56	-0,32	-0,47	0,00	0,43	0,12	0,18	0,24	-0,18	0,38	0,39	0,50	-0,02	0,20	-0,18	0,38	0,12	0,37	-0,13	-0,16	0,27	0,37	1,00
CH ₄	-0,01	0,18	-0,09	-0,17	-0,04	0,32	-0,19	0,29	0,15	-0,27	0,50	0,33	0,15	0,04	0,14	-0,29	0,54	0,17	0,22	0,06	-0,49	0,35	1,00	
CO ₂	-0,02	0,22	-0,20	-0,26	-0,01	0,03	0,00	-0,04	0,10	0,40	0,13	0,04	-0,02	-0,05	0,15	0,22	0,03	-0,35	0,13	0,04	-0,42	1,00		
O ₂	-0,02	-0,11	0,03	-0,02	-0,05	-0,34	0,09	-0,14	0,55	0,10	-0,26	-0,38	0,12	0,04	0,45	0,36	-0,09	0,00	-0,24	-0,04	1,00			
D	-0,22	0,06	-0,25	-0,39	0,01	-0,34	0,42	0,22	0,14	0,08	-0,39	-0,22	-0,63	0,68	0,06	-0,07	-0,44	-0,42	0,29	1,00				
Q	-0,25	0,39	-0,40	-0,64	0,01	0,02	-0,19	0,00	0,12	-0,37	0,13	0,14	-0,36	-0,04	0,29	-0,56	0,02	-0,36	1,00					
R	0,31	-0,11	0,31	0,46	-0,02	0,69	0,01	0,26	-0,27	0,00	0,38	0,61	0,48	-0,03	-0,18	0,06	0,54	1,00						
CH ₄	0,10	0,12	0,05	0,10	0,03	0,54	-0,33	0,21	0,05	-0,26	0,66	0,52	0,48	-0,34	0,05	-0,04	1,00							
CO ₂	0,13	-0,07	0,09	0,16	-0,01	-0,30	0,44	-0,16	0,10	0,67	-0,36	-0,42	0,02	0,10	-0,20	1,00								
O ₂	-0,08	0,10	-0,19	-0,38	-0,12	-0,09	-0,22	-0,10	0,73	-0,10	0,09	-0,03	0,13	-0,10	1,00									
D	0,00	0,07	-0,12	-0,20	0,02	-0,07	0,58	0,37	0,06	0,22	-0,32	-0,03	-0,29	1,00										
Q	0,27	0,05	0,14	0,24	0,02	0,47	-0,23	0,10	0,14	-0,16	0,47	0,33	1,00											
R	0,19	0,07	0,08	0,17	0,01	0,95	-0,15	0,48	-0,32	-0,12	0,60	1,00												
CH ₄	-0,01	0,08	0,07	0,10	0,09	0,64	-0,62	0,18	-0,23	-0,05	1,00													
CO ₂	0,03	-0,09	0,07	0,12	0,03	-0,07	0,31	-0,05	-0,24	1,00														
O ₂	-0,01	0,11	-0,21	-0,44	-0,17	-0,34	0,04	-0,14	1,00															
D	0,02	0,04	-0,02	0,11	0,07	0,45	0,34	1,00																
Q	0,26	0,21	-0,15	-0,16	-0,06	-0,15	1,00																	
R	0,27	0,05	0,14	0,23	-0,01	1,00																		
Pluie	-0,26	0,22	-0,17	0,07	1,00																			
Temp	0,01	-0,64	0,61	1,00																				
T _{max} -T _{min}	0,15	-0,61	1,00																					
Hum	0,17	1,00																						
Press	1,00																							

Tableau A-8.V. Résultats des calculs de corrélations pour les données de 2002-Borde-Matin

