

**Programme FIRST
Convention n°9813730
Rapport Final – Novembre 2000**

**Contrôle/Commande de la réduction d'odeur
générée par un Centre d'Enfouissement
Technique**



**Unité d'accueil : FUL – Arlon – Unité Surveillance de l'Environnement
Chercheurs : Véronique WIERTZ – David MONTICELLI
Responsable : Jacques NICOLAS**

Entreprise partenaire :

WATCO/SOTRADEC s.a. – Mrs Frédéric FOREST et Fabrice DE COSTA

AVANT-PROPOS.

Le présent projet FIRST avait pour objectif de contribuer à l'asservissement des systèmes de réduction des odeurs à la fois aux conditions climatiques et aux odeurs générées par un Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T.). Il s'agissait d'une étude originale, à vocation purement technologique (développement du concept de "nez électronique"), dans un domaine de recherche où il était nécessaire de sortir d'une époque de tâtonnements où les acquis bibliographiques étaient fortement limités.

Cette étude est le fruit d'une collaboration entre la Fondation Universitaire Luxembourgeoise (F.U.L.), située à Arlon, et le groupe WATCO/SOTRADEC dont le site d'Hallembaye avait été mis à notre disposition.

En particulier, ce projet entrait dans le cadre du programme de l'unité "Surveillance de l'Environnement" de la FUL dont l'objectif est le développement d'outils de mesure et de traitement des données concernant les différents paramètres de l'environnement dans un but de contrôle et d'aide à la décision. C'était d'ailleurs l'expérience acquise au cours d'études précédentes, où l'applicabilité du concept de "nez électronique" au suivi des odeurs avait été testée, qui nous avait permis de relever un tel défi.

Pour sa part, le groupe WATCO s'occupe de la gestion des déchets dans une approche intégrale (maîtrise de tout le cycle de traitement) tandis que SOTRADEC fut créée pour l'exploitation des installations de l'intercommunale INTRADEL dont le CET d'Hallembaye fait partie.

Tout l'intérêt et la spécificité du projet résidaient donc surtout dans la possibilité qui nous était offerte de développer et d'appliquer concrètement notre méthodologie de recherche à un cas "pilote" extrapolable par la suite à d'autres sites de stockage des déchets. L'expérience des gestionnaires de ce type de site était également nécessaire pour mener à bien notre recherche.

Les profits issus de notre projet seraient également doubles: tout d'abord, ils permettraient d'avancer dans un domaine de recherche très prometteur, tandis qu'en cas de succès de l'étude, la possibilité d'interfacer un PC au dispositif de réduction des odeurs déjà en place serait examinée, permettant ainsi un pilotage du dispositif en temps réel, une première sans doute dans le domaine.

TABLE DES MATIERES.

CHAPITRE I : Introduction	5
CHAPITRE II : Méthodologie, mise en œuvre du plan de travail et mise au point du prototype de "nez électronique".	10
2.1. Méthodologie.	10
2.2. Mise en œuvre du plan de travail.	11
2.3. Mise au point du prototype de "nez électronique".	12
2.3.1. Introduction.	12
2.3.2. Choix des capteurs et construction de l'enceinte.	12
2.3.3. Réalisation proprement-dite d'un appareil de terrain.	15
2.4. Prélèvement des données.	18
2.4.1. Introduction.	18
2.4.2. Modus Operandi.	19
2.5. Sélection de la variable d'entrée.	22
2.5.1. Information qualitative.	22
2.5.2. Information quantitative.	22
2.6. Dérive du réseau de capteurs.	23
CHAPITRE III : Traitement des données : rappels théoriques.	24
3.1. Introduction.	24
3.2. Analyse discriminante.	24
3.2.1. Principes élémentaires.	24
3.2.2. Analyse discriminante.	25
3.3. Analyse quantitative.	26
3.3.1. Régressions multilinéaires.	26
3.3.2. Régressions P.L.S.	27
3.4. Analyse des données météorologiques.	28
3.4.1. Analyse de la variance.	28
3.4.2. Analyse factorielle des correspondances multiples.	28
CHAPITRE IV: Calibration et essais de validation d'un modèle de reconnaissance olfactive des sources d'émission du site d'Hallembaye.	30
4.1. Objectifs.	30
4.2. Calibration du modèle.	30
4.2.1.Introduction.	30
4.2.2. Sources de variation.	30
4.2.3. Acquisition des données.	31
4.2.4. Sélection de la variable d'entrée.	31
4.2.5. Résultats.	32
4.2.5.1. Discrimination des 4 sources.	32
4.2.5.2. Discrimination "odeur-air amont".	35
4.2.5.3. Discrimination "déchets frais- amont".	36
4.3.Validation du modèle.	38
4.3.1. Introduction.	38
4.3.2. Prélèvement des données.	38
4.3.2.1. Mesures à l'émission.	38
4.3.2.2. Mesures à l'immission.	39
4.3.3. Résultats.	39

4.3.3.1. Introduction.	39
4.3.3.2. Validation du modèle "amont/odeur".	39
4.3.3.3. Validation du modèle "amont/déchets frais".	40
CHAPITRE V: Calibration et essais de validation d'un modèle d'évaluation de l'intensité olfactive des sources d'émission du site d'Hallembaye.	41
5.1. Objectifs.	41
5.2. Méthodologie.	41
5.2.1. Principe.	41
5.2.2. Prélèvement des données.	41
5.2.2.1. Campagne de prélèvements aux sources.	41
5.2.2.2. Campagne de prélèvement à la périphérie du site.	42
5.3. Résultats.	43
5.3.1. Calibration du modèle aux sources.	43
5.3.2. Campagne de prélèvements en périphérie du site.	46
5.3.2.1. Validation des modèles aux sources "biogaz et déchets frais".	46
5.3.2.2. Calibration d'un modèle d'intensité sans référence au type d'odeur.	47
CHAPITRE VI: Analyse des relevés "odeur" effectués à l'immission en fonction des paramètres météorologiques.	50
6.1. Introduction.	50
6.2. Présentation de la banque de données.	50
6.3. Paramètres climatiques retenus.	51
6.3.1. Données brutes de l'IRM.	51
6.3.2. Classes de stabilité de Pasquill.	52
6.4. Analyse statistique.	53
6.4.1. Analyse de la variance.	53
6.4.2. Analyse factorielle des correspondances multiples.	54
6.4.2.1. Répartition des variables météo en classes.	54
6.4.2.2. Résultats.	55
6.4.2.3. Conclusions.	57
6.4.2. Interprétation des résultats.	57
CHAPITRE VII: Synthèse, conclusions générales et perspectives de la convention.	58
CHAPITRE VIII: Conclusions sur le déroulement de la convention FIRST.	65
8.1. Avis du promoteur de l'unité universitaire.	65
8.2. Note du chercheur.	67
8.3. Note de l'entreprise partenaire.	68
BIBLIOGRAPHIE ET ANNEXES.	

CHAPITRE I: Introduction générale.

Les riverains des centres d'enfouissement techniques (C.E.T.), des stations d'épuration, des installations agricoles ou de certaines installations industrielles sont fréquemment victimes de nuisances olfactives. Pour gérer ces problèmes d'odeurs, la technologie actuelle fournit un grand choix de systèmes de réduction des nuisances générées : il peut s'agir de diffusion d'agents masquants, d'aération, de filtrage, de lavage, de combustion, d'action biologique, d'application de matériel de couverture, de mise en dépression des zones de déversement ou l'aspersion de produits chimiques anti-odeurs (rampe d'aspersion en périphérie du CET). L'aspersion des produits anti-odeurs est généralement envisagée dès lors que les actions menées en amont ne suffisent pas à résoudre le problème des nuisances.

Cependant, les techniques faisant appel aux produits anti-odeurs s'avèrent onéreuses à l'utilisation : les réactifs, chers à l'achat, sont en outre souvent surdosés afin d'obtenir avec certitude un traitement efficace. Or, il n'est pas indispensable de les utiliser en permanence : dans le cas des centres d'enfouissement, l'odeur n'est pas générée en continu. En outre lorsqu'un mélange gazeux odorant est émis, il n'engendre une nuisance chez les riverains que si les conditions météorologiques favorisent son transport vers les habitations, sans trop de dispersion. La technique d'aspersion de produits anti-odeurs est souvent gérée à partir d'un système de contrôle basé sur l'enregistrement des conditions météorologiques du moment (tel est le cas pour le site d'Hallembaye). Cela permet d'anticiper la dispersion des odeurs à l'immission (villages riverains). Il serait néanmoins plus efficace de disposer, à l'émission, d'un instrument permettant une mesure objective de la nuisance olfactive effective (nature et intensité des odeurs).

Face à ce type de constat s'est développée une démarche consistant à mettre en place des systèmes de régulation automatique de la dose de réactif en utilisant des capteurs capables de mesurer un des constituants-clé du mélange gazeux odorant. La principale application concerne les stations d'épuration où la régulation s'effectue sur la mesure de composés soufrés au moyen d'analyseurs à fluorescence U.V. L'utilisation de ces appareils s'est généralisée dans les C.E.T (analyseurs CH₄ et H₂S) et les réseaux de surveillance de la qualité de l'air ambiant en zones urbaines avec des développements très avancés au niveau météorologique, automatisation et fiabilité sur le terrain. Ces instruments de mesure trouvent aussi toute leur utilité au niveau du contrôle des techniques d'exploitation, des actions préventives ou curatives menées dans l'optique d'une diminution des nuisances.

Cependant, le suivi en continu des odeurs dans l'environnement reste un challenge car il n'est pas toujours aisé d'identifier les composés réellement responsables de l'odeur qu'il est pertinent de mesurer. Dans le cas du C.E.T. d'Hallembaye, il existe différentes sources d'odeur qui peuvent être responsables des problèmes d'odeurs (biogaz, bassin de récolte des lixiviats, déversements de déchets frais, mâchefers d'incinération...). Les composés malodorants incriminés sont donc multiples ainsi que les sources d'émission qui varient localement dans le temps et l'espace.

Actuellement, la méthode de gestion du dispositif de réduction des odeurs (rampe d'aspersion) est essentiellement basée sur deux types de fonctionnement

- un déclenchement automatique lié à la direction et à la vitesse du vent
- un déclenchement manuel suite à la présence d'odeur détectée par le personnel du CET ou par le surveillant communal.

Il est donc tout à fait opportun de chercher à développer un appareil ou une méthode capable de fournir un signal objectif, à la fois basé sur la mesure des conditions de stabilité atmosphérique et sur la détection (présence ou absence) d'une odeur aux environs immédiats du site.

La finalité du projet est donc d'asservir le système d'aspersion périphérique de produit anti-odeurs à la fois aux conditions météorologiques du site et à la nature de l'odeur générée par un C.E.T. Cet objectif prioritaire permet en outre de répondre au souhait des gestionnaires des CET d'utiliser de façon plus efficiente les produits masquants ou anti-odeur (objectif écologique et financier).

Si des capteurs et des modèles existent déjà en ce qui concerne la météorologie, on ne rencontre pas encore d'applications réelles de mesure en continu des odeurs de CET. Une des raisons est qu'il n'existe pas de senseur capable de mesurer "une" odeur typique de CET. Néanmoins, un réseau de senseurs non spécifiques, et un logiciel adéquat de traitement du signal pourraient fournir un signal indiquant la présence ou l'absence d'odeur, voire un signal quantitatif lié à l'intensité de l'odeur émise. Ce constat nous suggérerait le recours à la technologie de type "nez électronique" (Fig. 1.1.) déjà développée depuis quelques années dans notre laboratoire. En effet, celle-ci a déjà été utilisée pour l'étude d'émissions d'installations agricoles et pour la mesure de groupes de composés tels les composés organiques volatils.

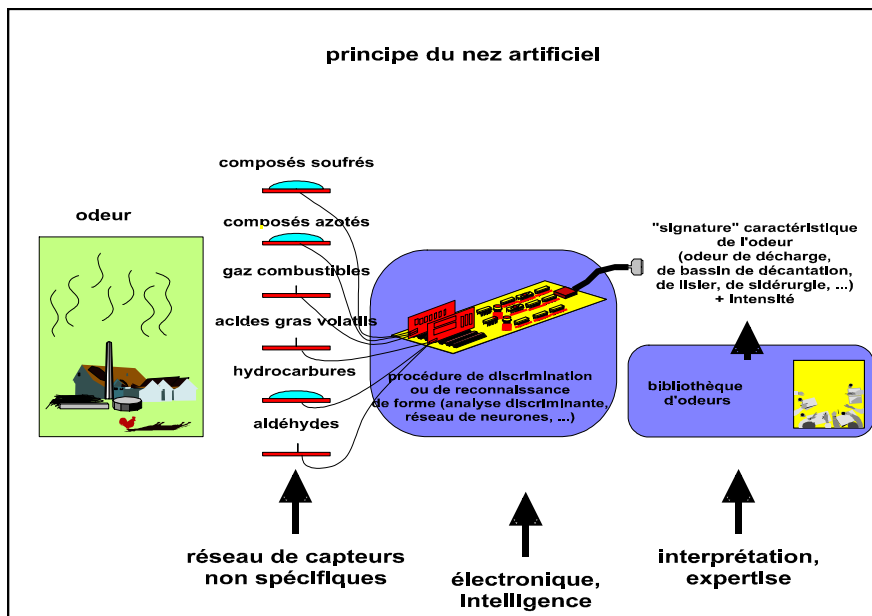


Fig. 1.1. : principe du nez artificiel.

Le présent projet FIRST se propose précisément d'appliquer ce principe de réseau de capteurs au suivi des odeurs de C.E.T. En outre, l'originalité réside dans la mise en commun de ces résultats de mesure avec l'information météorologique, de manière à être éventuellement capable d'anticiper l'apparition d'une nuisance chez les riverains.

La recherche concernant l'application du principe du nez électronique au suivi continu des odeurs sur le terrain part du constat que les appareils disponibles sur le marché ne sont pas adaptés à cette problématique : ils sont trop onéreux, ils sont prévus pour des analyses au laboratoire, ils impliquent souvent une étape de préparation de l'échantillon et sont rarement adaptés à l'analyse en ligne d'atmosphères gazeuses prélevées directement dans l'environnement, enfin, ils ne tiennent pas compte de la variation des paramètres ambiants qui peuvent influencer les capteurs, tels que la température et l'humidité.

Au départ, le projet prévoyait donc la réalisation d'une instrumentation « home-made » et le développement d'une méthodologie de mesure adaptée au suivi continu des odeurs dans l'environnement d'un CET.

Pour atteindre ce but, plusieurs étapes ont été planifiées.

- L'étude bibliographique devait permettre de ne pas réinventer ce qui aurait pu exister par ailleurs, on tout au moins de se baser sur un acquis scientifique en matière de suivi continu des odeurs sur le terrain.
Il faut bien reconnaître qu'à cette époque, cette étape n'a pas conduit à des résultats très probants : aucune étude de ce type n'avait été menée jusqu'alors et si certaines équipes de recherche avaient effectivement développé des nez électroniques portables, voire mis au point des modèles de reconnaissance d'odeurs dans l'environnement, aucune n'avait poussé le raisonnement jusqu'à leur utilisation en temps réel sur le terrain. Le projet devait donc essentiellement se baser sur les acquis de l'unité « Surveillance de l'Environnement » de la FUL dans ce domaine.
- Le développement d'un instrument adapté implique les choix suivants :
 - des capteurs gaz permettant l'identification des odeurs de CET ;
 - une chambre pour accueillir ces capteurs, de taille réduite et construite dans des matériaux facilement usinables, pas trop chers et suffisamment inertes chimiquement ;
 - un système de flux gazeux à la fois compact, robuste, souple et permettant une utilisation autonome sans maintenance excessive ; et si possible parfaitement contrôlé et ajustable durant l'étape de développement ;
 - une procédure de mesure permettant la régénération des capteurs dans un air inodore après le passage dans l'ambiance odorante, selon un cycle dont le rythme doit optimiser à la fois la rapidité de mesure et la complète régénération des capteurs ;
 - un système d'introduction de l'air inodore, à la fois portable et sans contrainte de maintenance ;
 - un appareil d'acquisition des données portable et robuste, permettant le contrôle automatique des cycles de mesure ;

- un système d'alimentation électrique mixte, permettant à la fois l'usage du secteur électrique pour les tests en laboratoire et celui de batteries pour les applications sur le terrain ;
 - une valise de transport.
- Les techniques de prétraitement des données doivent être testées et les méthodes mathématiques et statistiques de reconnaissance doivent être choisies et adaptées au cas particulier.
 - Par une série de tests en laboratoire et sur le terrain, il faut évaluer la faisabilité de l'identification des différents types d'odeurs générées par le CET et, par une procédures « d'essais/erreurs », améliorer l'appareil de mesure et les méthodes mathématiques.
 - En particulier, cette partie de l'étude doit analyser l'influence de la température et de l'humidité ambiantes sur la mesure et tenter de trouver une solution pour tenir compte de cette influence ou la minimiser.
 - Durant la seconde année du projet, les appareils développés et les méthodes mises au point doivent ensuite être appliquées sur base d'un protocole rigoureux et systématique, de manière à construire les modèles de reconnaissance des odeurs de CET.
 - S'il s'avère que cette reconnaissance soit possible, il faut alors tester la possibilité d'évaluer également l'intensité de l'odeur émise.
 - L'influence des paramètres météorologiques sur la génération et sur la dispersion des odeurs sur le site d'Hallembaye doit être évaluée, dans le but ultime d'inclure dans le programme de contrôle certaines règles relatives aux conditions météorologiques.
 - La dernière étape, planifiée pour une éventuelle troisième année de recherche, doit enfin être consacrée à la validation en continu et directement sur le site des instruments, des techniques et des modèles développés. Si elle s'avère probante, cette validation doit permettre alors d'imaginer un système automatique de contrôle/commande des dispositifs de réduction des odeurs de CET adapté au site d'Hallembaye.