2002	Press	Hum	T _{max} -T _{min}	Temp	Pluie	R3					R2					R1					PCI		
						R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	R	Q	D		O ₂	CO ₂
PCI	-0,04	0,37	-0,39	-0,75	0,08	0,05	0,66	0,61	0,24	0,04	0,07	-0,05	0,54	0,23	0,29	0,09	0,20	-0,27	0,91	0,11	0,33	0,25	1,00
CH ₄	-0,03	0,05	-0,14	-0,19	-0,02	-0,05	0,14	0,14	0,05	-0,03	-0,07	-0,03	0,06	-0,01	0,02	0,03	-0,03	-0,10	0,19	-0,24	0,32	1,00	
CO ₂	-0,15	0,27	-0,26	-0,14	0,14	-0,52	-0,03	-0,04	0,01	0,57	0,33	-0,60	0,18	0,26	0,18	0,61	0,21	-0,97	0,30	-0,06	1,00		
O ₂	0,10	0,23	0,01	-0,26	-0,05	-0,09	0,05	0,12	0,72	0,11	0,07	-0,11	0,02	0,29	0,82	0,11	0,02	0,01	0,05	1,00			
D	0,04	0,31	-0,29	-0,67	0,03	0,16	0,60	0,55	0,19	0,06	0,17	0,03	0,44	0,17	0,28	0,00	0,20	-0,25	0,83	1,00			
Q	-0,13	0,37	-0,37	-0,64	0,07	-0,08	0,40	0,37	0,23	0,10	0,06	-0,08	0,13	0,07	0,33	0,11	0,11	-0,28	1,00				
R	0,16	-0,26	0,23	0,08	-0,14	0,53	0,08	0,09	0,00	-0,62	-0,37	0,63	-0,19	-0,28	-0,18	-0,65	-0,22	1,00					
CH ₄	-0,01	0,20	-0,11	-0,08	0,16	-0,04	0,04	0,01	-0,07	0,21	0,22	-0,09	0,27	0,32	0,00	0,20	1,00						
CO ₂	-0,31	0,24	-0,22	-0,08	0,14	-0,84	-0,18	-0,16	-0,07	0,64	0,22	-0,98	0,12	0,21	-0,09	1,00							
O ₂	0,12	0,24	-0,06	-0,34	-0,01	0,06	0,20	0,26	0,82	0,03	0,07	0,09	0,00	0,25	1,00								
D	-0,04	0,42	-0,12	0,03	0,19	-0,02	-0,08	-0,08	0,07	0,35	0,38	-0,18	0,57	1,00									
Q	0,12	0,25	-0,19	-0,38	0,10	0,18	0,45	0,42	-0,02	0,14	0,27	-0,09	1,00										
R	0,32	-0,21	0,20	0,06	-0,12	0,85	0,19	0,17	0,07	-0,62	-0,20	1,00											
CH ₄	0,05	0,27	-0,06	0,09	0,07	0,07	-0,42	-0,42	-0,39	0,85	1,00												
CO ₂	-0,16	0,33	-0,16	0,10	0,13	-0,46	-0,48	-0,46	-0,37	1,00													
O ₂	0,15	0,11	-0,01	-0,42	-0,08	0,05	0,40	0,45	1,00														
D	0,16	-0,05	-0,14	-0,65	-0,05	0,17	0,93	1,00															
Q	0,11	-0,02	-0,21	-0,65	-0,05	0,21	1,00																
R	0,40	-0,15	0,20	-0,03	-0,13	1,00																	
Pluie	-0,32	0,33	-0,31	-0,01	1,00																		
Temp	-0,12	-0,32	0,36	1,00																			
T _{max} -T _{min}	0,26	-0,57	1,00																				
Hum	-0,08	1,00																					
Press	1,00																						

Tableau A-8.VI. Résultats des calculs de corrélations pour les données de 2003-Borde-Matin

2003	Press	Hum	Temp	Pluie	R3						R2						R1						PCI	
					R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄		
R 1	PCI	-0,03	-0,47	0,00	-0,17	0,49	0,41	-0,10	0,40	0,55	-0,10	-0,10	0,71	-0,01	0,27	0,54	0,03	0,59	0,63	0,07	0,10	0,45	1,00	
	CH ₄	0,03	-0,14	0,41	0,01	0,25	0,48	0,13	0,19	0,41	0,13	0,64	0,13	0,19	0,92	0,24	0,08	0,08	0,40	0,22	0,00	1,00		
	CO ₂	-0,01	-0,57	-0,02	-0,58	0,67	0,35	-0,51	0,54	0,16	-0,56	0,00	0,13	-0,56	0,89	-0,02	-0,97	-0,11	-0,17	-0,69	1,00			
	O ₂	-0,01	0,13	0,06	0,44	-0,55	0,01	0,86	-0,34	0,00	0,71	0,05	0,12	0,94	-0,63	0,25	0,71	0,30	0,49	1,00				
	D	-0,15	-0,47	0,20	-0,12	0,09	0,50	0,31	0,33	0,48	0,25	0,34	0,62	0,49	-0,13	0,39	0,26	0,77	1,00					
	Q	-0,15	-0,27	0,03	-0,06	0,06	0,28	0,22	0,19	0,30	0,20	0,22	0,25	0,36	-0,17	0,11	0,12	1,00						
	R	0,02	0,52	0,10	0,56	-0,58	-0,24	0,52	-0,47	-0,05	0,91	0,10	0,04	0,57	-0,81	0,24	1,00							
	CH ₄	0,05	-0,14	0,26	0,05	0,21	0,42	0,13	0,17	0,43	0,05	0,49	0,62	0,10	0,24	1,00								
	CO ₂	-0,01	-0,53	0,01	-0,54	0,69	0,40	-0,53	0,55	0,25	-0,95	0,26	0,30	-0,65	1,00									
	O ₂	-0,02	0,06	0,06	0,37	-0,52	0,02	0,85	-0,31	-0,02	0,69	-0,11	0,02	1,00										
	D	-0,01	-0,34	0,27	-0,20	0,48	0,56	-0,02	0,43	0,54	-0,11	0,64	1,00											
	Q	0,08	-0,34	-0,13	-0,06	0,33	0,21	-0,15	0,27	0,47	-0,11	1,00												
R	0,02	0,50	0,05	0,56	-0,63	-0,29	0,57	-0,50	-0,12	1,00														
R 2	CH ₄	0,07	-0,42	0,10	-0,15	0,29	-0,32	0,57	1,00															
	CO ₂	-0,11	-0,57	0,01	-0,90	0,60	-0,53	1,00																
	O ₂	-0,02	0,13	0,08	0,49	-0,53	0,01	1,00																
	D	-0,06	-0,55	0,36	-0,11	0,36	1,00																	
	Q	-0,06	-0,51	0,14	-0,56	1,00																		
	R	0,17	0,47	0,04	1,00																			
R 3	Pluie	-0,24	-0,02	1,00																				
	Temp	0,01	1,00																					
	T _{max} -T _{min}	0,23	1,00																					
	Hum	-0,03	1,00																					
	Press	1,00																						

Tableau A-8.VII. Résultats des calculs de corrélations pour les données de 2004-Borde-Matin

2004	Press	Hum	T _{max} - T _{min}	Temp	Pluie	R3					R2					R1					PCI			
						R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	R	Q	D		O ₂	CO ₂	CH ₄
PCI	-0,09	0,58	-0,47	-0,71	-0,01	-0,65	0,58	0,15	-0,55	0,68	0,19	-0,39	0,64	0,79	-0,62	0,66	0,67	-0,28	0,63	0,52	-0,50	0,60	0,61	1,00
CH ₄	-0,03	0,24	-0,09	-0,25	0,00	-0,25	0,57	-0,01	-0,42	0,52	0,09	0,06	0,08	0,46	-0,68	0,64	0,78	0,18	0,27	0,34	-0,43	0,57	1,00	
CO ₂	-0,11	0,35	-0,21	-0,26	0,05	-0,18	0,17	0,37	-0,39	0,67	0,01	-0,03	0,37	0,37	-0,46	0,85	0,42	-0,02	0,48	0,50	-0,35	1,00		
O ₂	-0,04	-0,19	0,13	0,17	0,01	0,37	-0,45	0,13	0,72	-0,56	-0,02	0,00	-0,18	-0,48	0,81	-0,50	-0,47	-0,11	-0,27	-0,27	1,00			
D	0,03	0,43	-0,26	-0,47	-0,01	-0,39	0,22	0,02	-0,27	0,42	-0,02	-0,27	0,10	0,45	-0,35	0,49	0,36	-0,11	0,71	1,00				
Q	-0,07	0,44	-0,36	-0,44	0,02	-0,48	0,17	0,16	-0,26	0,43	0,00	-0,40	0,15	0,31	-0,34	0,50	0,34	-0,13	1,00					
R	0,24	-0,32	0,32	0,67	-0,02	0,65	-0,14	0,04	-0,10	0,09	-0,15	0,82	-0,41	-0,14	-0,29	0,19	0,16	1,00						
CH ₄	0,07	0,34	-0,21	-0,36	-0,04	-0,40	0,46	-0,04	-0,51	0,64	0,13	0,03	0,21	0,66	-0,82	0,72	1,00							
CO ₂	0,04	0,38	-0,22	-0,23	0,01	-0,25	0,20	0,35	-0,54	0,79	-0,01	0,06	0,36	0,56	-0,76	1,00								
O ₂	-0,12	-0,26	0,14	0,18	0,04	0,36	-0,48	0,02	0,69	-0,69	-0,02	-0,08	-0,17	-0,63	1,00									
D	-0,06	0,47	-0,34	-0,53	0,02	-0,52	0,43	0,06	-0,53	0,67	0,24	-0,24	0,63	1,00										
Q	-0,15	0,45	-0,38	-0,51	0,01	-0,52	-0,01	0,40	-0,26	0,39	0,19	-0,30	1,00											
R	0,18	-0,33	0,31	0,64	-0,03	0,81	-0,18	-0,08	-0,01	-0,01	-0,16	1,00												
CH ₄	-0,07	0,19	-0,15	-0,17	0,05	-0,13	0,11	0,00	-0,51	0,45	1,00													
CO ₂	0,03	0,41	-0,28	-0,30	-0,01	-0,37	0,34	0,14	-0,83	1,00														
O ₂	-0,08	-0,29	0,21	0,19	0,03	0,33	-0,43	0,00	1,00															
D	-0,04	0,05	-0,05	0,09	0,04	0,11	-0,43	1,00																
Q	0,04	0,23	-0,20	-0,48	-0,06	-0,50	1,00																	
R	0,06	-0,42	0,36	0,75	0,04	1,00																		
Pluie	-0,20	0,27	-0,21	0,05	1,00																			
Temp	0,13	-0,65	0,57	1,00																				
T _{max} -T _{min}	0,26	-0,69	1,00																					
Hum	-0,10	1,00																						
Press	1,00																							

ANNEXE 9

.....