Le présent rapport propose les résultats de cette recherche effectuée sur une période de deux années. Un premier chapitre rappellera le plan de travail et détaillera les différentes étapes méthodologiques qui nous ont permis de mettre au point un prototype de nez électronique qui sera utilisé sur le site d'Hallembaye (1^{ère} année du projet). Après un bref rappel théorique des méthodes d'inférence statistique utilisées dans le traitement des données, deux chapitres seront entièrement consacrés aux résultats des campagnes d'apprentissage et de validation effectuées au cours de la 2^{ème} année du projet, respectivement selon les aspects qualitatifs (nature des odeurs) et quantitatifs (intensité des odeurs). Le chapitre 4 sera quant à lui consacré à l'analyse des relevés météo de la station de Bierzet en fonction des relevés odeurs effectués minutieusement par le surveillant communal du CET et alentours au cours de ces dernières années. Dans une

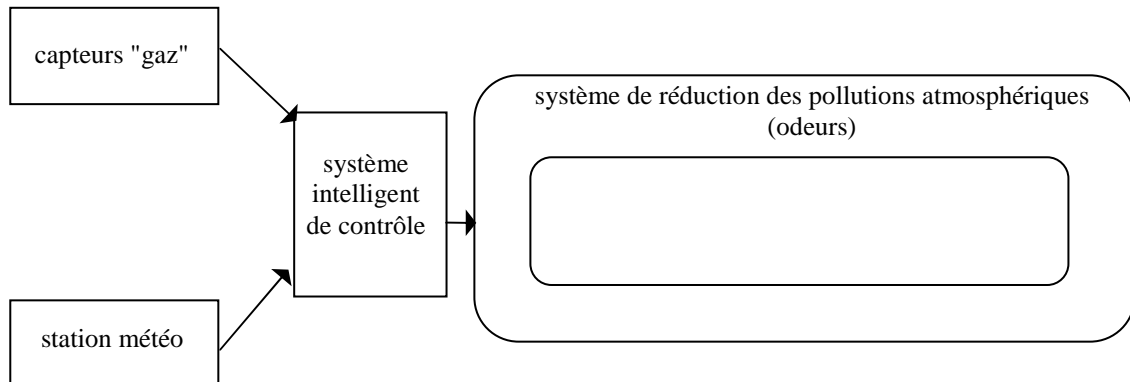
dernière étape, les conclusions générales et perspectives de suivi du projet sont discutées.

Le présent rapport, rédigé essentiellement par le second chercheur, David Monticelli, insiste davantage sur les étapes de tests systématiques, de validation sur le terrain et d'analyse des données que sur l'étape de mise au point des appareils et des méthodes. De plus amples détails sur ceux-ci peuvent être obtenus dans les 2 premiers rapports intermédiaires.

CHAPITRE II : Méthodologie, mise en œuvre du plan de travail et mise au point du prototype de "nez électronique".

2.1. Méthodologie.

Pour rappel, le système final que nous souhaitons proposer pour résoudre le problème qui nous était posé est le suivant :



D'une part, un ensemble de capteurs "gaz" est installé pour le suivi en continu d'odeurs du centre d'enfouissement technique en périphérie immédiate du site (plutôt que directement à l'émission pour s'affranchir d'un manque d'homogénéité, tout en s'en éloignant le moins possible pour éviter des problèmes de dilution par dispersion dans l'atmosphère). L'endroit préconisé sera la station d'enregistrement des données météorologiques située en périphérie nord-est du C.E.T. (proximité de la source mâchefers).

Une première étape consistait à choisir pertinemment les capteurs gaz en fonction des caractéristiques des sources odorantes générées au niveau du centre d'enfouissement technique considéré. Le signal fourni par le réseau de capteurs devra permettre, d'une part, d'estimer l'intensité de la nuisance olfactive et, d'autre part, d'identifier la principale source génératrice de l'odeur perçue. Ces capteurs sont basés sur les propriétés des oxydes semi-conducteurs (SnO_2).

Nous avons donc l'ambition de réaliser un premier réseau de capteurs portable adapté à la mesure des odeurs dans l'environnement. Cet appareil, muni de différents constituants modulables, devrait nous permettre de concevoir *in fine* un outil de mesure des odeurs en continu (qualitativement et quantitativement) dans l'environnement sans oublier que les critères de coût et de simplicité doivent être également pris en considération.

D'autre part, une station météo, pourvue de capteurs de la vitesse et de la direction du vent, de la température, de l'humidité relative, de la pression et de l'ensoleillement, fournit des informations sur le climat. Les capteurs "gaz" servent à suivre l'évolution de l'odeur à l'émission alors que la station météorologique sert essentiellement à prévoir la perception de l'odeur à l'immission, c'est-à-dire près des habitations.

Un système intelligent de contrôle devrait permettre *in fine* d'anticiper à la fois la génération et la dispersion des odeurs, sur base d'algorithmes tenant compte de ces deux types de mesures.

2.2. Mise en œuvre du plan de travail.

Dans une première étape, nous avons rassemblé toute l'information bibliographique disponible qui nous semblait utile pour la réalisation du projet. Au niveau du CET, il s'agissait de l'identification des composés responsables de l'odeur (3 types de sources potentielles : mâchefers, biogaz et déchets frais) et des éléments de gestion du C.E.T. visant à limiter les nuisances olfactives (rideau anti-odeurs, recouvrement nocturne par bâche, de la zone de déversement des déchets frais...).

Le projet s'est ensuite déroulé comme suit:

- 1) Instrumentation pour la mesure des odeurs : principe de fonctionnement des nez électroniques, des capteurs gaz, critères de choix des différents composants fonction d'exigences propres aux C.E.T... Sur cette base, nous avons pu entamer la phase de conception et réalisation d'un appareil de mesure «terrain » portable : dimensionnement, réalisation de l'enceinte et de la carte électronique (cf. Rapports 1999).
- 2) Compte rendu des paramètres intervenant plus spécifiquement lors de mesures effectuées dans l'environnement, à la lumière de l'expérience acquise les précédentes années dans notre laboratoire (cf. Rapports 1999, notamment rôle d'interférence de l'humidité et de la température rappelés au §2.4.).
- 3) Outils et démarche statistiques permettant le traitement des données récoltées au moyen du réseau de capteurs (Rapports 1999 et Chapitre III).

Sur cette base, nous avons défini un plan de travail *in situ* ou protocole, lequel a été entamé dès le début de l'année 2000 :

- 4) Programme de collecte des données odeurs sur le site d'Hallembaye constituant ce que nous avons appelé "la phase d'apprentissage à la reconnaissance d'odeurs de C.E.T. pour notre prototype de nez électronique". Cette phase a été mise en place pour les sources d'émissions mâchefers, biogaz et déchets frais du site d'Hallembaye. L'air de référence non odorant ("échantillon blanco") étant pris à 3 km en amont du C.E.T.(source dite "amont"). Les aspects qualitatif et quantitatif sont envisagés lors du traitement des données.
- 5) Suite à cet apprentissage, une courte phase de validation des résultats obtenus était nécessaire et a été réalisée en août 2000.
- 6) Traitement des données odeurs enregistrées à l'immission depuis plusieurs années versus paramètres météorologiques de la station de Bierzet (grâce à la banque de données du surveillant communal). Ceci dans le but de pouvoir diagnostiquer les variables météo et leurs modalités respectives responsables de l'apparition d'odeurs chez les riverains.
- 7) Conclusions de la recherche et suivi pour la mise en place du système de contrôle intelligent.

2.3. Mise au point du prototype de "nez électronique".

2.3.1. Introduction.

Le principe du nez électronique permet, à partir d'un nombre limité de senseurs (6...12), la caractérisation d'un très grand nombre d'odeurs différentes rencontrées dans l'environnement. En effet, on obtient pour chaque type d'odeurs un signal de sortie ou "motif" caractéristique de celles-ci (idem pour une même source d'odeurs mais d'intensités différentes). Dans un nez électronique, on va en outre choisir des senseurs non spécifiques, en ce sens que chaque senseur réagit à pratiquement tous les composés gazeux, mais qu'il présente un signal plus élevé pour une ou certaines familles particulières de composés (les composés soufrés, les vapeurs et solvants organiques, les vapeurs alimentaires, les gaz toxiques ou les hydrocarbures...).

Un mélange gazeux particulier va donc générer sur le réseau formé de n senseurs, un groupe de n signaux particuliers, lequel sera caractéristique du mélange considéré. Il faut cependant garder à l'esprit qu'un tel dispositif permet d'enregistrer une signature caractéristique pour tout échantillon gazeux, qu'il soit odorant ou non. Si on veut utiliser un tel appareil pour la mesure d'une intensité odorante, l'étape d'apprentissage doit être couplée à une estimation olfactive des échantillons soumis au réseau de capteurs.

Si nous avons résolument opté pour une technique de type «nez électronique», couplant un réseau de capteurs gaz non spécifiques et un outil de reconnaissance de «motifs» (représentatifs d'un type d'odeur ou d'une intensité odorante) pour appréhender la problématique qui nous était soumise, nous avons de plus voulu développer un appareil adapté à une finalité «terrain». En effet, les nez électroniques disponibles dans le commerce sont des instruments de laboratoire, fermés et développés surtout pour une utilisation en routine, tout à fait inadaptés aux contraintes des mesures réalisées directement dans l'environnement. Dans la littérature, on ne trouve d'ailleurs pratiquement aucune application terrain des nez électroniques, ce qui rendait notre recherche à la fois complexe et originale.

Cette problématique avait déjà été envisagée par la FUL ces dernières années et débouché notamment sur la mise en place d'un banc d'essai de laboratoire. Des mesures de terrain avaient également été effectuées et nous avons tenu compte des nombreux enseignements tirés de cette expérience pour progresser dans notre projet.

2.3.2. Choix des capteurs et construction de l'enceinte.

Une synthèse de l'état de l'art et la définition des critères de choix pour un réseau de capteurs adapté à une mesure dans l'environnement avaient été largement discutés au cours des rapports intermédiaires. Différents types de capteurs étaient disponibles et notre choix s'est porté sur des capteurs à oxyde d'étain (SnO_2) fabriqués par la firme japonaise Figaro (famille des oxydes métalliques semi-conducteurs). Sur base d'analyses réalisées dans notre laboratoire à partir d'échantillons prélevés aux différentes sources odorantes du C.E.T., nous avons sélectionné les 6 capteurs Figaro assurant la meilleure séparation possible des différentes sources odorantes identifiées sur le site d'Hallembaye et sensibles à l'intensité odorante (TGS2610, TGS2181, TGS800, TGS824, TGS822 et TGS2180). Une carte électronique a ainsi été préparée sur laquelle ont été placés les 6 capteurs (dont un était considéré comme plus sensible à l'humidité). Une sonde de température interne (CTN) a été également incorporée au système.

La carte est déposée au sein d'un boîtier en aluminium composé de deux parties s'emboîtant et se fixant au moyen de 4 vis. Un joint en téflon protège la carte de tout contact avec le boîtier et assure l'étanchéité de l'ensemble (Fig. 2.1.). Les photos 2.2 et 2.3 illustrent les deux faces de la carte électronique sur laquelle ont été fixés les 6 capteurs sélectionnés. Nous avons également incorporé à la carte une thermistance à coefficient de température négatif (CTN) qui nous donnera une indication de la température régnant au sein de l'enceinte des capteurs. On constate sur le schéma que la partie électronique est isolée de la partie « capteurs » afin d'éviter toute perturbation de la composition du signal gazeux. L'enceinte contenant les capteurs est donc de taille très réduite, ce qui permet d'obtenir des temps de réponse très courts. L'ensemble se démonte facilement de sorte qu'il est aisé de remplacer un capteur par un autre (Fig. 2.1.).

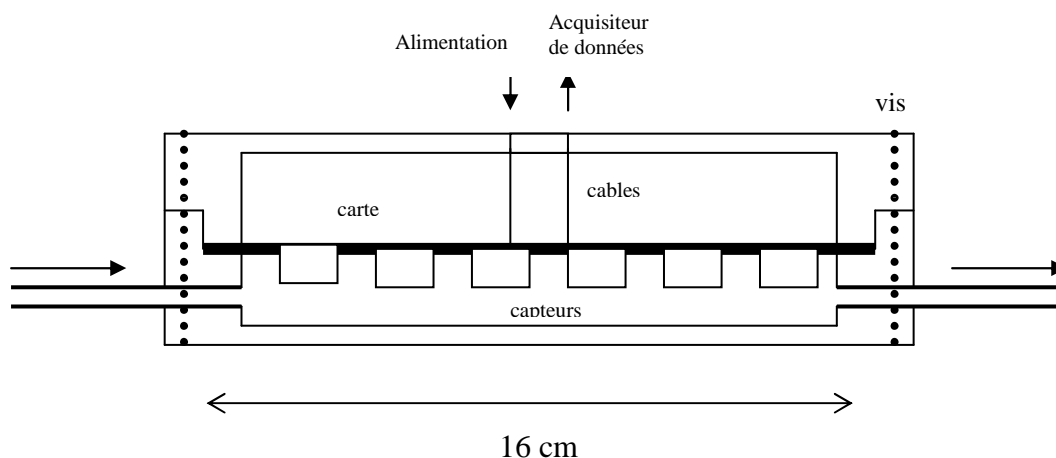


Fig. 2.1.: schéma de l'enceinte "capteurs"

La figure 2.4. décrit le montage électronique permettant la mesure de la variation de la résistance de chaque capteur par un pont diviseur. Pour rappel, la modification de l'ambiance gazeuse passant devant les capteurs se traduit par une chute de la résistance des capteurs. Une résistance de charge (10 kohms) est placée entre chaque capteur et la masse. On mesure alors la variation de potentiel de part et d'autre de cette résistance au cours du temps au moyen d'un acquisateur de données (squirrel 100 de Grant) possédant 8 entrées de mesures en tension (0-5V). De cette tension mesurée, on déduit la valeur de la résistance des capteurs par la relation :

$$R = \frac{Val. \times R_{série}}{V_{mesurée}} - R_{série}$$

où *Val.* est la tension imposée au système (ici 5V),

R_{série} est la valeur de la résistance en série (ici 10 ohms),

V_{mesurée} est la tension mesurée aux bornes de la résistance en série.

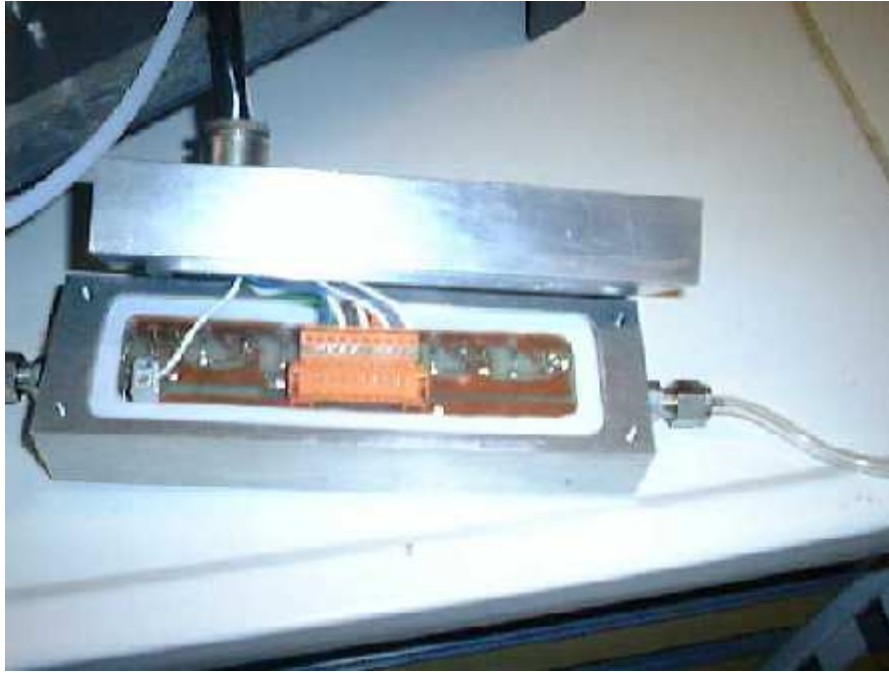


Photo 2.2.: carte électronique (dos)



Photo 2.3.: carte électronique (face capteurs)

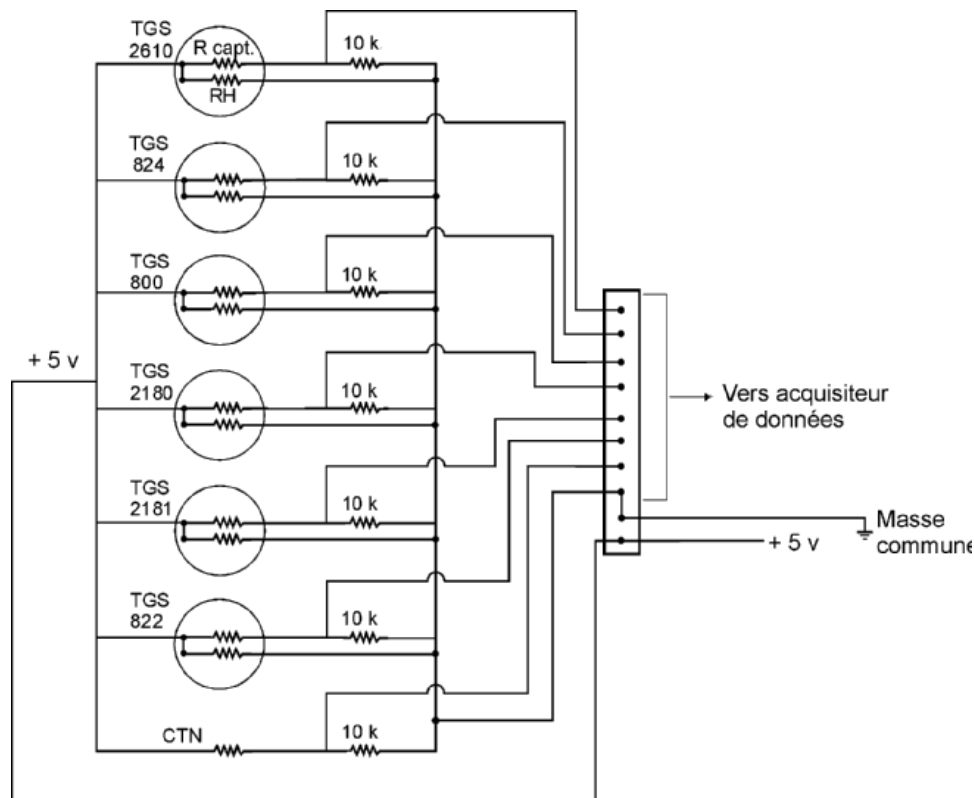


Fig. 2.4.: carte du montage électronique

2.3.3. Réalisation proprement-dite d'un appareil de terrain.

Sur base des exigences propres à la technologie des nez électroniques et aux conditions de terrain rencontrées sur le site d'Hallembaye, nous avons réalisé un appareil portable. Le réseau de capteurs est soumis au flux de gaz lorsque une pompe est actionnée. L'alimentation des capteurs est unique (5V) et la récolte des informations est prévue par l'intermédiaire d'un acquieseur de données déchargé sur PC.

L'appareil a été testé sur le terrain, avec un contrôle assez précis du flux gazeux (150 ml/min) au moyen d'une pompe localisée en aval. Le choix d'un système à flux dynamique avait été largement justifié dans les précédents rapports. La pompe a été placée en aval de l'enceinte des capteurs de manière à éviter une éventuelle contamination du gaz lors de son transfert dans la pompe. Nous avons choisi une pompe à membrane (en EPDM) de marque Fürgut. Cette pompe présente l'intérêt d'être minuscule (22x4.2x3.35mm).

L'alimentation est assurée au moyen d'une batterie (12V) rendant ainsi l'appareil indépendant (condensé dans une valise – Photo 2.5.). *In fine*, rappelons que l'appareil de mesure des odeurs en continu devrait théoriquement être positionné en bordure du centre d'enfouissement technique avec la possibilité d'une alimentation sur secteur.

Côté amont, l'enceinte des capteurs est reliée à une électrovanne 3 voies (2 entrées et une sortie) au moyen d'une tubulure en téflon permettant d'assurer, par commande (via un interrupteur à 3 positions), la sélection des deux voies de prélèvements. L'une des positions permet uniquement le prélèvement direct de l'air ambiant (R) tandis que l'autre permet le prélèvement d'un air de référence nécessaire à la régénération des capteurs et pour la ligne de base Ro (cf. §2.5.). Pour cette deuxième position, il s'agit de la voie reliée à un sac en tedlar

toujours par une tubulure en téflon. La troisième position permet un prélèvement alterné électroniquement entre les deux voies décrites précédemment et selon le cycle décrit au § 2.4.2.



Photo 2.5.a : dispositif expérimental

La régulation du débit est réalisée au moyen d'une vanne micrométrique Brooks à aiguille. Il s'agit d'une vanne 16 tours manuelle permettant un passage d'air maximum de 19.8 l/h soit environ 330 ml/min. Elle est placée en aval de la pompe. La mesure du débit peut être effectuée de deux manières. D'une part, on mesure le débit volumétrique au moyen d'un débitmètre à bulle de savon. Ce type de débitmètre présente l'avantage de donner une indication indépendante de la température et de la pression (ce qui n'est pas tout à fait le cas pour les rotamètres) mais l'instrument de mesure est un peu encombrant et doit être manié avec précaution. Il est de ce fait impossible de l'inclure dans le système portable.

Il peut toutefois être amené sur le terrain et y être branché (en aval de la vanne micrométrique) chaque fois qu'une mesure de débit doit être effectuée. Signalons également que ce système ne permettra pas de déceler une fuite éventuelle dans le circuit.

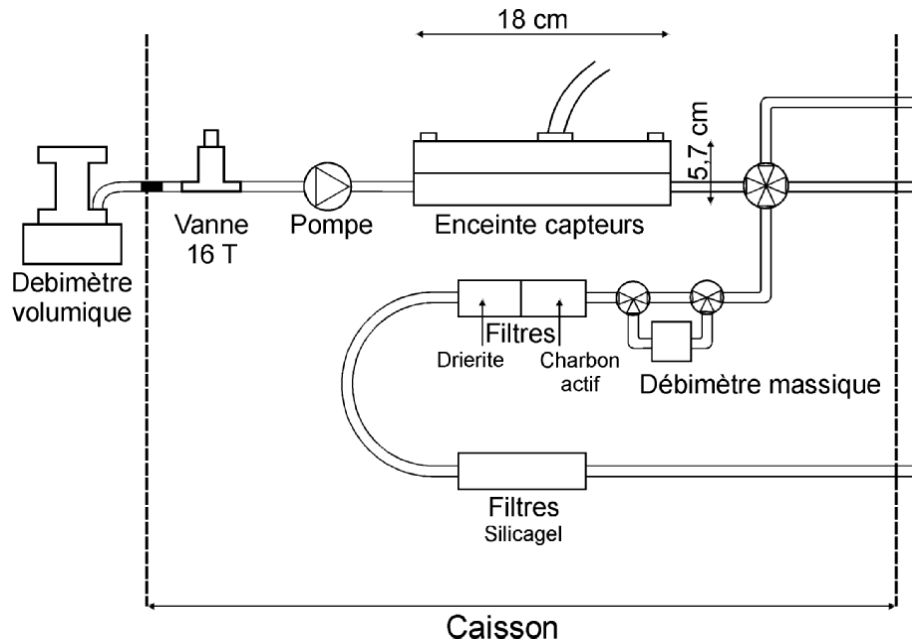


Photo 2.5.b : dispositif expérimental

D'autre part, on a prévu une mesure du débit massique au moyen d'un débitmètre très léger et de petite taille (54.4 x 31.5 x 15.5 mm et <11 grammes) pouvant donc être fixé de façon permanente sur le nez portable. Il s'agit d'un débitmètre Honeywell® MICRO SWITCH Sensing and Control. Ces débitmètres sont calibrés pour une alimentation de 10V. La lecture de la tension de sortie, entre 1V et 5V, permet de connaître le débit massique. L'utilisation d'une tension d'alimentation de 12V est tout à fait possible (ce qui permet de prévoir une alimentation unique pour la pompe et le débitmètre), la tension de sortie étant alors directement proportionnelle à la tension d'alimentation. Le débitmètre massique présente l'inconvénient d'être sensible à l'humidité. Nous l'avons donc introduit uniquement dans le circuit de prélèvement d'air de référence Ro, considéré comme très sec.

Pour les expériences menées sur le terrain, nous avons prévu deux alimentations par batterie 12V. Pour alimenter les capteurs en 5V, on utilise un convertisseur DC/DC 9...18V en 5V (Melcher®). Une première batterie est installée en permanence dans le caisson (on ne la voit pas sur la photo 2.5. car elle se situe entre la plaque portant l'enceinte des capteurs et le fond du caisson). Pour des raisons pratiques évidentes, cette batterie «interne» est petite et légère : elle a une autonomie d'environ 2h. Une batterie de voiture (dite «externe» ; 12volts, 45Ah) peut également servir à alimenter les capteurs. Elle assure une autonomie d'environ 30 heures sur le terrain. Dans la pratique, les capteurs sont alimentés par cette batterie extérieure lors des acquisitions sur le terrain (prise secteur non disponible). Cependant, lorsque l'appareil est déplacé, on est obligé de débrancher la batterie. Pendant ce temps, on assure donc la mise sous tension des capteurs au moyen de la batterie interne.

La réponse des capteurs dépend étroitement de la tension d'alimentation (cf. infra). Il est donc impératif d'imposer une même tension, que l'on travaille avec l'alimentation extérieure ou avec l'une ou l'autre des batteries. Le convertisseur DC/DC Melcher utilisé fournit exactement 5V. Nous avons donc réglé avec le potentiomètre une valeur de sortie de

5V sur la carte d'alimentation, ce qui permet d'alimenter le chauffage des capteurs avec une tension équivalente, que l'on utilise la batterie interne, la batterie externe ou la carte d'alimentation secteur.

Le schéma de la figure 2.6. décrit le montage réalisé pour commuter d'une voie d'alimentation à l'autre. La sélection se fait au moyen d'un interrupteur 3 positions (I pour batterie interne, II pour batterie externe et III pour alimentation secteur). Sur le schéma, les 2 galettes du combinateur sont représentées séparément. Celui-ci permet donc les connexions :

- en position I, de AI, BI et CI (batterie intérieure)
- en position II, de AII, BII et CII (batterie extérieure)
- en position III, de AIII, BIII et CIII (alimentation secteur)

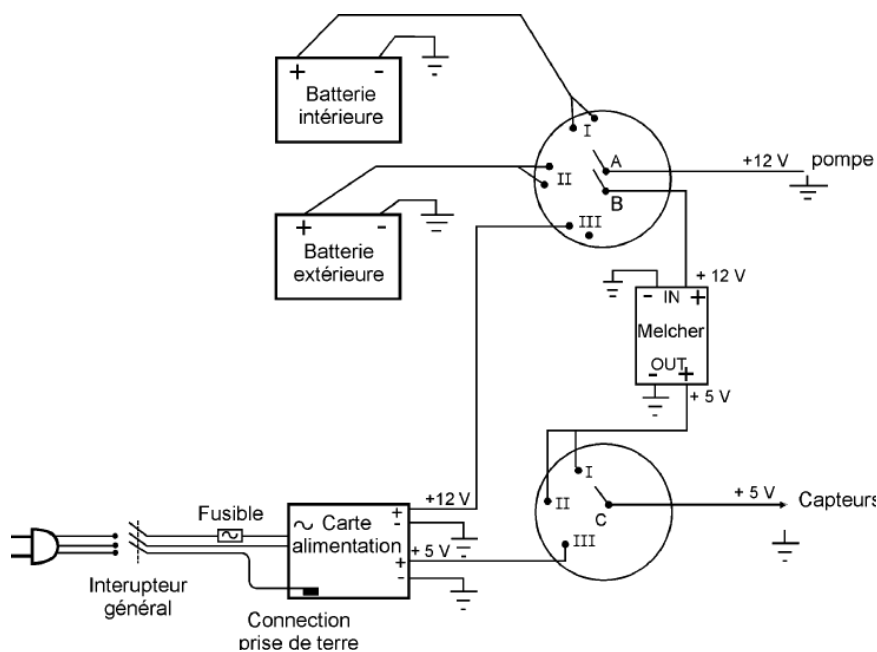


Fig. 2.6.: montage électronique de commutation des alimentations.

2.4. Prélèvement des données.

2.4.1. Introduction.

L'influence de facteurs interférant directement sur la réaction des capteurs a été mise en évidence par de nombreux auteurs [Gardner J.W., 1992] et confirmée lors des premiers essais avec le nez portable (alimentation, débit, pression, humidité, température).

Dans le cadre de notre application de terrain, nous pouvons raisonnablement envisager de travailler à un débit et une alimentation constants tandis qu'humidité et

température des capteurs restaient deux facteurs très difficiles à maîtriser *in situ*¹.

Pour cette dernière, des solutions ont déjà été proposées et concernaient notamment la mise en place d'un système de régulation de la température de chauffage du capteur. Il nous semblait cependant difficile de mettre en place un tel système de contrôle à l'intérieur de l'enceinte des capteurs à la fois pour des raisons techniques et financières.

Une autre solution, plus abordable dans le cadre de notre application, était de jouer préférentiellement sur la méthode de reconnaissance et non au niveau du capteur lui-même en utilisant la température et l'humidité comme variables d'entrée pour l'inférence statistique [Keller P. *et al.*, 1992]. Cette réflexion se base sur le principe qu'un apprentissage (acquisition de données) réalisé dans un éventail de conditions de température et d'humidité "le plus large possible" permettrait en quelque sorte d'aplanir leur effet perturbateur puisqu'ils seraient implicitement intégrés dans la reconnaissance des émissions olfactives propres au site d'Hallembaye.

Un protocole pour une collecte de données s'échelonnant sur plusieurs mois avait donc été défini le plus clairement possible (standardisation des étapes d'acquisition de données sur le site) de manière à pouvoir établir une banque de données cohérentes pour l'inférence statistique programmée.

2.4.2. Modus Operandi.

Les principes essentiels du protocole mis en place peuvent se résumer comme suit:

1. l'acquisition des données brutes pour l'apprentissage se fait directement ("online") aux sources par déplacement de notre appareil portable (et non par prélèvements en sacs),
2. pour chaque source (déchets frais, mâchefers, biogaz et air "amont"), on a choisi un endroit en début de campagne qui sera systématiquement visité lors des 9 journées effectuées sur 4 mois ; on a réalisé entre 6 et 10 cycles de 10 min. par source et par journée de terrain,
3. un cycle est une alternance (2x5min.) entre le passage du gaz odorant dans l'enceinte des capteurs et le passage d'un air sec de référence prélevé en sac d'une bonbonne au labo,
4. les données brutes sont enregistrées par un acquisateur de données ("data logger") et traitées "offline" (déchargement sur PC puis analyse statistique).

Suite à cette campagne d'apprentissage, les modèles de discrimination (aspect qualitatif) et d'évaluation de l'intensité odorante devaient être validés. Nous avons prévu à cet effet une semaine de prélèvements en continu sur le terrain durant le mois d'août 2000.

Avant chaque journée sur le terrain, un contrôle de l'appareil est primordial surtout en ce qui concerne les tensions d'alimentation et le réglage du débit dans l'enceinte des capteurs. Les points à vérifier par le chercheur ont été répertoriés et sont présentés sur une fiche technique relative aux vérifications de l'appareil effectuées avant toute acquisition sur le terrain (cf. encadré ci-dessous). Les conditions de prélèvement sont également reprises sur la fiche technique. Il s'agit de considérations destinées à l'opérateur, fournies ici dans le but de mettre en évidence le protocole suivi lors des acquisitions sur le terrain.

¹ Il faut noter que la température du gaz étudié influence aussi la réponse du capteur. Dans ce dernier cas, sur le terrain, il n'y a pas vraiment de solution.

VERIFICATION DE L'APPAREIL.

- capteurs sous tension 24h/24 (boîtier métallique chaud),
- accumulateurs chargés (batterie interne et externe),
- débitmètre massique,
- débitmètre volumétrique en sortie,
- pompe,
- interrupteur (pas de "retard" pour un basculement ("switch") entre les 3 types d'alimentations),
- convertisseur DC/DC Melcher,
- acquisateur de données (Data logger) opérationnel (contrôle d'une lecture de tension pour chaque canal): 6 capteurs et deux CTN (une interne et une externe)
- PC portable disponible pour déchargement de l'acquisiteur si nécessaire.

CONDITIONS DE PRELEVEMENTS.

- nécessité d'un équilibre de t° entre l'enceinte des capteurs et l'air extérieur: attendre un certain laps de temps entre arrivée sur place et 1^{ère} acquisition (contrôle des tensions aux bornes des deux CTN),
- 1 cycle (passage odeur-passage air de référence) toutes les 10 minutes avec signal enregistré toutes les 30 sec,
- entre 6 et 9 cycles par source (4 sources) et par journée de terrain (9 sorties programmées sur 4 ou 5 mois),
- prélèvements à différentes distances des sources d'émissions pour les besoins de l'apprentissage quantitatif (l'intensité odorante ressentie augmente généralement quand la distance à l'émission diminue),
- estimation de l'odeur soumise par le nez humain (basée sur un système catégoriel simple (cf. infra)+ air de référence à respirer pour "désaturer" le nez humain),
- prélèvement des données météo *in situ* (sonde d'humidité et de température du laboratoire) + réception des données enregistrées à la station sur disque amovible (disquette 3 1/2).

Une fiche standard est complétée à chaque source et pour chaque demi-cycle de 5 minutes (cf. annexe 1). Elle comprend l'heure de départ et de fin de chacun de ces demi-cycles (soit pour le passage d'air odorant, soit pour le passage d'air de référence). Le type d'alimentation est noté (batterie externe ou interne) ainsi que le débit volumétrique de sortie et le débit massique si l'on est en phase "air de référence". La température et l'humidité relative de l'air ambiant sont aussi notés. La colonne "intensité odorante" est détaillée dans le chapitre relatif à l'approche quantitative.

La photo 2.7 montre une vue générale du CET d'Hallembaye, et les photos 2.8, 2.9 et 2.10 montrent les conditions de mesure des odeurs respectivement à proximité des déchets frais, des mâchefers et du biogaz.



Photo 2.7 : Vue générale du CET d'Hallembaye



Photos 2.8 et 2.9 : Conditions de mesure des odeurs aux alentours des déchets frais et des mâchefers



Photo 2.10 : Conditions de mesure des odeurs à proximité des puits de biogaz

2.5. Sélection de la variable d'entrée.

Rappelons que le signal brut enregistré aux bornes des capteurs TGS est une variation de résistance. Appelons R la valeur de résistance observée après stabilisation du signal en phase d'activation du capteur par le gaz odorant et R_0 la résistance correspondant à l'air de référence. Nous observons toujours une valeur de R inférieure à R_0 et une diminution de résistance lorsque la concentration du gaz étudié augmente : un signal brut faible correspond donc à une bonne réaction du capteur.

Différentes manières de conditionner le signal peuvent être envisagées suivant que l'on souhaite une information qualitative (discrimination entre différentes odeurs) ou quantitative (sensibilité à l'intensité odorante).

2.5.1. Information qualitative.

On recommande généralement l'utilisation de $R_{normalisée} = \frac{R}{\sqrt{\sum_i R_i^2}}$, où R est la

résistance d'un capteur particulier et les R_i sont les résistances de tous les capteurs appartenant au réseau. Cette solution revient donc à considérer des signaux relatifs pour chaque capteurs et semblait effectivement la plus adéquate pour la discrimination entre différentes odeurs. Cette discrimination devrait être indépendante de la concentration pour autant que tous les capteurs du réseau répondent dans une gamme de sensibilité identique pour une concentration odorante identique.

2.5.2. Information quantitative.

Le signal brut R sera par contre plus efficace lorsqu'il s'agit d'évaluer l'intensité odorante. On se rapprochera d'autant plus de la zone caractéristique de l'air pur que l'odeur est plus faible.

Cependant, on préfère en général travailler avec une expression normalisée. En effet, si l'on suppose qu'il existe un problème de dérive des capteurs (dû à la vieillesse de ceux-ci),

la normalisation devrait l'atténuer pour autant qu'il soit du même ordre pour tous les capteurs. Pour s'affranchir des effets de dérive, il est également opportun d'inclure la valeur R_0 de la ligne de base dans l'expression considérée :

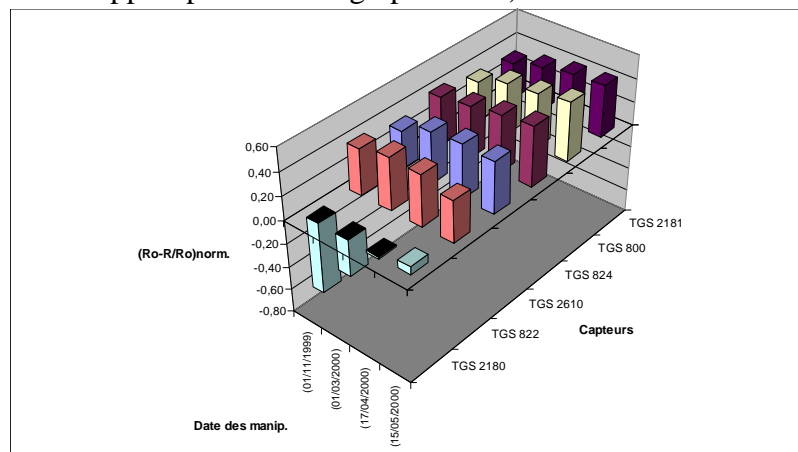
$$-\frac{R_o - R}{R_o} \text{ normalisé} = \frac{(R_o - R)/R_o}{\sqrt{\sum ((R_{oi} - R_i)/R_i)^2}}$$

Cette expression est la plus souvent conseillée dans la littérature puisqu'elle permet de travailler avec une variable augmentant avec la concentration gazeuse, relative à la ligne de base, qui constitue l'étalon et est normalisée par rapport à l'ensemble des capteurs.