Résultats des calculs de corrélations (ACP),
sous forme de la matrice des corrélations,
pour les données de 2002 à 2004 à Borde-Matin

Abréviations utilisées dans le tableau :

PCI – puissance calorifique inférieure, MW

R1, R2, R3 – réseaux de captage de biogaz 1, 2, 3

CH₄, CO₂, O₂ – teneurs en méthane, dioxyde de carbone, oxygène, % v/v

D – dépression dans les réseaux, mbar

Q - débit du biogaz, Nm³/h

R – rapport CH₄/CO₂

Pluie – précipitation, mm

Temp – température atmosphérique, °C

T_{max}-T_{min} – différence entre température maximale et minimale, °C

Hum – humidité, %

Press – pression atmosphérique, hPa

Tableau A-9.VIII. Résultats des calculs de corrélations pour les données de 2002 à 2004

Total	Press	Hum	T _{max} - T _{min}	Temp	Pluie	R3						R2						R1						PCI
						R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	R	Q	D	O ₂	CO ₂	CH ₄	
PCI	-0,04	0,41	-0,34	-0,58	0,01	-0,06	0,31	0,32	-0,22	0,07	0,22	0,11	0,41	0,61	-0,15	-0,04	0,50	0,09	0,70	0,69	-0,09	-0,1	0,48	1,00
CH ₄	-0,01	0,20	-0,12	-0,20	0,15	-0,06	0,31	0,19	-0,20	0,15	0,15	0,11	0,18	0,50	-0,30	0,17	0,77	0,22	0,19	0,31	-0,10	0,03	1,00	
CO ₂	-0,06	0,15	-0,16	-0,22	0,05	-0,59	0,43	-0,05	-0,19	0,75	0,06	-0,71	0,31	-0,05	-0,32	0,90	-0,02	-0,71	-0,47	-0,47	-0,34	1,00		
O ₂	0,01	0,10	0,03	0,05	0,02	0,27	-0,32	0,14	0,74	-0,32	0,02	0,18	0,02	-0,02	0,84	-0,32	-0,15	0,19	0,01	0,07	1,00			
D	0,00	0,29	-0,18	-0,37	0,04	0,29	-0,12	0,26	-0,03	-0,26	0,12	0,50	-0,15	0,44	0,11	-0,45	0,28	0,42	0,87	1,00				
Q	-0,04	0,18	-0,15	-0,28	0,00	0,34	-0,17	0,24	-0,03	-0,35	0,05	0,50	-0,27	0,24	0,10	-0,50	0,17	0,40	1,00					
R	0,12	-0,17	0,22	0,40	0,00	0,72	-0,36	0,12	0,07	-0,44	-0,11	0,89	-0,34	0,06	0,07	-0,51	0,21	1,00						
CH ₄	0,04	0,23	-0,15	-0,24	0,04	-0,17	0,26	0,14	-0,32	0,25	0,17	0,09	0,24	0,57	-0,49	0,26	1,00							
CO ₂	-0,04	0,17	-0,16	-0,18	0,04	-0,60	0,43	0,01	-0,28	0,82	0,04	-0,65	0,42	0,08	-0,49	1,00								
O ₂	-0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,32	-0,35	0,05	0,75	-0,42	0,00	0,20	-0,12	-0,19	1,00									
D	-0,03	0,46	-0,29	-0,42	0,16	-0,16	0,16	0,25	-0,24	0,23	0,34	0,01	0,50	1,00										
Q	-0,01	0,33	-0,26	-0,35	-0,01	-0,35	0,24	0,27	-0,13	0,39	0,25	-0,42	1,00											
R	0,11	-0,17	0,21	0,34	-0,03	0,81	-0,39	0,05	0,10	-0,52	-0,10	1,00												
CH ₄	0,00	0,26	-0,14	-0,18	0,06	-0,09	0,01	0,05	-0,43	0,41	1,00													
CO ₂	-0,06	0,27	-0,21	-0,24	0,04	-0,68	0,42	-0,09	-0,49	1,00														
O ₂	-0,01	-0,05	0,10	0,06	0,03	0,26	-0,24	0,02	1,00															
D	-0,01	0,14	-0,12	-0,15	0,08	0,15	-0,29	1,00																
Q	0,02	0,13	-0,18	-0,42	0,01	-0,52	1,00																	
R	0,13	-0,25	0,26	0,42	0,00	1,00																		
Pluie	-0,25	0,26	-0,22	0,00	1,00																			
Temp	0,01	-0,56	0,51	1,00																				
T _{max} -T _{min}	0,25	-0,64	1,00																					
Hum	-0,06	1,00																						
Press	1,00																							

ANNEXE 10

.....