2.6. Dérive du réseau de capteurs.

Notre réseau, composé de 6 capteurs non-sélectifs à oxyde d'étain, peut dériver au cours du temps suite à une modification de la résistance brute de certains capteurs dans l'air. Ce phénomène pouvait être problématique dans la mesure où des résultats obtenus à des périodes différentes dans les mêmes conditions de travail ne seraient plus comparables. Notons cependant qu'un réseau de 12 capteurs non spécifiques de type Figaro utilisé sur un banc d'essais au laboratoire depuis environ 3 ans n'avait pas montré d'effet de dérive important. Néanmoins, afin de minimiser cet effet de dérive potentiel, un pré-traitement des données par changement de variable comme mentionné ci-dessus (§2.5.) est souvent conseillé dans la littérature avant d'appliquer une méthode de reconnaissance des modèles [Corcoran P. et al., 1994; De Brito V., 1997].

Pour pouvoir apprécier l'importance de ce phénomène de dérive, une manipulation de référence à l'éthanol au laboratoire (calibration) a été mise en place dès le début des essais sur le terrain et a été renouvelée environ tous les deux mois. Les résultats n'ont montré une dérive significative que pour le capteur principalement sensible à l'humidité -TGS 2180- (cf. résultats présentés au rapport précédent et graphe 2.11.).



Graphe 2.11. : évolution de la dérive des 6 capteurs au cours des 4 manipulations de référence à l'éthanol (variable d'entrée (R-R/Ro) normalisée sur l'ensemble des capteurs.

CHAPITRE III: Traitements des données: Rappels théoriques.

3.1. Introduction.

Quelle que soit l'application envisagée, une phase d'apprentissage est requise pour permettre à l'appareil de reconnaître et de classer les différents composés gazeux à identifier. Toutes les odeurs rencontrées sur le site d'Hallembaye devaient donc lui être préalablement soumises puisque dans notre cas, on souhaitait rendre le nez électronique performant pour la discrimination des odeurs générées par le C.E.T. (aspect qualitatif) ainsi que pour diverses concentrations (aspect quantitatif).

Pour chaque échantillon analysé, l'acquisiteur enregistre les réponses fournies par les 6 capteurs + une CTN interne ("motif") qui doivent être ensuite traitées par une analyse statistique adéquate: pour l'aspect qualitatif, c'est l'analyse discriminante tandis que pour la partie quantitative nous utiliserons des modèles de régression multilinéaires (type "Partial Least Squares"). Ce chapitre permet de faire brièvement les différents rappels théoriques permettant une compréhension des résultats exposés dans la suite du présent rapport.

3.2. Analyse discriminante.

3.2.1. Principes élémentaires.

Il s'agit d'un traitement statistique très proche de l'analyse en composantes principales (A.C.P.) qui, au lieu de représenter une donnée par un point dans un espace à n dimensions (n étant le nombre de capteurs), consiste à construire de nouvelles variables (les composantes principales), combinaisons linéaires des anciennes. Elles sont construites hiérarchiquement et leurs coefficients sont calculés de manière telle que les premières composantes principales permettent déjà de retenir la plus grande partie de l'information contenue dans les variables originales (on parle de % de variance "capturée" ou expliquée par les composantes principales). En général, on considère les résultats comme "satisfaisants" si le choix d'une représentation en 2 dimensions, c'est à dire dans le plan des deux premières composantes, n'entraîne qu'une perte minimale d'information. La figure 3.1. illustre le principe de l'analyse factorielle. Si l'on possède suffisamment d'analyses pour chaque type de source, on peut alors réaliser une analyse statistique sur l'ensemble des données dans le but de séparer au mieux les différentes classes d'odeur étudiées.

Par ailleurs, on peut calculer aussi le coefficient de corrélation de chaque ancienne variable avec chaque composante principale, qui est alors utilisé comme coordonnée pour représenter les anciennes variables comme des points, toujours dans le plan des deux premières composantes principales. Deux capteurs proches signifient ainsi qu'ils sont redondants pour la discrimination des odeurs, car leurs signaux sont très corrélés.

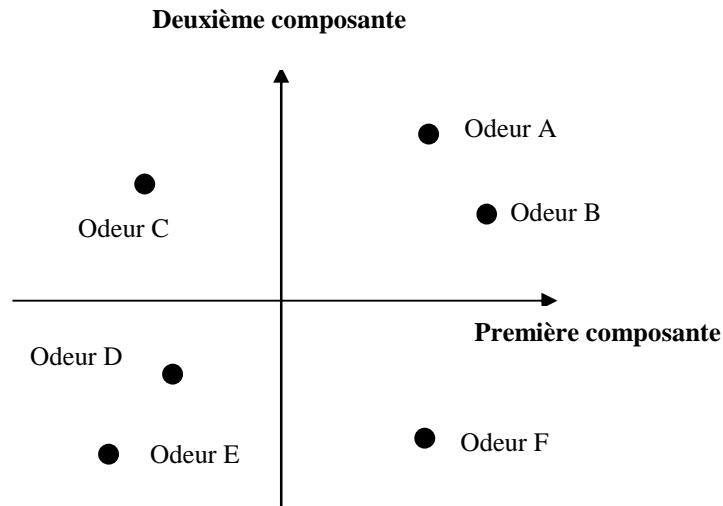


Fig. 3.1. Représentation des observations dans le plan des deux premières composantes principales.

3.2.2. Analyse discriminante.

En tant que variante supervisée d'une P.C.A., l'analyse discriminante consiste également à trouver de nouvelles variables (les fonctions discriminantes), combinaisons linéaires des anciennes, mais dont les coefficients sont cette fois calculés sur base de la connaissance a priori des groupes d'observations (technique linéaire supervisée), à savoir dans notre cas les différentes sources d'odeurs observées sur le site (déchets frais, biogaz....). On crée ainsi un nouvel espace de variables dans lequel les centres de gravité des différents groupes d'observation connus sont le plus écarté possible de façon à créer des nuages denses bien distincts. De nouveau, le choix d'une représentation en deux dimensions permet généralement de visualiser les différentes classes.

La procédure d'apprentissage aboutit au calcul des «fonctions de classification», c'est à dire à la calibration d'un modèle, permettant le classement d'un échantillon inconnu (odeur non identifiée soumise au réseau de capteurs) dans un groupe selon sa similitude avec les échantillons utilisés pour la calibration. On affectera l'observation enregistrée par notre réseau de capteurs à la source pour laquelle elle a le plus fort résultat de classification.

Les fonctions de classification sont du type :

$$S_i = C_i + W_{i1} * X_1 + W_{i2} * X_2 + \dots + W_{im} * X_m \text{ avec}$$

X_m = valeur enregistrée par le $m^{i\text{ème}}$ capteur transformée par l'algorithme de prétraitement choisi,
 W_{im} = facteur de pondération de la $i^{\text{ème}}$ source (i de 1 à 3) pour le $m^{i\text{ème}}$ capteur,
 C_i = constante pour la $i^{\text{ème}}$ source.

Dans une phase d'apprentissage supervisé, ce sont donc les différents paramètres du modèle, ici les W_{im} et les C_i , qui seront ajustés pour faire correspondre au mieux les motifs de signaux à la source correspondante d'odeur. Nous serons ainsi en mesure de fournir autant de fonctions de classification que de sources odorantes (3 dans notre cas) ainsi qu'une fonction relative à un air non odorant (suite à un apprentissage réalisé à 3km du C.E.T.). Cette dernière

source est nécessaire si l'on veut pouvoir suivre par la suite en continu la présence-absence d'odeurs sur le site.

On voit donc dans le cas de notre application qu'à partir des différents "motifs" enregistrés par le réseau de capteurs aux différentes sources odorantes, on construit donc un modèle statistique de reconnaissance qui permettra un suivi continu des émissions olfactives sur le site. Le tout est d'établir une classification prédictive en temps réel des signaux enregistrés grâce aux fonctions de classification déduites du modèle finalisé. De nombreuses études réalisées précédemment par notre laboratoire en matière de reconnaissance des odeurs avaient déjà montré tout l'intérêt d'utiliser l'analyse discriminante pour ce type de travail [ROMAIN AC. et al, 1999].

L'analyse discriminante peut éventuellement être mise en œuvre dans une démarche pas-à-pas («stepwise») : le nombre de variables originelles prises en compte étant incrémenté à chaque pas. Une telle démarche permet d'identifier les variables (ici des capteurs) qui seraient les moins utiles pour la classification des odeurs étudiées.

3.3. Analyse quantitative.

3.3.1. Régressions multilinéaires.

Outre la capacité à discriminer différentes sources odorantes, on souhaite, dans de nombreuses applications, que le détecteur de nuisances olfactives fournisse une indication quant à l'intensité odorante. Pour réaliser la calibration de notre réseau de capteurs à ce type de mesure, ce sont les méthodes de régressions multilinéaires qui s'avèrent les plus adaptées.

Ces méthodes largement développées dans la littérature et répandues en chimie quantitative [Kramer R., 1998], permettent d'obtenir une matrice de calibration A pour toute expression du type :

$$\mathbf{Y}_{\text{block}} = \mathbf{A} * \mathbf{X}_{\text{block}} \quad (1)$$

où $\mathbf{X}_{\text{block}}$ est constitué des signaux provenant du réseau de capteurs et $\mathbf{Y}_{\text{block}}$ correspond aux variables dépendantes, que nous chercherons à prédire. La calibration du modèle, sur base des observations réalisées à la fois sur $\mathbf{X}_{\text{block}}$ et sur $\mathbf{Y}_{\text{block}}$ permettra, en fait, de connaître la matrice des coefficients A. La matrice $\mathbf{Y}_{\text{block}}$, de dimensions (nxp) des variables dépendantes est constituée de valeurs quantitatives, telles que l'intensité de l'odeur perçue par l'opérateur ou la concentration en H₂S ou CH₄. En particulier, la matrice $\mathbf{Y}_{\text{block}}$ peut devenir un simple vecteur (nx1) lorsqu'on considère uniquement comme variable dépendante l'intensité odorante.

Dans le cas de notre application, $\mathbf{Y}_{\text{block}}$ correspondra donc à l'ensemble des valeurs d'intensité odorante estimées par le chercheur pour chaque cycle de prélèvement. $\mathbf{X}_{\text{block}}$ correspondant aux valeurs des 6 capteurs enregistrées au moment précis de l'estimation du Y. On admettra facilement qu'une double source d'erreur existe, à la fois dans l'estimation in situ de l'intensité perçue mais aussi au niveau de la mesure enregistrée par le réseau de capteurs suite aux interférences connues (t°, HR). L'équation (1) ne présente donc pas de solution exacte.

Suivant la méthode choisie pour effectuer la régression, la calibration de la matrice A est réalisée différemment. Dans le cas des méthodes classiques de régression multilinéaires

(M.L.R.)², cette calibration est faite avec un ensemble d'observations de terrain pour lesquelles on connaît à la fois X_{block} et Y_{block} . Cependant, le modèle calibré est un peu "artificiel" puisqu'il tient compte de tous les capteurs, même si certains d'entre eux réagissent moins bien à l'odeur. La matrice A est donc davantage optimisée par le critère purement mathématique que pour notre objectif "physique" de liaison entre l'intensité et la réponse des capteurs. Le modèle fonctionne bien sur les valeurs ayant servi à la calibration, mais probablement moins bien sur de nouvelles observations.

Dans le cas des méthodes de régression sur les composantes principales³ (cf. § 3.2.1.) l'équation (1) devient :

$$\mathbf{Y}_{\text{block}} = \mathbf{A} * \mathbf{W}_{\text{block}}$$

où W_{block} est un nombre limité de composantes principales des variables (signaux capteurs) initiales. On calibre A à l'aide d'observations où l'on connaît les Y_{block} et pour lesquelles on sait calculer les W_{block} à partir des signaux mesurés. Mais cette fois, les W_{block} représentent mieux la variabilité du phénomène en intégrant son sens physique. En outre, les composantes principales sont hiérarchisées et "capturent" la variance par ordre décroissant (la 1^{ère} explique le maximum de variabilité) permettant ainsi de limiter le modèle aux 2 ou 3 premières composantes principales dans la relation (qui expliquent à elles seules la majeure partie de la variabilité totale). Cependant, les composantes principales (W_{block}) sont toujours calculées dans une étape préliminaire, uniquement sur base des signaux X_{block} de façon indépendante des Y_{block} .

Enfin, la méthode de type P.L.S.⁴ effectue une double régression : à la fois sur les composantes principales de X_{block} , mais également sur les composantes principales du Y_{block} . On parlera de composantes principales "optimisées" puisque cette fois ci, elles sont calculées en tenant compte de l'intensité odorante (variable dépendante) à laquelle elles devront être reliées par la régression.

3.3.2. Régressions P.L.S.

C'est la dernière méthode qui sera retenue dans le cadre de nos essais de calibration d'un modèle de reconnaissance quantitatif. En effet, l'application supplémentaire d'une régression sur les valeurs estimées de Y permet d'obtenir une matrice de calibration plus représentative de la variable Y estimée (meilleure validation du modèle par la suite dans notre cas) mais également plus précise (élimination des "bruits" ou interférences) [Kramer R., 1998]. En fait, tout l'intérêt de la méthode réside dans le fait qu'elle s'attache à expliquer la variance de X_{block} tout en recherchant une corrélation maximale avec les valeurs du Y_{block} .

Le traitement des données a été réalisé à l'aide d'une application particulière (PLS_Toolbox 2.0®) développée dans MATLAB™ [Gallagher N.B. & Wise B., 1998].

On effectue l'apprentissage sur le réseau à différents niveaux de concentration estimés par un opérateur sur place lors des enregistrements. Dans ce cas, il faut trouver les combinaisons des variables initiales (les réponses des n capteurs) permettant de suivre au mieux l'évolution de l'intensité odorante et définir, en s'appuyant sur l'analyse olfactive

² en Anglais: MLR ou Multiple Linear Regression

³ en Anglais: PCR ou Principal Components Regression

⁴ en Anglais: PLS ou Partial Least Squares

menée en parallèle, des régions dans l'espace des nouvelles variables créées définissant par exemple les classes suivantes : odeur nulle, odeur faible mais non dérangeante, odeur dérangeante (cf. système catégoriel développé dans le chap.5). Suite à cet apprentissage, on pourra alors classer directement tout nouvel échantillon prélevé de l'odeur concernée.

3.4. Analyse des données météorologiques.

Nous aborderons le traitement des données "odeur" en fonction des facteurs climatiques sous deux aspects différents :

- analyse de la variance multivariée (MANOVA)
- analyse factorielle des correspondances multiples (AFC).

3.4.1. Analyse de la variance.

3.4.1.1. Introduction.

Dans une première étape, notre raisonnement était de chercher à déterminer, parmi l'ensemble des variables météorologiques retenues, celles qui jouaient un rôle dans la transmission ou non des odeurs entre la source et les villages riverains. Nous avons ainsi réalisé des analyses de la variance multivariée (plusieurs variables dépendantes) à un seul critère ou facteur de classification (ANOVA d'ordre 1).

Il s'agit en fait de tester l'hypothèse d'égalité des moyennes H_0 entre deux groupes considérés selon le critère "jour odeur" ou "jour non odeur" pour chaque paramètre climatique. Si l'hypothèse est "validée", on en déduira que la variable météorologique n'est pas un bon indicateur pour un suivi des répercussions possibles entre l'émission et l'immission. La procédure suivie est celle du logiciel STATSOFT™.

3.4.1.2. Rappel théorique.

Les principes de cette méthode d'inférence statistique peuvent se trouver facilement dans la littérature [Dagnelie, 1970]. Fondamentalement, l'analyse s'attache à comparer la variance inter-groupe (somme des carrés des écarts basée sur la moyenne globale) avec la variance intra-groupe (somme des carrés des écarts basée sur la moyenne propre à chacun des deux groupes). Le ratio de ces deux valeurs nous donne une mesure de la dispersion des valeurs entre les deux groupes (variance de l'effet) par rapport à la dispersion des valeurs au sein d'un même groupe (variance de l'erreur). Si cette valeur est supérieure à 1, on a de fortes chances de conclure à une influence de la variable météo sur notre facteur "jour odeur" ou "jour non odeur". C'est par la réalisation d'un test du F que l'on pourra ou non conclure si le ratio des deux estimations des variances est significativement supérieur à 1, pour le niveau de probabilité considéré (5% dans notre cas).

3.4.2. Analyse factorielle des correspondances multiples.

Les principes de base de cette méthode ont été présentés de façon simple par plusieurs auteurs [Palm, 1992; Besse 1999] : il s'agit d'une méthode factorielle, très proche de l'analyse en composante principale, dont la table d'entrée (tableau de contingence) reprend pour nos deux catégories d'observations ("odeur" et "non odeur") les fréquences relatives à chaque critère de classification (critère = variable météo) que l'on souhaite analyser. Etant donné que l'on parle de fréquences, chaque variable météo doit donc être scindée en classes. Cela va de soi pour la direction du vent et les classes de stabilité de Pasquill (cf. § 6.3.2.), par contre,

pour les variables continues telles la nébulosité, l'H.R. moyenne, la température ou la vitesse du vent nous avons du créer ces classes ou modalités nous-mêmes, le plus judicieusement possible (cf. tableau 6.6.).

Le tableau ainsi obtenu est analysé comme une matrice à deux entrées dont les lignes (ou points-ligne) sont nos deux catégories – jours odeurs et jours non odeurs- tandis que les colonnes (ou points-colonne) sont les différentes modalités ou classes définies pour chaque critère ou variable météorologique.

Le principe reste a peu de choses près très similaire à celui d'une A.C.P. En effet, en termes de représentation géométrique, les points lignes peuvent être représentés dans un espace à p dimensions (p étant le nombre de modalités total pour les 6 variables) comme pour une A.C.P. L'analyse va ainsi nous permettre de représenter dans un sous-espace factoriel à deux dimensions (axes = 2 premiers vecteurs propres de la matrice, avec au total $p-1$ vecteurs propres possibles) les points-lignes et les points-colonnes tout en essayant d'expliquer un maximum de la variance de départ (on a donc réduit le nombre de dimensions).

Pratiquement, si deux points sont proches dans le sous-espace vectoriel à deux dimensions considéré on pourra conclure à la similitude des "profils", c'est-à-dire à une similitude entre le point-ligne relatif au "jours odeurs" et certains points-colonne proches relatifs aux classes des variables météorologiques (même raisonnement pour le point-ligne "jours non odeurs"). Il ne faut cependant pas perdre de vue que deux points proches dans un espace à deux dimensions peuvent être très éloignés si l'on rajoute une autre dimension : l'interprétation des résultats doit donc se faire en tenant compte de différents paramètres (contribution à l'inertie des axes, cosinus carrés...) calculés pour chaque point lors de l'analyse.

Il faut également garder à l'esprit lors de l'interprétation des représentations graphiques que l'on se trouve dans un cas d'A.F.C. multiple avec certaines différences par rapport à une AFC classique de deux variables [Besse, 1999] :

- comme pour une AFC classique, les modalités suffisamment éloignées du centre du graphique sont considérées comme participant de façon importante au problème,
- les proportions de la variance totale expliquée par les valeurs propres successivement décroissantes ne sont pas interprétables comme indicateurs de qualité globale de la représentation,
- les coefficients de qualité de représentation de chaque point ne peuvent pas être interprétés; seules la contribution d'un point à l'inertie des axes est interprétée selon le même principe qu'en A.F.C. classique.

CHAPITRE IV: Calibration et essais de validation d'un modèle de reconnaissance olfactive des sources d'émission du site d'Hallembaye.

4.1. Objectifs.

Le couplage à une information qualitative sur les odeurs émises⁵ détectées par un appareillage adéquat (relevant de la technologie des nez électroniques) constituait un sujet de recherche très prometteur dans le but d'affiner les conditions de fonctionnement de ce système d'aspersion, répondant ainsi à des préoccupations à la fois écologiques et financières (limitation des quantités de produits utilisées).

L'appareil développé devrait idéalement nous permettre une reconnaissance de l'odeur émise par 3 sources potentielles: des émissions de type "biogaz", de type "mâchefers" (vapeurs de déchets d'incinération) ou de type "déchets frais" (déchets ménagers divers). Ces trois odeurs devaient aussi pouvoir être différenciées d'un air non odorant (prélevé en amont du C.E.T.).

Les résultats obtenus lors des premiers essais nous avaient permis de suggérer une remarque selon laquelle il semblait nettement plus difficile de discriminer des odeurs prélevées dans le même environnement (sur le même site), où un certain "recouvrement ou mélange" est tout à fait possible, par rapport à des odeurs de nature complètement différentes prélevées dans des endroits tout à fait séparés. Dans notre cas, les trois sources d'émission étant effectivement très proches, nous pouvions être amenés, selon les résultats obtenus, à redéfinir le problème en ne testant que la discrimination entre la présence d'air odorant -sans distinction du type de source- et celle d'un air inodore (type "amont"). Notons également que la principale source de nuisances observées pour les villages riverains étant presque exclusivement due aux émissions de déchets frais, nous voulions aussi tester un modèle uniquement calibré sur une double reconnaissance "déchets frais- air inodore".

4.2. Calibration du modèle.

4.2.1.Introduction.

Notre travail consiste donc à réaliser cette phase d'apprentissage ou de "calibration" de notre réseau de capteur pour chacune des 3 sources mais également sur un air "non odorant" de manière à pouvoir déceler l'absence d'émissions odorantes le cas échéant (on aura donc en fait quatre fonctions de classification). Nous avons choisi de réaliser cette calibration à quelques kilomètres en amont du C.E.T. de manière à conserver les mêmes propriétés physiques (t° , H.R.) de l'air. A partir du modèle établi, une campagne d'acquisition spéciale de données en continu sera mise en place de manière à valider les fonctions de classification obtenues.

4.2.2. Sources de variation.

Il s'agissait, outre le phénomène de dérive des capteurs et de variation des propriétés physiques (T° et H.R.) du gaz déjà abordés au Chap. II, de l'influence de la tension d'alimentation, de la température dans l'enceinte des capteurs et du débit du mélange gazeux soumis au réseau.

⁵ En effet, le contrôle du système actuel fait appel aux seules variables météorologiques (vitesse et direction du vent, température, pluviosité)

Sur base des premiers essais réalisés, un certain nombre d'informations indispensables avaient été déduites, dont la nécessité de suivre un protocole d'acquisition standardisé sur plusieurs mois (cf. § 2.4).

4.2.3. Acquisition des données.

Pour les raisons explicitées ci-dessus, la campagne de prélèvements destinée à la calibration du modèle s'est étendue du printemps jusqu'à la fin de l'été 2000. Le tableau suivant reprend brièvement les 9 sorties effectuées sur le site d'Hallembaye ainsi que les conditions climatiques générales observées lors de l'acquisition.

Tableau 4.1.: dates et conditions climatiques lors des 9 journées de prélèvements pour la calibration du nez électronique.

Journée de prélèvement.	conditions climatiques générales.
28 février 2000	ciel couvert, temps froid et pluvieux
24 mars 2000	ciel couvert, pluie, vent fort
05 avril 2000	ciel très couvert sans pluie, vent frais
13 avril 2000	ciel bleu, t° fraîche, vent violent
20 avril 2000	ciel bleu, temps ensoleillé
27 avril 2000	ciel couvert à dégagé, temps chaud, vent moyen
04 mai 2000	ciel dégagé, temps ensoleillé, pas de vent
11 mai 2000	ciel couvert, temps chaud, vent moyen
16 juin 2000	ciel bleu, t° élevée, vent faible

4.2.4. Sélection de la variable d'entrée.

Nous testerons trois variables d'entrée ou "algorithmes de pré-traitements" (cf. § 2.5.) calculés à partir des valeurs de tension mesurées aux bornes de chaque capteur: la résistance brute R , la résistance normalisée sur l'ensemble des capteurs $R_{normalisée} = \frac{R}{\sqrt{\sum_i R_i^2}}$ et la résistance

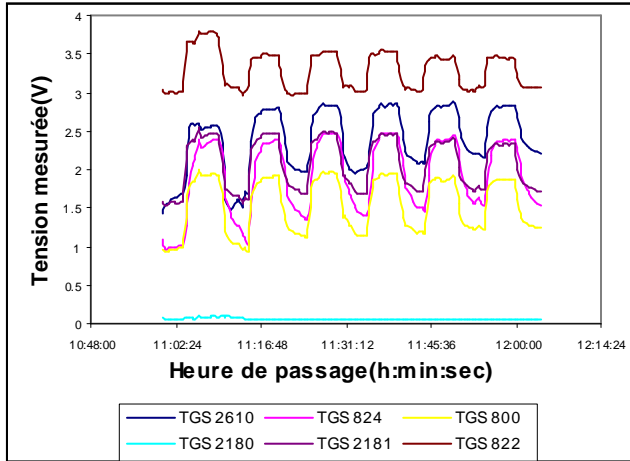
relative à la ligne de base normalisée sur l'ensemble des capteurs $-\frac{R_o - R}{R_o} normalisé = \frac{(R_o - R)/R_o}{\sqrt{\sum_i ((R_{oi} - R_i)/R_i)^2}}$. Dans le cas de la résistance brute, nous testerons également

l'intégration dans le modèle des valeurs de résistance d'une CTN⁶ (sonde de température) placée à l'intérieur de l'enceinte des capteurs, répondant ainsi à la remarque formulée au § 2.4.1. L'intégration du facteur "humidité" se fait implicitement puisque un des capteurs avait été initialement choisi pour sa sensibilité à la vapeur d'eau (TGS 2180).

Pour la calibration du modèle final, la meilleure variable d'entrée sera retenue sur base d'une validation de l'apprentissage avec de nouvelles données.

Le graphique 4.2. ci-dessous montre les valeurs de tension enregistrées par les 6 capteurs de notre réseau à la source d'émission de "déchets frais" le 24 mars 2000. On distingue clairement une alternance cyclique (toutes les 5 minutes) entre des valeurs faibles (passage de l'air de référence, V_o) et élevées (passage d'air odorant, V).

⁶ CTN: Thermistance à coefficient de température négatif.



Grphe 4.2.: valeurs de tension enregistrées par le réseau de 6 capteurs à la source "déchets frais" le 24/03/00.

Sur base de chaque cycle de 10 minutes, nous nous proposons d'extraire une seule valeur de R_o (passage d'air de référence) et une seule valeur de R (passage d'air odorant ou d'air "amont") que nous utilisons dans le modèle de discrimination. Pour chaque cycle enregistré, notre démarche consistait donc à choisir ces valeurs de V et V_o le plus judicieusement possible parmi l'ensemble des valeurs enregistrées sur un cycle (1 toutes les 30 sec.) pour ensuite être introduites dans l'analyse discriminante après le traitement algorithmique. Pour le choix de V et de V_o , on prendra toujours la valeur après stabilisation du signal (qui peut être une V moyenne sur quelques points). A l'issue des 9 sorties programmées, nous disposons ainsi d'une banque de données pour l'apprentissage de + de 200 valeurs dont la répartition par source est donnée par le tableau suivant:

Tableau 4.3.: nombre de données "odeurs" sélectionnées pour calibrer le modèle de discrimination.

mâchefers	biogaz	déchets frais	amont
57	53	52	39

4.2.5. Résultats.

4.2.5.1. Discrimination des 4 sources.

Les résultats sont présentés au tableau 4.4.a. Les différents cas testés sont:

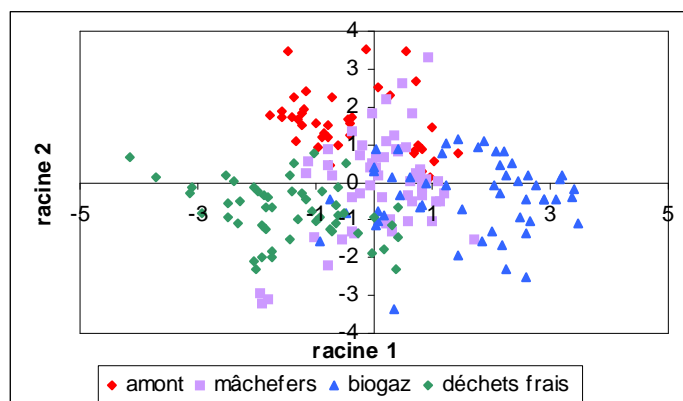
1. Résistance brute des 6 capteurs + sonde de température interne,
2. Résistance brute des 6 capteurs,
3. Résistance brute de 5 capteurs (on a enlevé le capteur sensible à l'humidité) + sonde de température interne,
4. Résistance brute de 5 capteurs,
5. Résistance normalisée des 6 capteurs,
6. Résistance normalisée des 6 capteurs par rapport à un air de référence R_o .

Les deux premières colonnes du tableau 4.4a permettent de se faire une idée de la significativité de la discrimination, qui sera d'autant meilleure que le Lambda de Wilk's est proche de zéro et la valeur du test F approchée élevée. Les quatre autres colonnes reprennent les pourcentages d'observations bien classées par les quatre fonctions de classification établies par le modèle.

Tableau 4.4.a: résultats de l'analyse discriminante et pourcentage de classification correcte des observations par source (mf= mâchefers, bg= biogaz, df= déchets frais, R= résistance du capteur pour gaz odorant, R_{CTNi} = résistance de la sonde de t° dans enceinte des capteurs, Ro= air de référence).

	λ Wilk's	F appr.	amont (%)	mf (%)	bg (%)	df (%)
1. Rbrute(6) +R CTN_i	0.2360	17.07	82.05	47.36	66.03	82.69
2. R brute(6)	0.25	18.49	79.48	49.12	66.03	82.62
3. R rute(5) +R CTN_i	0.4066	11.31	82.05	35.08	47.16	82.69
4. R brute(5)	0.4549	11.73	71.79	29.82	43.39	82.69
5. Rnorm. (6)	0.3837	12.16	43.58	49.12	67.92	63.46
6. (Ro-R/Ro) norm. (6)	0.1368	35.99	58.06	35.41	52.27	69.76

La meilleure discrimination et classification d'observation est obtenue pour le modèle basé sur la résistance brute des 6 capteurs et les valeurs de résistance de la $CTN_{interne}$ (cas 1 tableau 4.4.a,b et graphe 4.5.) même si l'on remarque que la discrimination des sources mâchefers et biogaz est nettement moins évidente.



Graphe 4.5.: représentation des observations dans le plan des deux premières racines de l'analyse discriminante pour la variable d'entrée R brute '6 capteurs + R_{CTNi} '.

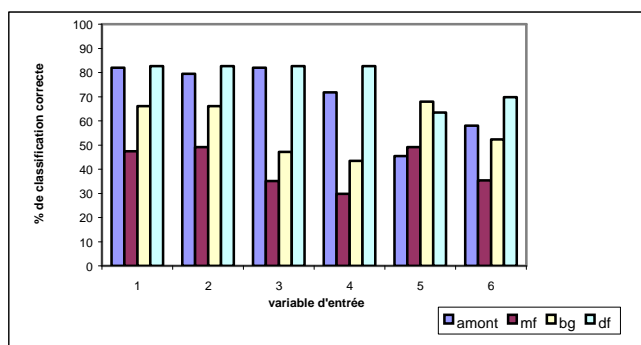


Tableau 4.4.b: résultats de l'analyse discriminante et pourcentage de classification correcte des observations par source pour les 6 cas de variable d'entrée du tableau 4.4a (6 cas).

Signalons que des études réalisées au laboratoire (dans le domaine de l'agro-alimentaire notamment) montrent généralement des séparations nettement meilleures entre les sources (en comparaison, la relative faiblesse de nos résultats doit être imputée aux variations des conditions ambiantes *in situ* d'une journée de prélèvement à l'autre).

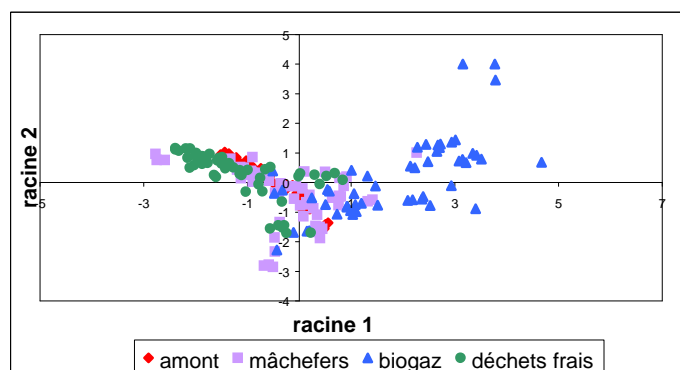
Si l'on ne tient plus compte de la $CTN_{interne}$ (cas 2), on obtient une discrimination quasi similaire tout en perdant +/- 3% de classification correcte pour l'air prélevé en amont du C.E.T. Ce résultat nous semble très intéressant en soi, dans la mesure où l'on tend à démontrer que la prise en compte de la température dans l'analyse discriminante suggérée par [KELLER P., 1994] permettrait effectivement de réduire son effet d'interférence. En ce qui concerne le facteur "humidité", lui aussi considéré comme un bruit, il a été intégré implicitement dans l'analyse discriminante puisqu'un de nos 6 capteurs lui est presque exclusivement sensible.

Lorsque nous testons un modèle construit sans la contribution de ce capteur sensible à la vapeur d'eau (cas 3 et 4), nous obtenons des résultats pratiquement similaires excepté pour la source mâchefers, plus facilement confondue avec la source biogaz située à proximité (de -14 à 20% de classification correcte). Cette situation nous paraît facilement compréhensible dans la mesure où les gaz mâchefers sont peu odorants mais très riches en vapeur d'eau qui constitue donc un élément essentiel de la signature caractéristique enregistrée par notre réseau de capteur.

Les résultats obtenus pour les deux autres variables d'entrée (cas 5, graphe 4.6. et cas 6) sont nettement moins encourageants: la normalisation par rapport à l'ensemble des capteurs, voire par rapport à l'air de référence (ligne de base) entraîne une perte d'information importante pour la calibration d'un modèle de discrimination.

A ce stade de notre démarche, les résultats obtenus étant "assez médiocres" nous souhaitons progresser vers un autre type de modèle, plus performant.

Les résultats obtenus au tableau 4.4.a dans le cas de la R brute amenaient la remarque selon laquelle l'air amont (non odorant) était toujours bien différencié des 3 sources odorantes même si au sein de ces 3 dernières la discrimination semblait moins aisée: ceci nous amena à tester ci-dessous un modèle simplement construit sur "air amont inodore" et "air odorant indifféremment issu des 3 sources d'émission".



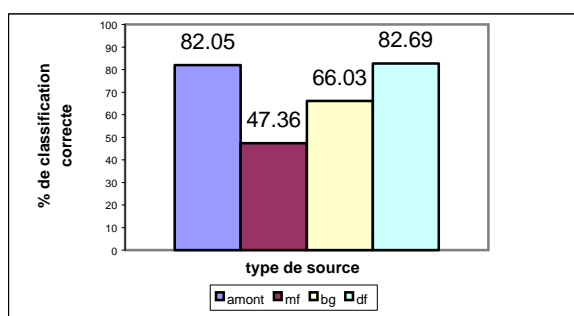
Graphique 4.6.: représentation des observations dans le plan des deux premières racines de l'analyse discriminante pour la variable d'entrée R normalisée'.

Dans le cas où l'air de référence était pris en considération (cas 6 du tableau 4.4.a), les valeurs obtenues pour le λ Wilk's et le test du F étaient meilleures que dans tous les autres cas, nous suggérant ainsi que de meilleurs résultats de classification pourraient être obtenus moyennant quelques adaptations du modèle, décrites au § 4.2.5.3.

Si l'on observe le détail de classification (tableau 4.7.a,b) pour le cas 1 du tableau 4.4.a (meilleur résultat), on se rend compte que l'air amont peut-être surtout confondu avec la source mâchefers; nous remarquons en effet que d'un point de vue purement olfactif les émissions mâchefers ne sentent pratiquement pas (car saturées en eau). De plus, la discrimination entre mâchefers et biogaz est également mal aisée: ceci pourrait s'expliquer par la proximité de ces deux sources avec possibilité de mélange des 2 odeurs lors de l'acquisition. Enfin, la source "déchets frais" est toujours quant à elle bien distincte des autres types d'odeurs: il s'agit effectivement d'une odeur très caractéristique (au niveau chimique) et spatialement éloignée des deux autres sources lors de l'acquisition. Ces deux remarques nous amèneront à tester également un dernier modèle construit uniquement à partir des données "amont et déchets frais".

Tableau 4.7.a : détail de classification correcte (sur la diagonale de la matrice) et incorrecte des observations par source pour le cas 1 décrit ci-dessus (variable d'entrée Rbrute +CTN_i).

	amont	mf	bg	df	TOTAL
amont	32	7	0	0	39
mf	13	27	10	7	57
bg	4	10	35	4	53
df	1	8	0	43	52



Graphe 4.7.b : détail de classification correcte des observations par type de source (variable d'entrée Rbrute +CTN_{int}).

4.2.5.2. Discrimination "odeur-air amont".

Nous avons tout d'abord testé un modèle de discrimination basé sur une distinction entre tous les types de source (4 types) tout en obtenant des résultats moyens. Nous avons également remarqué que la discrimination était surtout marquée entre source non odorante - "air amont"- et odorante "df-mf-bg" mais que, au sein des 3 sources odorantes, la distinction

n'était pas toujours aisée, ceci pouvant s'expliquer physiquement par un certain recouvrement entre les émissions de gaz porteurs de l'odeur entre les sources (surtout mâchefers et biogaz).

Le tableau 4.8. présente les résultats obtenus pour la calibration d'un modèle basé sur les mêmes variables d'entrée que pour le tableau 4.4a mais où les données relatives aux 3 sources odorantes ont été regroupées dans une seule classe "odeur". Les résultats obtenus sont naturellement meilleurs puisque l'on aborde plus simplement le problème en terme de "présence-absence" d'une odeur (ce qui est encore tout à fait acceptable au vu des objectifs).