Résultats des calculs de corrélations (ACP),
pour les données annuelles de 2002, 2003 et 2004,
et pour toutes les données (de 2002 à 2004)
pour les quatre saisons de l'année à Borde-Matin

Tableau A-10.IX. Résultats des calculs de corrélations pour les données annuelles de 2002, 2003, 2004 et pour toutes les données (de 2002 à 2004) pour les quatre saisons de l'année à Borde-Matin

			Précipitation, mm	Température, °C	$T_{\max}-T_{\min}$, °C	Humidité, %	Pression, hPa
PCI, MW	Printemps	2002	0,14	-0,82	-0,37	0,32	-0,30
		2003	-0,07	-0,50	0,14	-0,03	0,05
		2004	0,21	-0,86	-0,52	0,54	-0,46
		Tout	0,06	-0,62	-0,30	0,33	-0,26
	Été	2002	0,07	-0,64	-0,33	0,31	-0,27
		2003	0,07	-0,40	-0,14	0,50	0,13
		2004	0,10	-0,71	-0,20	0,51	0,09
		Tout	0,01	-0,13	0,04	0,05	0,09
	Automne	2002	0,19	-0,71	-0,34	0,22	-0,09
		2003	-0,17	-0,18	0,07	0,18	-0,05
		2004	-0,11	-0,79	-0,20	0,38	-0,04
		Tout	-0,06	-0,49	-0,22	0,20	0,10
	Hiver	2002	0,28	-0,29	-0,09	0,56	-0,08
		2003	-0,05	-0,04	-0,03	0,15	-0,12
		2004	-0,11	-0,21	-0,07	0,10	-0,09
		Tout	0,04	-0,17	-0,07	0,30	-0,11

ANNEXE 11

.....

Résultats des calculs de valeurs moyennes
pour les données annuelles de 2002, 2003 et 2004,
et pour toutes les données (de 2002 à 2004)
pour les quatre saisons de l'année à Borde-Matin

Tableau A-11.X. Résultats des calculs de valeurs moyennes pour les données annuelles de 2002, 2003, 2004 et pour toutes les données (de 2002 à 2004) pour les quatre saisons de l'année à Borde-Matin

Valeurs moyennes		PCI, MW	Précipitation*, mm	Température, °C	T _{max} -T _{min} , °C	Humidité, %	Pression, hPa
Printemps	2002	19882	206,2	11,8	11,4	67,6	950,8
	2003	20518	113,8	14,1	12,4	62,9	952,0
	2004	22671	154,0	11,0	10,2	72,2	950,5
	Tout	20938	474,0	12,4	11,4	67,3	951,1
Été	2002	19756	275,2	14,3	10,9	71,7	951,3
	2003	22071	163,2	20,4	14,0	61,1	953,3
	2004	21310	243,2	18,4	12,4	67,5	952,9
	Tout	20975	681,6	18,6	12,3	68,6	952,9
Automne	2002	21884	268,4	9,4	8,1	83,9	949,3
	2003	22992	361,4	7,9	8,3	84,5	950,3
	2004	25806	270,2	7,3	7,2	84,7	952,8
	Tout	23545	900,0	8,2	7,9	84,3	950,8
Hiver	2002	23235	129,6	5,7	8,2	74,5	954,0
	2003	23387	74,2	2,2	7,6	78,8	953,0
	2004	23745	162,8	2,9	7,3	81,9	951,3
	Tout	23452	366,6	3,6	7,8	78,3	952,9

* somme pour chaque saison

ANNEXE 12

.....

Résultats des calculs de corrélations (ACP),
sous forme de la matrice des corrélations,
pour les données de mars à juin 2003
à Barycz

Tableau A-12.XI. Résultats des calculs de corrélations pour les données de mars à juin 2003 à Barycz

	Teneur en CH ₄ ,	Débit du biogaz	PCI	Pression atmo.	Précipitations	Humidité	Température
Teneur en CH ₄ , % v/v	1,00						
Débit du biogaz, Nm ³ /h	-0,48	1,00					
PCI, kW	-0,26	0,97	1,00				
Pression atmo., hPa	0,18	0,02	0,07	1,00			
Précipitations, mm	0,02	-0,01	0,00	-0,05	1,00		
Humidité, %	-0,05	-0,04	-0,05	-0,10	0,33	1,00	
Température, °C	-0,68	0,40	0,25	-0,26	-0,02	-0,17	1,00

ANNEXE 13

.....

Les données spécifiques de Borde-Matin
utilisées pour la simulation de la production du biogaz
(écrans du logiciel LANDGEM)

Landfill Gas Emissions Model - [Operating Parameters: D:\MMERES\CALCULS\MODELE\2\LANDGEM\BORDEM\1\B...

File Edit Defaults Parameters Reports Utilities Window Help

Year Opened 1973 Current Year 2004 Capacity 14000000 Mg

Waste Value 0 as Refuse in Place (Mg) Acceptance Rate (Mg/Yr)

Year	Acceptance Rate (Mg)	Refuse In Place (Mg)
1973	9.500000E+04	0.000000E+00
1974	9.500000E+04	9.500000E+04
1975	9.500000E+04	1.900000E+05
1976	9.500000E+04	2.850000E+05
1977	9.500000E+04	3.800000E+05
1978	9.500000E+04	4.750000E+05
1979	9.500000E+04	5.700000E+05
1980	9.500000E+04	6.650000E+05
1981	1.027000E+05	7.600000E+05
1982	1.031200E+05	8.627000E+05
1983	1.015000E+05	9.658200E+05
1984	9.710000E+04	1.067320E+06
1985	1.025000E+05	1.164420E+06
1986	1.131000E+05	1.266920E+06
1987	1.270000E+05	1.380020E+06
1988	1.761000E+05	1.507020E+06
1989	1.580000E+05	1.683120E+06
1990	1.719740E+05	1.841120E+06
1991	2.183760E+05	2.013094E+06
1992	2.932790E+05	2.231470E+06
1993	3.527300E+05	2.524749E+06
1994	3.689380E+05	2.877479E+06
1995	3.418960E+05	3.246417E+06
1996	3.868740E+05	3.588313E+06
1997	3.843570E+05	3.975187E+06
1998	3.649440E+05	4.359544E+06
1999	4.250240E+05	4.724488E+06
2000	5.074850E+05	5.149512E+06
2001	5.811250E+05	5.656997E+06
2002	4.024240E+05	6.238122E+06
2003	4.316610E+05	6.640546E+06
2004	4.074240E+05	7.072707E+06

Closure Year

System Calculated

User Specified: 2017

Method 2E Calculator

Average Well Depth (m) 15.5

Average Stabilized Radius of Influence (m) 15

Refuse Density (Mg/m³) 1

Fraction of Decomposable Refuse 25

Methane Generation Potential (L0) (m³/Mg) 20

Average Stabilized Flow Rate per Well (m³/min) 0.33

Average Age of Refuse (years) 10

Calculate → k (1/yr) 0.013614

OK Cancel Help

Air Pollutant Compound Parameters

Methane Percentage (%) 47.00

Carbon Dioxide Percentage (%) 53.00

Fig. A-13.V. Données spécifiques de Borde-Matin utilisées pour la simulation de la production du biogaz (écrans du logiciel LANDGEM)

ANNEXE 14

.....

Les données spécifiques de Barycz
utilisées pour la simulation de la production du biogaz
(écrans du logiciel LANDGEM)

Landfill Gas Emissions Model

File Edit Defaults Parameters Reports Utilities Window Help

Year Opened 1992 Current Year 2005 Capacity 2400000 Mg

Waste Value 0 as Refuse in Place (Mg)
Acceptance Rate (Mg/Yr)

Operating Parameters: D:\MMERES\CALCULS\MODELE~2\LANDGEM\BARYCZ\BARYCZ.PRM

Year	Acceptance Rate (Mg)	Refuse In Place (Mg)
1992	1.359430E+05	0.000000E+00
1993	1.359430E+05	1.359430E+05
1994	1.359430E+05	2.718860E+05
1995	1.740270E+05	4.078290E+05
1996	2.008390E+05	5.826560E+05
1997	2.337830E+05	7.834950E+05
1998	2.518260E+05	1.017278E+06
1999	2.397430E+05	1.269104E+06
2000	1.956650E+05	1.508847E+06
2001	1.697630E+05	1.704512E+06
2002	1.751230E+05	1.874275E+06
2003	1.676580E+05	2.049398E+06
2004	1.710000E+05	2.217056E+06

Air Pollutant Compound Parameters

Methane Percentage (%) 56.00

Carbon Dioxide Percentage (%) 44.00

Method 2E Calculator

Average Well Depth (m) 18

Average Stabilized Radius of Influence (m) 5

Refuse Density (Mg/m³) 1

Fraction of Decomposable Refuse 35

Methane Generation Potential (L0) (m³/Mg) 20

Average Stabilized Flow Rate per Well (m³/min) 0.14

Average Age of Refuse (years) 6

Calculate → k (1/yr) 0.036174

Closure Year 2005

System Calculated

User Specified: 2005

Fig. A-14.VI. Données spécifiques de Barycz utilisées pour la simulation de la production du biogaz (écrans du logiciel LANDGEM)

ANNEXE 15



Code de modèle « EPA-modifié »

Descriptif concis :

Le logiciel simule le modèle « EPA-modifié » selon l'équation (18), en fonction des paramètres k , L_0 et M_i , qui lui sont fournis (k , L_0 : par défaut ou par l'utilisateur, M_i : fichier).