Tableau 4.8.: résultats de l'analyse discriminante et pourcentage de classification correcte des observations (R= résistance du capteur pour gaz odorant, R_{CTNi} = résistance de la sonde de t° dans enceinte des capteurs, Ro= air de référence).

	λ Wilk's	F appr.	amont (%)	odeur (%)
1. R brute(6) +R CTN_i	0.6418	15.38	84.21	84.04
2. R brute(6)	0.6927	14.34	78.94	82.82
3. R brute(5) +R CTN_i	0.7046	13.55	86.84	81.59
4. R brute(5)	0.7751	11.31	89.47	74.23
5. R norm. (6)	0.9407	2.45	89.47	55.21
6. (Ro-R/Ro) norm. (6)	0.25	18.49	63.33	83.82

4.2.5.3. Discrimination "déchets frais- amont".

Dans une dernière étape, nous avons construit un modèle sur base des seules données relatives à l'air "amont" et la source d'émissions "déchets frais" étant donné qu'il s'agissait des deux sources les mieux discriminées au vu des résultats du tableau 4.4.a. De plus, les émissions "déchets frais" constituant la seule source de nuisances réelles pour les villages riverains, il nous semblait déjà très intéressant de calibrer un modèle simplement basé sur une différenciation entre cette source et un air non odorant de type "amont". Les résultats du tableau 4.9. pour deux variables d'entrée (R brute et R normalisée rapportée à la ligne de base ou air de référence) sont excellents dans les deux cas.

Tableau 4.9.: résultats de l'analyse discriminante et pourcentage de classification correcte des observations (R= résistance du capteur pour gaz odorant, R_{CTNi} = résistance de la sonde de t° dans enceinte des capteurs, Ro= air de référence).

	λ Wilk's	F appr.	amont	df
1. R brute (6)	0.2181	42.50	100	98.07
2. (Ro-R/Ro) norm. (6)	0.4939	11.46	77.41	90.69

Dans le cas de la R brute comme variable d'entrée, nous avons testé la prise en considération supplémentaire des données relatives au passage de l'air de référence ainsi que

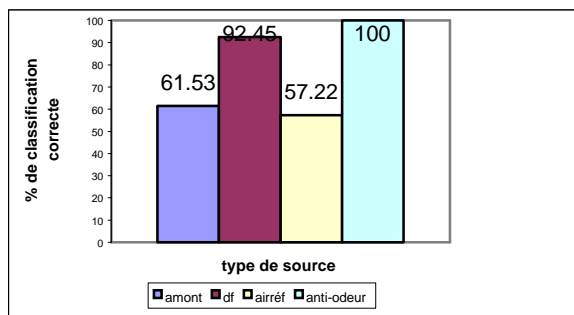
quelques données prélevées au niveau du rideau anti-odeurs: le nouveau modèle ainsi construit semble tout à fait concluant au vu des résultats du tableau 4.10.a,b:

- 92.5 % des données "déchets frais" (49 sur 53) sont correctement classées, jamais confondues avec l'anti-odeur,
- les données relatives à l'anti-odeur sont toujours bien classées, l'air "amont" ne peut-être confondu qu'avec l'air de référence (jamais "déchets frais" ou "anti-odeur"), ce qui ne pose aucun problème puisqu'il peut-être lui-même considéré comme un air de référence,
- l'air de référence peut également de son côté être confondu avec l'air "amont" (ce qui ne pose pas de problème réel) tandis que quelques observations sont confondues avec la source déchets frais (plus problématique mais seulement pour +/- 10% des observations).

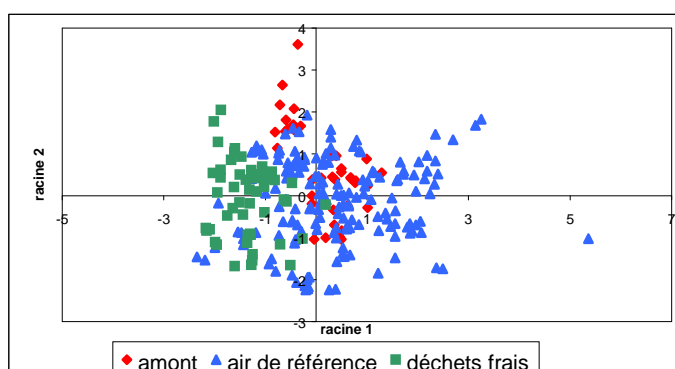
Tableau 4.10.a : détail de classification correcte (sur la diagonale de la matrice) et incorrecte des observations par source pour le cas 1 décrit ci-dessus (variable d'entrée R brute).

	amont	df	airréf	anti-odeur	TOTAL correct
amont	24	0	15	0	39
df	1	49	3	0	53
airréf	47	24	95	0	166
anti-odeur	0	0	0	28	28

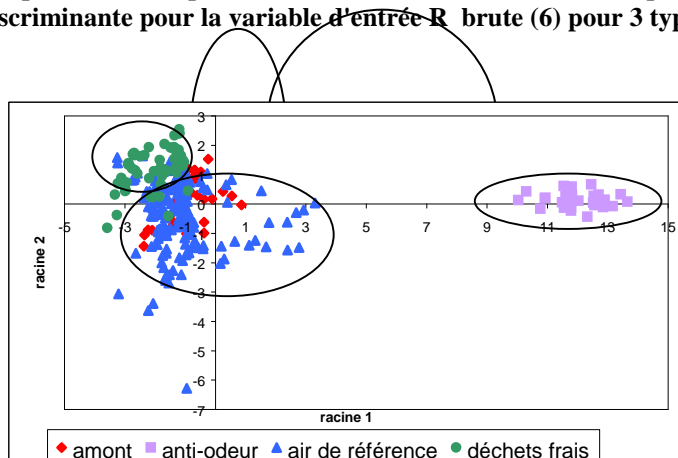
Tableau 4.10.b : détail de classification correcte des observations par type de source (variable d'entrée R brute).



Les deux graphes ci-dessous montrent une représentation des observations classées selon le modèle établi dans ce § pour la variable d'entrée R brute. Sur, le graphe 4.11.a on distingue nettement un groupe formé par "air de référence et air amont" et le groupe formé par les données "déchets frais". Si l'on rajoute les données "anti-odeur" (graphe 4.11.b), un troisième groupe bien distinct apparaît.



Graphe 4.11.a: représentation des observations dans le plan des deux premières racines de l'analyse discriminante pour la variable d'entrée R brute (6) pour 3 types de source.



Graphe 4.11.b: représentation des observations dans le plan des deux premières racines de l'analyse discriminante pour la variable d'entrée R brute (6) pour 3 types de source et le produit anti-odeur.

4.3. Validation du modèle.

4.3.1. Introduction.

Au cours de la première partie de l'année 2000, nous avons mis en place une campagne de prélèvements des émissions olfactives au niveau de trois sources: biogaz, mâchefers et déchets organiques. Ceci nous a permis de calibrer plusieurs modèles de reconnaissance olfactive (qualitatifs) à partir des données issues de prélèvements ponctuels réalisés à proximité des sources et s'étendant chaque fois sur une journée.

Au cours du mois d'août, nous avons mis en place une campagne d'acquisition en continu avec notre nez électronique de manière à pouvoir disposer d'un jeu de données "indépendant" nous permettant de tester les modèles obtenus lors d'une étape de validation. En effet, il faut rappeler que pour l'étape de calibration, les classifications de données (ou prévisions *post hoc*) sont réalisées à partir des mêmes observations que celles qui ont servi à calculer les fonctions de classification du modèle. La meilleure manière de tester la valeur prédictive des fonctions obtenues pour les différents modèles passe donc par la classification d'observations qui n'ont pas encore été utilisées pour la calibration.

4.3.2. Prélèvement des données.

4.3.2.1. Mesures à l'émission.

Nous avons réalisé notre acquisition en continu au niveau de la station de contrôle (paramètres météorologiques et analyseurs de CH₄ et H₂S) située en périphérie du site à l'arrière du rideau anti-odeur. En effet, cette dernière constituerait l'endroit le plus stratégiquement intéressant en tant que destination finale de notre nez électronique pour un suivi continu ("online") des émissions. Les données ne sont donc plus prélevées aux sources, comme pour la phase d'apprentissage, rendant la validation plus complexe ainsi que l'appréciation olfactive du chercheur plus facilement biaisée sur le terrain.

La présence d'analyseurs du CH₄ et du H₂S contenus dans l'air était dans cette optique un facteur important puisque nous apportant des données supplémentaires que nous cherchions à corrélérer avec nos propres estimations d'émissions olfactives (cf. chap. V). L'entrée "air odorant" du nez électronique a de plus été raccordée au même niveau que la prise d'air des analyseurs afin de se placer dans les mêmes conditions expérimentales d'acquisition dans les deux cas (nos propres données + CH₄ et H₂S).

Différents scénarios sont testés avec notre nez électronique:

1. acquisition -odeur/air de référence- en alternance (régénération des capteurs par des cycles de 5 min.) comme pour la phase de calibration,
2. acquisition continue sans passage d'air de référence en cycles avec seulement des périodes intermittentes très courtes (qq min.) pour la régénération des capteurs par de l'air de référence.

Lors de l'enregistrement des données, un opérateur doit détecter la présence éventuelle d'une odeur dans l'air - biogaz, déchets frais ou mâchefers. Ces observations sont soigneusement répertoriées sur la fiche de terrain accompagnées des valeurs instantanées affichées par les analyseurs du CH₄ et du H₂S au moment précis de l'évaluation olfactive.

4.3.2.2. Mesures à l'immission.

La présence du surveillant communal du C.E.T. et alentours lors de cette campagne de prélèvements, nous a également permis de suivre l'apparition d'odeurs éventuelles à l'immission (villages riverains du C.E.T.) lorsqu'une odeur était détectée par l'opérateur au niveau de la station pilote (enregistrement des données à proximité de l'émission). Les zones touchées sont répertoriées sur une carte topographique, accompagné de la direction du vent et de l'heure où une odeur a été ressentie. Ces données pourront être exploitées dans le cadre d'une recherche plus approfondie des relations entre "odeurs à l'émission associées aux variables climatiques du moment" et "perception odorante à l'immission".

4.3.3. Résultats.

4.3.3.1. Introduction.

Nous avons testé tous les modèles qui avaient été envisagés lors du traitement des données en utilisant diverses variables d'entrées ainsi que divers groupements possibles des sources d'émissions. Il semble toutefois clair que seuls les modèles présentant de bons résultats de classification *a priori* (donc avec les mêmes données que pour la calibration des fonctions) avaient des chances de valider correctement nos nouvelles données (+/- au nombre de 80).

Notons que les données "odeur" rencontrées à la station de prélèvement lors de la campagne en continu ne concernaient que des émissions biogaz et déchets frais. Les données enregistrées qui ne présentaient pas d'odeur devaient être validées à partir de la fonction de classification établie par les prélèvements "amont" réalisés pendant la phase d'apprentissage.

4.3.3.2. Validation du modèle "amont/odeur".

La validation des modèles basés sur une distinction entre toutes les sources (amont-biogaz-mâchefers-déchets frais) n'a pu se réaliser en l'absence d'émissions mâchefers. Seul le cas 1 du tableau 4.4.a (R brute + CTN_i) présentait des résultats suffisamment bons pour valider correctement les données. Les essais de validation sur les seules sources biogaz et

déchets frais confirment d'ailleurs les tendances déjà envisagées plus haut: données biogaz et amont confondues avec la source mâchefers.

Nous nous sommes donc attardés plus particulièrement sur une éventuelle validation des fonctions de classification établies pour les sources "amont" et "odeur sans distinction de la source d'émission" (tableau 4.8., cas 1). Les résultats du tableau 4.12. montrent encore une fois les difficultés rencontrées: les données non odorante enregistrée par l'observateur lors de la campagne en continu ne se classent pas dans la catégorie "amont" mais bien en "odeur".

Tableau 4.12.: résultats de validation du modèle 1 du tableau 4.

	amont	odeur	% class. correcte
amont	0	25	0 %
odeur	0	57	100 %

4.3.3.3. Validation du modèle "amont/déchets frais".

La source "déchets frais" étant toujours relativement bien distincte de tous les autres types d'odeur rencontrés, nous pouvions espérer valider correctement le modèle. Les résultats du tableau 4.13. montrent effectivement que notre jeu de données "odeur non ressentie et odeur de déchets frais" enregistré à la périphérie du site se classe correctement selon les fonctions de classifications calibrées (tableau 5, cas 1) :72 % pour "amont" et plus de 89 % pour "déchets frais".

Tableau 4.13.: résultats de validation du modèle 1 du tableau 4.9.

	amont	df	% class. correcte
amont	17	8	72 %
df	5	41	89.13 %

Ce résultat semble très encourageant et laisse fort à penser que, idéalement, pour valider un modèle basé sur les 4 sources potentielles du site d'Hallembaye (+ éventuellement l'anti-odeur), il suffirait d'affiner les fonctions obtenues pour les autres modèles en réalisant un apprentissage basé sur un nombre plus important d'acquisitions aux sources.

Une explication possible des problèmes rencontrés au § 4.3.2.2. pourrait aussi être une erreur systématique où l'observateur ne détecte pas d'odeur au moment de la mesure alors qu'elle est présente dans l'air. Au vu des résultats obtenus ci-dessus, cette hypothèse semble moins vraisemblable puisque l'on voit qu'il est possible de valider un modèle basé sur une discrimination entre air non odorant ressenti (fonction de classification basée sur l'amont) et odeur de déchets frais.

La validation du dernier modèle confirme en quelque sorte l'excellente valeur prédictive de la fonction de classification calibrée sur la source d'émissions de déchets frais. Cette odeur typique et souvent forte est de plus difficilement confondue par un observateur de terrain situé en périphérie du site (station de prélèvement par ex.).

CHAPITRE V: Calibration et essais de validation d'un modèle d'évaluation de l'intensité olfactive des sources d'émission du site d'Hallembaye.

5.1. Objectifs.

Il s'agissait de la seconde étape nécessaire pour la mise au point d'un suivi continu des émissions olfactives du site d'Hallembaye. Outre l'aspect qualitatif de la discrimination entre les sources, abordé dans le chapitre IV, c'est principalement la recherche de l'évaluation la plus objective possible de l'intensité de l'odeur perçue à l'émission qui permettra de prédire l'intensité odorante à l'immission (couplée à des informations météorologiques du moment).

L'intégration de l'aspect quantitatif devrait ainsi limiter les risques d'aspersions inutiles lorsque l'odeur émise n'est pas dérangeante pour les riverains (voire en l'absence d'odeur, lorsque celle-ci est sous le seuil de détectabilité olfactive du nez humain) mais que le climat est favorable à une dispersion atmosphérique des gaz vers les zones habitées proches.

5.2. Méthodologie.

5.2.1. Principe.

A notre connaissance, aucune étude n'intégrait les signaux provenant d'une série de capteurs gazeux en une combinaison multilinéaire permettant une corrélation avec une intensité odorante ressentie ("évaluée") par un opérateur sur le terrain. En d'autres termes, nous devons transposer nos données vers des méthodes d'inférence statistique de type "régression multilinéaire" sur nos 6 capteurs tout en gardant à l'esprit que le modèle établi devrait intégrer une nouvelle variable "intensité de l'odeur perçue", représentative du niveau de nuisance olfactive perçue par l'opérateur au moment de la mesure.

Concrètement, on souhaitait réaliser un apprentissage avec notre nez électronique qui devait permettre la calibration de coefficients de régression pour une relation du type:

$$\text{intensité odorante (y)} = a \cdot C_1 + b \cdot C_2 + c \cdot C_3 + d \cdot C_4 + e \cdot C_5 + f \cdot C_6$$

avec $C_1 \dots C_6$ les valeurs enregistrées par chaque capteur et $a \dots f$ les coefficients de régression. Il est possible de calibrer une seule équation sans distinction de la nature de l'odeur perçue ou de fournir une équation par source d'émission puisque l'on réalise l'apprentissage à la source.

Parmi l'ensemble des méthodes de régression multilinéaire disponibles, nous avons opté pour une méthode de régression au sens des moindres carrés (régression sur les composantes principales des 6 capteurs) avec introduction de notre variable y relative à l'intensité ressentie par l'opérateur.

5.2.2. Prélèvement des données.

5.2.2.1. Campagne de prélèvements aux sources.

Les signaux enregistrés par notre réseau de 6 capteurs et utilisés pour calibrer la relation décrite ci-dessus sont évidemment les mêmes que ceux introduits dans le modèle de discrimination de l'analyse qualitative. Cependant, une nouvelle variable " y " doit être

introduite qui reflète l'intensité de l'odeur perçue par l'opérateur au moment précis de l'enregistrement sur le terrain.

Cette étape constitue la partie de la démarche la plus critique, en ce sens que si la construction d'un modèle quantitatif est basée sur une évaluation aussi subjective et personnelle, sa validation pour un suivi en continu ne pourra valablement être effectuée que par le même opérateur qui aura en quelque sorte construit un modèle propre à sa sensibilité olfactive, pas nécessairement reproductible pour tous. Cet argument nous a porté vers le choix d'un système d'évaluation de l'odeur le plus simple possible. Nous utilisons un système catégoriel en quatre classes:

0=intensité nulle, pas d'odeur ressentie,
1=intensité faible, odeur perçue timidement, sans forte gêne pour le nez humain, discrimination pas nécessairement possible,
2=intensité moyenne, odeur nettement perçue, source d'émission aisément identifiable,
3=intensité forte associée aux prélèvements directement à la source, forte gêne pour le nez humain, identification certaine de la nature de l'odeur.

Cette échelle de valeurs a donc été appliquée au cours des 9 journées de prélèvements effectuées à l'émission pour chacune des 3 sources odorantes. Les valeurs d'intensité notées au moment de l'enregistrement par le réseau de capteurs sont généralement d'autant plus élevées que l'on se rapproche de la source. Les données relatives à l'air "amont" seront introduites dans l'analyse et considérées d'intensité nulle.

A partir de ces données, nous avons essayé d'établir une équation pour chaque source d'émission qui devra être validée par la suite. Les algorithmes de pré-traitements envisagés dans la partie discriminante restaient valables sous l'angle de notre analyse quantitative.

5.2.2.2. Campagne de prélèvement à la périphérie du site.

Notre campagne de prélèvements en continu menée au début du mois d'août devait nous permettre d'obtenir des données afin de valider les modèles établis pour chaque source pendant la phase d'apprentissage. Il a déjà été mentionné que la destination finale la plus probable pour notre nez électronique mis au point serait située en périphérie du site au niveau de la station météorologique qui renferme également des analyseurs de concentrations de CH₄ et H₂S contenus dans l'air.