Les valeurs simulées de Q_{CH_4} sont tracées et comparées aux valeurs mesurées *in situ* par les exploitants. Les valeurs M_i , fournies par les exploitants, sont lues dans des fichiers spécifiques, selon le cas d'application choisi : Borde-Matin, Barycz ou Nontaburi. Les paramètres k et L_0 sont soit affectés par défaut (Borde-Matin : $L_0=60$ m³/Mg, $k=0,16$ an⁻¹, Barycz : $L_0=40$ m³/Mg, $k=0,033$ an⁻¹, Nontaburi : $L_0=49,1$ m³/Mg, $k=0,15$ an⁻¹) soit choisis par l'utilisateur. Le modèle peut ainsi être optimisé par l'utilisateur, en effectuant des ajustements progressifs des valeurs des paramètres k , L_0 .


```

%% Modèle "EPA-modifié" 24/5/2004, 11/2004 (Borde-Matin, Barycz, Nontaburi)
clear, close all; confcolo; icar=12;
marg=0.05; mard=0.05; marb=0.07; marh=0.05;
disp('SWANA vs. EPA');
%%By default values:
pch4=0.47; R=100000; ny=30; ny0=1974; nyc=clock;
nyc=nyc(1); nymax=100; L0=60; ta=1.5; k1=0.16; s1=1;
chx=menu(['SWANA vs. EPA          '; 'Parameters by default...?'], 'Yes', 'No')-1;
chf=menu(['SWANA vs. EPA          '; 'Read data from file...?'],
         'No...', 'BMatin', 'Barycz', 'Nontaburi')-1;
if chf==1, L0=60; k1=0.16 ; %%BMatin
elseif chf==2, L0=40; k1=0.033; %%Barycz
elseif chf==3, L0=49.1; k1=0.15 ; %%Nontaburi
else L0=50; k1=0.10 ; %%else... end;
if chx,
    L0=input(['??>> Methane generation capacity L0 (' ,num2str(L0), '
    m3(CH4)/Mg): ']);
    k1=input(['??>> 1st order biogas generation rate const. k1 (' ,num2str(k1),
    ' 1/yr): ']); end;
if chf,
    if chf==1, nomdat='BMatin'; pch4=0.47; end;
    if chf==2, nomdat='Barycz'; pch4=0.56; end;
    if chf==3, nomdat='Nontaburi'; pch4=0.50; end;
    if chf==3,
        chn=menu(['Choose Nontaburi landfill:'], 'B (500871 Mg)', 'C (355432 Mg)', 'A
        (933300 Mg)'); nomdat=[nomdat,int2str(chn)]; end;
        eval(['load ', nomdat, '.dat';]); eval(['nomfi=', nomdat, ';']);
        eval(['clear ', nomdat]); ny0=nomfi(1,1); end;
if ~chf,
    ny0=input(['??>> Year of first waste placement (' ,num2str(ny0), ') : ']);
    pch4=input(['??>> Proportion of CH_4 (' ,num2str(pch4), ' v/v): ']);
    Rfin=6000000; %%Mg
    R0=input(['??>> Average annual acceptance rate of waste R (' ,num2str(R), '
    Mg/yr): ']); end;
clear R
if ~chf,
    R=ones(ny,1)*R0; vyr=ny0+[1:1:ny];
elseif chf==1, %%BMatin
    R=nomfi(:,5); nyr=length(R); Rc=R(nyr); vyr=nomfi(:,1);
    Rcc=input(['??>> Future waste placement prev. Rc (' ,num2str(Rc), ' Mg/yr):
    ']);
    Rfin=input(['??>> Total waste remaining to be placed (6500000 Mg?): ']);
    nyc=max(vyr)+floor(Rfin/Rcc);
elseif chf==2, %%Barycz R=nomfi(:,2); nyr=length(R);
    vyr=nomfi(:,1); Rcc=0, Rfin=0; nyc=max(vyr)+0; Rc=Rcc;
elseif chf==3, %%Nontaburi
    R=nomfi(:,2); nyr=length(R); vyr=nomfi(:,1); Rcc=0, Rfin=0;
    nyc=max(vyr)+0; Rc=Rcc; end; ny=nyc-ny0+1; nymax= round(3.5/k1) + ny;
if Rcc, Rc=Rcc; end;
if ny>nyr,
    R=[R', Rc*ones(1,ny-nyr)]'; vyr=[vyr', [max(vyr)+1:1:max(vyr)+ny-nyr]]'; end;
W=sum(R);
if ~chf,
    disp(['R0=', num2str(R0), ' Mg/yr, W=', num2str(W), ' Mg, ']); end;
disp(['L0=', num2str(L0), ' m3/Mg']);
disp(['k1=', num2str(k1), ' 1/yr, ta=', num2str(ta), ' yr, s1=', num2str(s1), '
1/yr ']);
disp(['ny=', num2str(ny), ' yrs, nymax=', num2str(nymax), ' yrs']); dt=1;
tty=[1:dt:nymax]; GEPA=0*[1:1:nymax]*0;
for ii=1:1:ny,
    GEPAi=(R(ii)*dt)*L0*k1*exp(-k1.*(tty-ta-ii)); GEPAi(1:dt:round(ii))=0;
    GEPA=GEPA+GEPAi; end; GEPA=GEPA/pch4;
    GSWA=max(0, W*L0*((k1+s1)/s1)*(1 - exp(-s1.*(tty-ta-ny))).*k1.*exp(-
    k1.*(tty-ta-ny)) );

```

```

GWSA=GWSA/pch4; close all
MM=10^6; pciminmotrlm=2.688; pciminmotbar=0.96; pciminmotnon=0.300*3;
nhyr=365*24*(11/12); Ech4=10/1000; Elfg=Ech4*pch4; Ecog=0;
if chf==1, ncog=7; Ecog=(nhyr*pciminmotrlm/Elfg); end;
if chf==2, ncog=2; Ecog=(nhyr*pciminmotbar/Elfg); end;
if chf==3, ncog=2; Ecog=(8664*pciminmotnon/Elfg); end;
hswa=figure;
set(hswa, 'numbertitle', 'off', 'name', 'SWANA vs. EPA');
spl=subplot('position', [marg, marb, 1-marg-mard, 1-marb-marh]);
hold on; grid;
set(spl, 'YLim', [ 0 max(max(GEPA/MM), 0 ) ], 'XLim', [ny0-1, ny0+nymax+1],
'fontsize', icar);
pclos=plot( ny*[1,1]+ny0, max(max(GEPA/MM), max(GWSA/MM))*[0,1],
'Linestyle', '-.', 'Color', 'm', 'linewidth', 2);
if chf==1,
    pmes=plot([1994 1995 2000 2001 2002 2003 2004], [9.8 13.1 46.8 53.6 53.7
56.2 58.5], 'o', 'Color', 'r', 'linewidth', 2);
    set(spl, 'YLim', [ 0 max([max(GEPA/MM), 0, 56.2]) ] );
elseif chf==2,
    pmes=plot([2003 2004], [4.3 4.3], 'o', 'Color', 'r', 'linewidth', 2);
    set(spl, 'YLim', [ 0 max([max(GEPA/MM), max(GWSA/MM), 4.3]) ] );
else
    pmes=0; end;
if chf==3,
    load 'nontaburi_rap.dat';
    prap=plot(nontaburi_rap(:,1), nontaburi_rap(:,chn+1)/MM, 'Color', 'g',
'Linestyle', ':', 'linewidth', 2, 'marker', 'diamond', 'markersize', 3 );
    end;
if chf,
    for ii=1:ncog, pmot=plot([min(tty-1+ny0), max(tty-1+ny0)
ii*Ecog*[1,1]/MM, 'Linestyle', '-.', 'Color', 'c', 'linewidth', 2); end;
        if chf==1,
            pmot1=plot([min(tty-1+ny0), max(tty-1+ny0)],
(ncog+1)*Ecog*[1,1]/MM, 'Linestyle', '--', 'Color', 'lg', 'linewidth', 2); end;
        end;
Rdiv=10000; if (chf==2 | chf==3), Rdiv=100000; end;
prii=plot(vyr, R/Rdiv, 'Linestyle', '-', 'Color', 'or', 'linewidth', 1.5,
'marker', 'square', 'markersize', 3);
pepa=plot(tty-1+ny0, GEPA/MM, 'r', 'Linestyle', '-', 'linewidth', 2,
'markersize', 4);
if chf>2, pswa=plot(tty-1+ny0, GWSA/MM, 'b', 'Linestyle', '--', 'linewidth',
2); end;
if chf==1,
    legend([pepa, pmot, pmot1, prii, pclos, pmes], 'EPA-modifié', 'Mm^3
LFG/engine', 'LFG safety margin', ['x', int2str(Rdiv/1000), ' Gg waste/yr'],
'Closure year', 'Values \it{in situ}', 1);
elseif chf==2,
    legend([pepa, pmot, prii, pclos, pmes], 'EPA-modifié', 'Mm^3 LFG/engine',
['x', int2str(Rdiv/1000), ' Gg waste/yr'], 'Closure year', 'Values \it{in situ}',
1);
elseif chf==3,
    legend([pepa, pswa, prap, pmot, prii, pclos], 'EPA-modifié', 'SWANA', 'Nontaburi
study', 'Mm^3 LFG/engine', ['x', int2str(Rdiv/1000), ' Gg waste/yr'], 'Closure
year', 1); end;
title([date, ' - LFG generation prediction models (c) KS+MM-ENSM.SE 2005']);
if chf
    xlabel(['Time (years). Data: ', nomdat, ', ', L_0= ', num2str(L0), ' m^3
CH_4/Mg and', ' k= ', num2str(k1), ' year^-^1, Rc= ', int2str(Rc), ' Mg/yr, ',
nyc= ', int2str(nyc)], 'fontsize', icar);
else
    xlabel('Time (years)', 'fontsize', icar); end;
ycar=['LFG generation (Mm^3/year) with [CH_4]=', num2str(pch4*100, 3), '% v/v'];
ylabel(ycar, 'fontsize', icar)

```

ANNEXE 16

.....

Résumé des données spécifiques de Barycz et Borde-Matin
utilisées pour la simulation de la production du biogaz

Tableau A-16.XII. Résumé des données spécifiques de Barycz et Borde-Matin utilisées pour la simulation de la production du biogaz

Paramètres	CDS Borde-Matin	CDS Barycz II
Année d'ouverture	1974	1992
Année de fermeture	<i>calculé</i> à la base de tonnage et capacité	2005
Tonnage de déchets stockés (Mg/an)	entre 95 000 et 581 000 <i>voir Annexe 13</i> pour détails	entre 136 000 et 252 000 <i>voir Annexe 14</i> pour détails
Capacité (Mg)	14 000 000	2 400 000
Teneurs en méthane (% v /v)	47	56
Production du biogaz (année : données <i>in situ</i> , MNm ³)	1994 : 9,8 1995 : 13,1 2000 : 46,8 2001 : 53,6 2002 : 53,7 2003 : 56,2 2004 : 58,5	2003 : 4,3 2004 : 4,3