Nous voulions également voir dans quelle mesure l'introduction des valeurs de CH₄ et H₂S au même titre que notre variable "y = intensité ressentie par l'opérateur" lors de la phase de validation était intéressante. En effet, si ces valeurs instantanées, notées en même temps par l'opérateur, permettaient aussi de valider un modèle quantitatif basé sur le nez de ce dernier, on aurait là un moyen à la fois complémentaire et plus objectif pour évaluer l'intensité odorante.

5.3. Résultats.

5.3.1. Calibration du modèle aux sources.

Suite à notre campagne de prélèvement aux sources sur le site d'Hallembaye, nous disposons de données relatives à 9 journées (cf. Tab. 4.1.). Pour chaque source (3 possibilités) une analyse est réalisée. De plus nous avons testé 3 types de prétraitement des variables d'entrée (nos 6 signaux de capteurs) pour la matrice X_{block} comme pour le modèle qualitatif : R brute, R normalisée sur l'ensemble des capteurs, (Ro-R/Ro) normalisée sur les 6 capteurs. Le tableau 5.1. reprend le nombre de mesures par source et par variable d'entrée.

Tableau 5.1.: nombre de mesures par source et par algorithme de prétraitement utilisé.

SOURCES / VARIABLES	R brute	R normalisée	(Ro-R/Ro) normalisée
Mâchefers	84	84	75
Biogaz	80	80	71
Déchets organiques	79	79	70

Pour mémoire, à chaque mesure correspond une intensité évaluée par le chercheur *in situ* qui constituera le vecteur d'intensité $Y_{\text{block}}(n \times 1)$. Lors de la phase d'acquisition proprement dite sur le terrain, le chercheur complète la colonne "Intensité" sur la fiche de terrain (annexe 1) en fonction d'une évaluation subjective de l'odeur perçue (3 classes possibles, la valeur 0 étant réservée à un air de référence prélevé en amont du C.E.T et utilisé pour la calibration).

Le tableau 5.2. présente les pourcentages de variance expliquée par le modèle en ne considérant la régression que sur les trois premiers axes factoriels (correspondant aux 3 premières valeurs propres ou "Latent Variable") de chaque matrice X_{block} et Y_{block} . Les données avaient été traitées par deux méthodes de régression à des fins comparatives: régression de type PCR et PLS.

Tableau 5.2.a: pourcentage de variance expliquée pour la var. dépendante (Y_{block}) et les var. indépendantes ($X_{\text{block}} = R$ brute). Les résultats sont donnés pour les régressions de type PCR et PLS et pour chacune des trois sources odorantes.

	PCR		PLS	
	X_{block}	Y_{block}	X_{block}	Y_{block}
Mâchefers	94.69%	55.49%	94.18%	60.24%
biogaz	95.87%	79.02%	95.86%	79.36%
Déchets frais	95.41%	75.77%	94.15%	81.79%

Tableau 5.2.b: idem 5a mais pour ($X_{\text{block}} = R$ normalisée).

	PCR		PLS	
	X_{block}	Y_{block}	X_{block}	Y_{block}
Mâchefers	99.90%	66.93%	99.89%	69.03%
biogaz	99.76%	78.05%	99.74%	82.11%
Déchets frais	99.92%	69.40%	99.92%	70.63%

Tableau 5.2.c: idem 5a mais pour ($X_{\text{block}} = (\text{Ro-R/R})$ normalisée).

	PCR		PLS	
	X_{block}	Y_{block}	X_{block}	Y_{block}
Mâchefers	92.82%	53.75%	92.06%	56.98%
biogaz	90.04%	52.38%	83.42%	58.57%
Déchets frais	94.59%	76.40%	93.47%	80.71%

C'est principalement la variance expliquée par le Y_{block} qui nous permet d'évaluer si une bonne corrélation entre le signal des capteurs (le X_{block}) et l'intensité odorante estimée par le chercheur sur le terrain a pu être établie. Les résultats obtenus par une analyse de type PCR ou PLS pour les trois types de source et trois types de traitements différents sont globalement très proches même si la régression PLS s'avère effectivement plus efficace (cf. § 3.3.1. et 3.3.2.)

Lorsque le modèle est calibré, les valeurs d'intensité estimées par l'opérateur (notre Y_{block} de départ) peuvent être recalculées afin d'estimer la valeur prédictive des équations de régression obtenues au tableau 5.3. (graphes 5.4.a pour R brute et 5.4b,c en annexe 2 pour les 2 autres variables d'entrée).

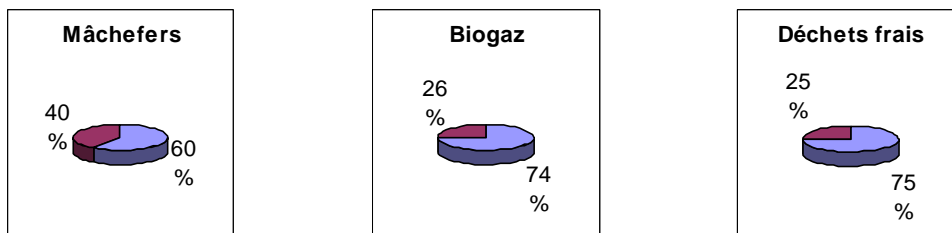
Tableau 5.3.: coefficients de régression pour chaque capteur déterminés pour les équations de régression à partir des 9 modèles PLS du tableau 5.2.

	Capteur	R brute	R normalisée	Ro normalisée
Mâchefers	<i>TGS 2610</i>	-0.8204	-19.1204	12.6994
	<i>TGS 824</i>	0.0517	0.3737	0.2660
	<i>TGS 800</i>	0.3528	6.7245	-3.2522
	<i>TGS 2180</i>	-0.4826	1.4967	0.9119
	<i>TGS 2181</i>	0.2190	-2.3479	1.9810
	<i>TGS 822</i>	-0.2208	52.7422	0.7779
Biogaz	<i>TGS 2610</i>	-0.6179	-10.7230	2.6441
	<i>TGS 824</i>	0.0917	-1.3111	1.6639
	<i>TGS 800</i>	0.4699	12.7063	-3.2716
	<i>TGS 2180</i>	-0.4324	-0.1675	1.4854
	<i>TGS 2181</i>	0.1585	-1.5380	-0.8339
	<i>TGS 822</i>	-0.4590	22.2861	1.0816
Déchets frais	<i>TGS 2610</i>	-0.5261	-10.1681	-0.5616
	<i>TGS 824</i>	0.1220	-7.5467	1.9721
	<i>TGS 800</i>	-0.3399	-44.4733	3.9126
	<i>TGS 2180</i>	0.0330	3.2590	-1.9669
	<i>TGS 2181</i>	0.5256	39.9308	-1.6017
	<i>TGS 822</i>	-0.7178	153.2802	2.0476

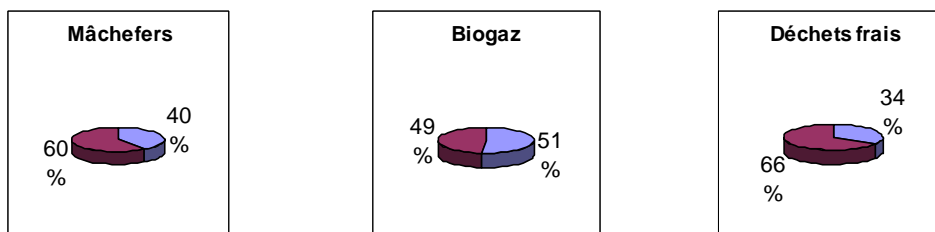
De manière à rendre l'interprétation de ces résultats plus conviviale, nous avons représenté les histogrammes d'intensité avec notre modèle en secteurs (graphe 5.5.). Nous avons pour cela considéré qu'une prédiction était acceptable si la relation:

$Y \text{ prédite} = Y \text{ mesurée} \pm 0.6 \text{ était vérifiée.}$

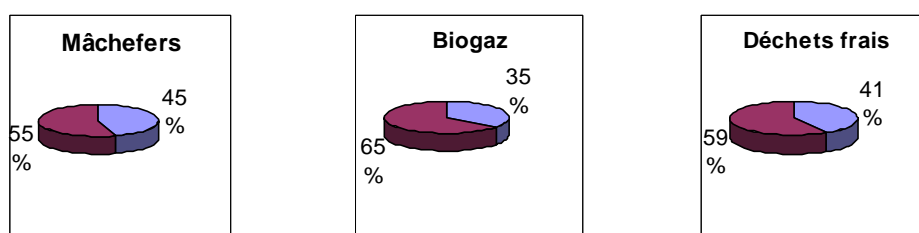
Globalement, les meilleurs résultats sont obtenus pour la variable d'entrée R normalisée, tandis que l'introduction de notre air de référence Ro dans les données [(Ro-R/Ro)normalisée] offre des résultats moins bons (les recommandations bibliographiques donnaient généralement cette dernière expression comme la plus fiable [Gardner, 1991]). Le signal brut R semble le plus efficace pour quantifier les émissions de déchets frais. Notons qu'une précédente étude [Romain A.C. *et al*, 1999] avait déjà publié des résultats comparables en matière de discrimination qualitative.



Grappe 5.5.a: représentation schématique des prédictions effectuées par notre modèle de régression calibré pour la variable d'entrée R brute. Une prédiction est correcte (en bleu) si elle satisfait à la relation $y_{pred.} = y_{mes.} \pm 0.6$.



Grappe 5.5.b: représentation schématique des prédictions effectuées par notre modèle de régression calibré pour la variable d'entrée R normalisée. Une prédiction est correcte (en bleu) si elle satisfait à la relation $y_{pred.} = y_{mes.} \pm 0.6$.



Grappe 5.5.c: représentation schématique des prédictions effectuées par notre modèle de régression calibré pour la variable d'entrée Ro normalisée. Une prédiction est correcte (en bleu) si elle satisfait à la relation $y_{pred.} = y_{mes.} \pm 0.6$.

Dans cette série de données à l'émission, cependant, les observations correspondant aux mâchefers semblent tout à fait particulières et perturbent la prédiction par le modèle. En excluant ces observations (il reste 141 données pour les deux sources : déchets frais et

biogaz), le modèle calibré par la technique PLS devient capable de prévoir l'intensité de l'odeur, quelle que soit son origine, avec plus de 70% de réussite par rapport à l'intensité ressentie par l'opérateur.

5.3.2. Campagne de prélèvements en périphérie du site.

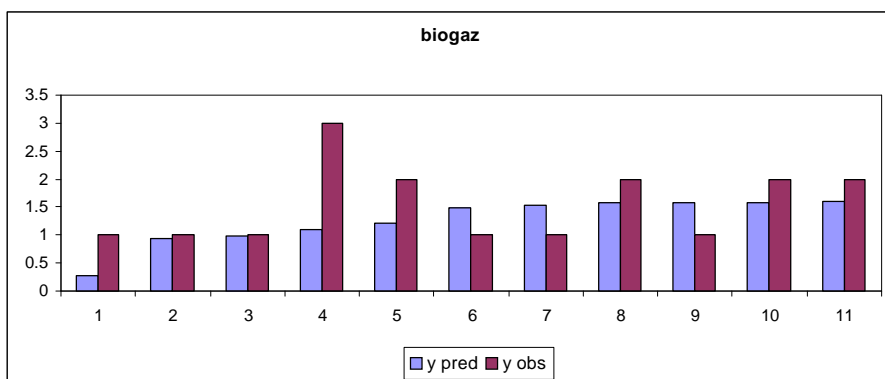
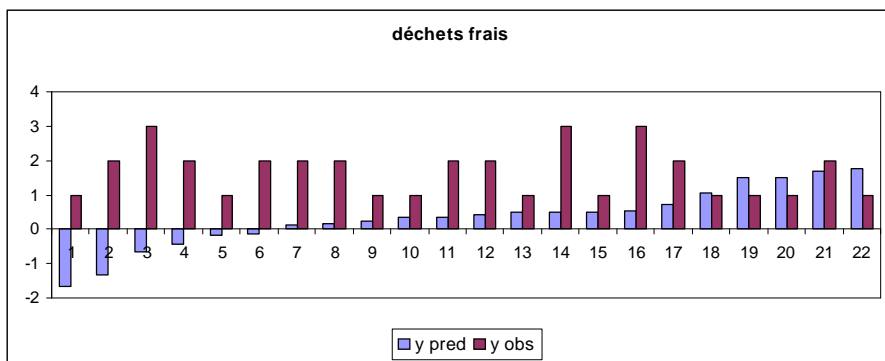
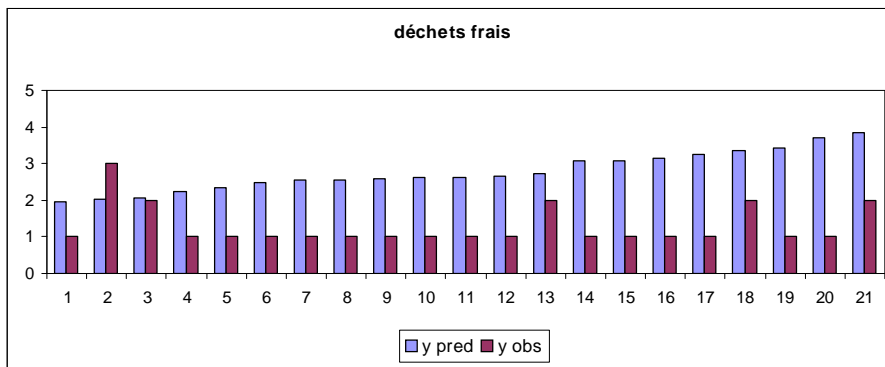
5.3.2.1. Validation des modèles aux sources "biogaz et déchets frais".

Au cours des trois jours d'acquisition réalisés au mois d'août, nous avons pu rechercher à valider les modèles calibrés à partir d'un jeu de données "extérieur" à la phase d'apprentissage menée sur les 9 journées. Ce nouveau jeu de données (+/- 10 données biogaz et 50 de déchets frais) est donc repris ici dans le but de valider les équations de régression obtenues au tableau 5.3.

Lors de la campagne de 3 jours, nous avons pris soin de noter - lorsque la nature de l'odeur était identifiée- une estimation de l'intensité de l'odeur (selon la même échelle catégorielle utilisée pour l'apprentissage). Seules des odeurs de biogaz et déchets frais ont été reconnues. L'opérateur de terrain n'a pas changé entre la phase d'apprentissage (les 9 sorties pendant l'année) et cette phase de validation (les 3 jours en août).

Les équations de régression respectives calibrées aux sources biogaz et déchets frais sont donc appliquées à ce nouveau jeu de données dans le but d'estimer leur valeur prédictive par rapport à l'intensité estimée sur le terrain par l'opérateur situé en périphérie du site. Les résultats sont repris sous forme d'histogrammes (cf. graphe 5.6.a et 5.6.b en annexe 3) qui montrent pour chaque observation ou une odeur avait été perçue par l'opérateur (y obs.) la valeur prédite par le modèle (y pred.). Les équations de régression sont appliquées pour les variables d'entrée R brute et R normalisée sur l'ensemble des capteurs pour la régression PLS qui avait montré les meilleurs résultats.

Dans le cas des émissions "biogaz", le modèle semble bien adapté avec des valeurs prédictives proches des valeurs observées par l'opérateur (et ce pour les deux variables d'entrée). Pour la source "déchets frais", on observe une tendance à la sur-estimation de l'intensité par rapport aux valeurs observées. Ces écarts pourraient notamment s'expliquer par des différences de perception liées à l'opérateur lui-même.



Graphes 5.6.a: histogrammes des valeurs prédictives vs. valeurs observées pour une validation des modèles biogaz (11 données) et déchets frais (43 données) à partir du jeu de données de la campagne d'août (variable d'entrée R normalisée).

5.3.2.2. Calibration d'un modèle d'intensité sans référence au type d'odeur.

Les données issues de notre campagne en juillet ont donc été utilisées pour tester la valeur prédictive des modèles calibrés au cours d'un apprentissage aux sources. Les résultats sont encourageants mais attestent de la difficulté de valider un modèle (construit à la source) à partir de données prélevées dans des conditions non similaires (en périphérie du site et non aux sources d'émission). Le facteur d'éloignement par rapport à l'émission entraîne vraisemblablement des sources d'erreur non contrôlables:

- difficulté de détermination quant à la nature de l'odeur ressentie,

- problèmes de "recouvrement" entre plusieurs types d'odeurs de l'émission à la zone de perception par l'opérateur située en périphérie du site,
- problèmes liés à notre système catégoriel où un niveau de perception noté "3" lors de l'apprentissage aux sources (construction du modèle) correspond certainement à une odeur plus intense qu'un niveau noté aussi "3" lors de la campagne de 3 jours menée en périphérie du site (validation des modèles).

Pour ces raisons, il nous semblait intéressant d'examiner si les données acquises au cours de notre campagne d'août pourraient être traitées, non pas pour valider les modèles d'apprentissage aux sources, mais simplement pour recalibrer un nouveau modèle quantitatif indépendamment du type de source.

Cette idée était inspirée par le fait que nous possédions les relevés de valeurs instantanées de concentrations en CH₄(ppm) et H₂S(ppb) correspondant, dans le temps et dans l'espace, aux enregistrements du nez électronique et estimations de l'intensité odorante y_1 effectuées par l'opérateur de terrain. Ceci nous permettra ainsi d'introduire dans le modèle une seconde variable y_2 (les concentrations en CH₄ mesurées), moins "subjective" que notre variable habituelle d'intensité odorante estimée selon notre système catégoriel. Les concentrations du H₂S ne seront finalement pas incluses dans le modèle étant donné le nombre élevé de valeurs nulles observées.

Dans une première étape, nous avons examiné la corrélation entre y_1 et y_2 . Le coefficient de corrélation R² obtenu est faible (0.3548), attestant du caractère relativement indépendant des deux variables. Ceci nous confirme donc à priori dans l'idée que l'information apportée par les deux variables est complémentaire.

Les tableaux 5.7.a et 5.7.b présentent (pour 2 variables d'entrée différentes) les pourcentages de variance expliquée (jusqu'au 6^{ème} axe factoriel) dans le cas où l'on considère, à la fois, les valeurs de concentration de CH₄ et les valeurs d'intensité odorante dans la régression. Ces résultats peuvent être comparés avec un modèle où l'on ne tient compte que de l'intensité odorante ressentie par l'opérateur de terrain (tableaux 5.7.c et d).

Globalement, les pourcentages de variances expliquées par le modèle de régression sont du même ordre que ceux obtenus pour les modèles calibrés par un apprentissage aux sources.

Tableau 5.7.a: pourcentage cumulé de variance expliquée par le modèle de régression PLS (jusqu'au 6^{ème} axe factoriel) pour la variable d'entrée Rbrute. X_{-block} correspond au membre de droite de l'équation (les R brutes des capteurs) et Y_{-block} à celui de gauche (intensité ressentie et valeurs de CH₄).

	X_{-block}	Y_{-block}
N ^b Var. Lat.	Variance expliquée (%).	Variance expliquée (%).
1	97.33	67.05
2	99.95	67.83
3	99.98	70.97
4	99.99	72.30
5	100	72.52
6	100	75.84

Tableau 5.7.b: idem 5.8.a mais pour la variable d'entrée R normalisée.

	X_{-block}	Y_{-block}
N^bVar. Lat.	Variance expliquée (%).	Variance expliquée (%).
1	97.78	68.89
2	99.94	68.87
3	99.99	73.35
4	100	76.76
5	100	77.08
6	100	79.24

Tableau 5.7.c: pourcentage cumulé de variance expliquée par le modèle de régression PLS (jusqu'au 6^{ème} axe factoriel) pour la variable d'entrée R brute. X_{-block} correspond au membre de droite de l'équation (les R brutes des capteurs) et Y_{-block} à celui de gauche (intensité ressentie).

	X_{-block}	Y_{-block}
N^bVar. Lat.	Variance expliquée (%).	Variance expliquée (%).
1	97.33	52.02
2	99.93	52.82
3	99.99	64.34
4	100	66.45
5	100	66.54
6	100	67.36

Tableau 5.7.d: idem 5.8.c mais pour la variable d'entrée R normalisée.

	X_{-block}	Y_{-block}
N^bVar. Lat.	Variance expliquée (%).	Variance expliquée (%).
1	97.78	58.37
2	98.29	65.19
3	99.99	67.02
4	100	68.90
5	100	68.99
6	100	69.42

Les meilleurs résultats sont obtenus pour la variable d'entrée R normalisée avec 73.35 % de variance expliquée en ne considérant que les trois premières valeurs propres dans le cas de deux variables explicatives, l'intensité de l'odeur et du CH₄. L'introduction des valeurs instantanées de CH₄ au niveau du Y_{-block} permet donc vraisemblablement d'améliorer "la corrélation" avec les valeurs enregistrées par les capteurs (le X_{-block}) de 6 %. En effet, on passe de 64.34% à 70.97% de variance expliquée du Y_{-block} entre un modèle calibré sur la seule variable d'intensité odorante (5.7.c) et le modèle basé sur les deux variables y_1 et y_2 (5.7.a). De même, dans le cas de R normalisée, on passe de 67.02 à 73.35%. L'annexe 4 reprend les histogrammes de valeurs observées et prédites de l'intensité odorante y_1 et de CH₄ y_2 .

CHAPITRE VI: Analyse des relevés "odeur" effectués à l'immission en fonction des paramètres météorologiques.

6.1. Introduction.

La démarche adoptée ici consiste en une analyse des relevés d'odeur à l'immission effectués depuis plusieurs années sous l'égide d'un surveillant communal de la commune d'Oupeye. La banque de données mise à notre disposition était en fait constituée de fiches signalétiques complétées quotidiennement par les riverains du C.E.T. (17 localisations au total) lorsqu'une odeur est perçue (l'heure et le type d'odeur sont notés).

Les fiches sont rassemblées chaque semaine par le surveillant communal qui condense l'information "odeur" obtenue sur une carte (localisation de l'habitation, tranche horaire où l'odeur a été perçue, cf. annexe Va) en y ajoutant ses propres informations (odeur personnellement enregistrée lors de son "tour odeur" quotidien, direction du vent, pluie éventuelle...).

On se retrouve donc en présence d'une banque de données qui constitue un suivi très précis des odeurs perçues au niveau des villages environnants pour une période de deux ans (depuis 1998 jusqu'à nos jours).

L'hypothèse de base de notre travail suppose la transmission des éventuelles émissions olfactives vers les villages riverains sous l'influence de divers paramètres météorologiques tels la direction du vent, sa vitesse, la température de l'air... Nous avons donc parallèlement à la banque de données "odeurs" choisi toute une série de variables climatiques susceptibles d'être responsables de la transmission des odeurs entre la source (émission sur le site proprement-dit) et les zones riveraines (immission). On cherchera à discerner les variables prépondérantes qui peuvent être corrélés avec l'odeur perçue.

Il faut en outre considérer que la présence d'une odeur à l'immission est forcément corrélée à une odeur à la source transmise sous l'influence des conditions météorologiques favorables au phénomène. Par contre, si l'on ne détecte pas d'odeur à l'immission, l'alternative est que soit il n'y avait pas d'odeur à la source, soit qu'il y avait une odeur mais que les conditions climatiques étaient défavorables à sa transmission vers les zones riveraines. Or, l'hypothèse qui sous-tend l'analyse statistique qui est faite entre les données "odeurs à l'immission" et les variables météorologiques est qu'il existe une relation causale directe entre ces dernières et la perception d'une odeur chez les riverains. Imaginons alors par exemple une absence d'odeur à la source (émission) mais où les conditions climatiques étaient cependant favorables à une éventuelle transmission vers les zones riveraines: on infère l'hypothèse ci-dessus, risquant ainsi de biaiser fortement les résultats. Nous devons garder cette remarque préliminaire à l'esprit lors de l'interprétation des résultats finaux.

6.2. Présentation de la banque de données.

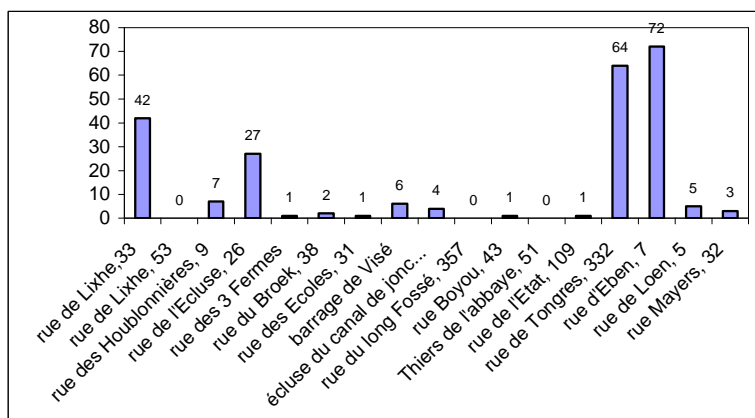
Les données ont tout d'abord été encodées sous forme de tableaux de contingence qui reprennent pour chaque localisation (17 colonnes au total) l'ensemble des observations "odeurs" en terme d'occurrence (présence-absence). Les lignes i de chaque tableau désignent

le jour considéré (du 05/01/98 au 30/06/00), noté "1" si une odeur a été relevée pour ce jour. La case est laissée vide dans le cas contraire (équivalent à "0"): on obtient donc pour chacune des 17 localisations, un vecteur-colonne qui reprend globalement pour chaque journée l'occurrence "odeur" en termes de présence (1) – absence (0).

L'analyse statistique sera effectuée à partir d'un vecteur-colonne global qui reprend aussi pour chaque journée, mais sans distinction spatiale (donc pour les 17 localisations réunies), l'absence d'odeur à l'émission ("0") ou sa présence ("1"). L'annexe Vb présente un exemple du tableau final de la base de données ainsi que les variables météorologiques encodées.

L'histogramme présenté ci-dessous (graphe 6.1.) montre, pour chacune des 17 localisations, les fréquences absolues d'observations "odeurs" sur les 908 jours envisagés. Ces valeurs sont élevées pour les observations relatives à des localisations en bordure de C.E.T. soumises aux vents d'ouest les plus fréquents (respectivement 42; 27; 64; 72). Au total, quelle que soit l'endroit considéré, on observe 184 "jours odeur" sur les 908 jours de l'enquête (20.26% de "jours odeurs"). Attention cependant, le "jour odeur" est une unité de regroupement commune à toutes les observations, que nous employons généralement pour ce type d'analyse : elle est comptabilisée dès qu'un événement "odeur" a été détecté au cours de la journée, même si cet événement fut très bref. Un total de 184 "jours odeur" sur 908, soit 20.26%, ne signifie donc pas que l'odeur a été perçue pendant un peu plus de 20% du temps, ce qui serait énorme, mais bien que 20% des journées considérées ont vécu au moins un événement odeur.

En outre, remarquons que les fréquences les plus élevées sont observées pour les rues d'Eben, de Tongres et de Lixhe, que le gestionnaire du site a identifiées comme des points névralgiques, mais à des endroits où il n'y a pas de riverains.



Grphe 6.1.: nombre de jours "odeur" observés pour 17 localisations de riverains sur un échantillon total de 908 journées.

6.3. Paramètres climatiques retenus.

6.3.1. Données brutes de l'IRM.

Les données météorologiques disponibles à l'Institut Royal Météorologique étaient celles relatives à la station de Bierset (05°27'00"E 50°39'00"N à 178m d'altitude) située à quelques kilomètres du site d'Hallembaye.

Au moment de l'encodage, nous disposions seulement des données entre le 05/01/98 et le 31/05/00. Les variables considérées sont:

- nébulosité à midi (en octas -échelle de 1 à 8-),
- Température moyenne de l'air (en °C),
- Température maximale de l'air (en °C),
- Humidité relative moyenne (en %),
- Vitesse moyenne du vent (en km/h),
- Vitesse maximale du vent (en km/h),
- Direction du vent à midi: les données de Bierset sont vérifiées en fonction des notes personnelles du surveillant communal lorsque celui-ci notait la direction du vent (surtout lorsqu'une odeur était perçue à l'immission),
- Radiation solaire globale (J/cm²): cette donnée n'est pas enregistrée à Bierset mais à Uccle (station la plus proche).

6.3.2. Classes de stabilité de Pasquill.

Pour le calcul des classes de stabilité de Pasquill, nous avons été obligés de faire appel aux données de rayonnement solaire global (J/cm²) reprises pour la station d'Uccle et seulement disponibles du 05/01/98 au 30/04/00.

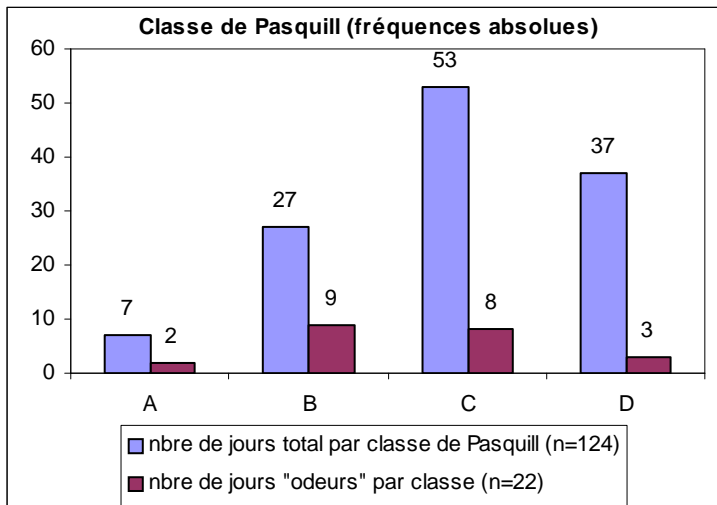
Le calcul des classes permet d'évaluer la stabilité de l'air (relatif au mouvement vertical), elle-même fonction des mécanismes de convection et de turbulence atmosphériques. Le système défini comprend 6 classes, de "A" (instable) vers "F" (stable) où "D" est considéré comme neutre, qui sont reprises au sein d'une abaque. Les paramètres pris en considération dans le calcul sont la vitesse du vent, la radiation solaire globale et la nébulosité.

La radiation solaire globale n'étant pas enregistrée à Bierset, nous devons prendre en compte les données de Uccle sous certaines conditions restrictives: la différence de durée d'ensoleillement journalier entre les deux stations devait être inférieure à 10 min. ($\Delta S \leq 10\text{min.}$) et la différence de température moyenne inférieure à 2.5°C ($\Delta T \leq 2.5^\circ\text{C}$). Ces deux conditions restrictives (mais nécessaire à une certaine cohérence des données) ont fortement limité le nombre de jours où une classe de stabilité a pu être estimée (15.23%, à savoir 129j/847 au total).

Il ne sera donc pas très intéressant d'analyser les résultats obtenus au tableau 6.2. en terme de classe la mieux représentée - ici C - puisque nous ne savons pas en définitive si notre échantillon considéré (les 129 jours) était bien représentatif de la population totale (les 847 jours). Par contre, nous pourrions, au sein d'une classe donnée, raisonner sur le ratio entre jours "odeur" et "non odeur".

Tableau 6.2.a: nombre de jours "odeur" et "non odeur" par classe de stabilité ayant pu être calculés.

	A	B	C	D	somme
n ^{bre} de jours "pas odeurs" par classe	5 (71%)	18 (67%)	45 (85%)	34 (92%)	102 (82%)
n ^{bre} de jours "odeurs" par classe	2 (29%)	9 (33%)	8 (15%)	3 (8%)	22 (18%)
somme (% du n^b de j total)	7 (6%)	27 (22%)	53 (43%)	37 (29%)	124 (100%)



Graph 6.2.b: pour chaque classe de Pasquill rencontrée, nombre de jours total et nombre de jours "odeurs".

Nous avons pu conclure sur base de nos résultats que ce sont les types de temps les plus instables – A et B - qui semblent conditionner la présence d'une odeur à l'immission avec environ 30% des observations "odeurs" au sein de chaque classe (respectivement 29 et 33%) tandis que les type de temps plus stable – C et D- présentent une proportion de "jours odeur" beaucoup plus faible (respectivement 15 et 8% pour D qui est considéré comme "neutre" par Pasquill).

Il faut cependant noter que ces conclusions vont à l'encontre du raisonnement logique qui aurait voulu que les types de temps les plus stables soient à la base de la transmission des odeurs vers les zones riveraines. Les calculs ayant été réalisés sur un nombre assez faible d'observation (1/6 de l'échantillon total), la validité de ces résultats reste à confirmer.

Les classes de stabilité sont souvent utilisées comme variable d'entrée dans les modèles de dispersion atmosphérique avec la direction du vent.

6.4. Analyse statistique.

Nous aborderons le traitement des données "odeur" en fonction des facteurs climatiques sous deux aspects différents:

- analyse de la variance multivariée (MANOVA)
- analyse factorielle des correspondances multiples (AFC).

6.4.1. Analyse de la variance.

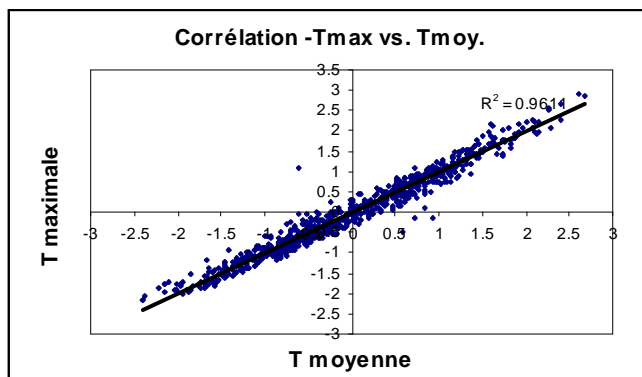
L'analyse de la variance a tout d'abord été réalisée globalement sur l'ensemble des variables climatiques (matrice des variances-covariances), permettant ainsi une synthèse de

tous les effets. Le λ de Wilks obtenu (équivalence du test du F dans le cas de plusieurs variables dépendantes) est de 0.97345 au niveau $p=0.000048$, nous permettant de rejeter H_0 de façon très hautement significative (niveau 0.1%). En d'autres termes, l'effet des variables météorologiques influence la présence d'odeur à l'immission.

Nous pouvons alors nous poser la question de savoir quelles sont les variables spécifiques qui contribuent à la significativité du test global, en analysant pas à pas l'effet respectif de chacune des variables envisagées (cf. Tableau 6.3.). Les résultats montrent très clairement que seules trois variables, respectivement $T_{moyenne}$, $T_{maximale}$ et Vit. moyenne du vent, sont responsables du résultat exprimé au § précédent. Ce résultat peut se ramener à deux variables dans la mesure où $T_{moyenne}$ et $T_{maximale}$ sont étroitement corrélées (cf. graphe 6.4.).

Tableau 6.3.: analyse de la variance permettant de déterminer les variables qui influencent l'apparition d'odeurs à l'émission (si $p < 0.05$).

	MC effet	MC erreur	F	P (0.05)
Tmoyenne	11369.58	612.2	18.57054	0.000018
Tmaximale	582.67	67	8.70197	0.003272
H.R.moyenne	164.61	111.1	1.48158	0.223888
Vitesse moy. vent	6418.66	718.7	8.93114	0.002890
Vitesse max. vent	75.72	224.5	0.33733	0.561540
Radiation solaire	79326.21	121082	0.65515	0.418521



Graphe 6.4.: droite de corrélation entre T moyenne et T maximale.

Remarquons que la variable "direction du vent" n'avait pas pu être incluse dans l'analyse puisqu'il n'y avait aucun sens à introduire des données catégorielles dans une ANOVA. Nous aurions pu l'introduire dans l'analyse moyennant la transformation des directions en un angle par rapport au riverain (en valeur absolue par rapport à un angle zéro de référence arbitraire).

6.4.2. Analyse factorielle des correspondances multiples.

6.4.2.1. Répartition des variables météo en classes.

L'analyse de la variance nous a appris que 3 variables météorologiques étaient discriminantes pour la présence-absence d'odeur chez les riverains sans pour autant nous

permettre d'avoir une idée plus précise des valeurs – ou plage de valeurs- qui déterminent plus spécifiquement l'apparition des odeurs.

En fait, il est intéressant de pouvoir affirmer que la température moyenne conditionne les retombées à l'immission mais il serait encore plus judicieux de pouvoir affiner le raisonnement en précisant, par exemple, quelles sont les "tranches" de températures qui sont responsables des odeurs à l'immission.

Nous allons donc chercher à voir si une correspondance existe entre nos observations "jours odeur" et les variables météorologiques réparties en classes. Chacune de ces classes sera introduite dans l'analyse et considérée comme une variable à part entière. La direction du vent et les classes de stabilité de Pasquill qui ne pouvaient entrer dans l'ANOVA et l'ACP s'adaptent ici parfaitement à ce type de méthode.

Chaque variable météo. doit donc être scindée en classes: cela va de soi pour la direction du vent et les classes de stabilité de Pasquill, par contre, pour les variables continues telles la nébulosité, l'H.R. moyenne, la température ou la vitesse du vent nous devons créer ces classes ou modalités nous-même, le plus judicieusement possible (cf. Tableau 6.6.).

Ces choix ont été réalisés sur base des moyennes annuelles observées pour la station de Bierset ainsi que de quelques conseils de l'IRM (température et vitesse du vent). Pour la nébulosité, nous avons repris les deux classes suggérées par Pasquill tandis que pour l'H.R. nous avons scindé de part et d'autres de la moyenne annuelle observée. Ces classes ont été numérotées pour plus de facilité d'interprétation du graphe 6.8.

Tableau 6.6.: répartition des variables météorologiques en classes pour l'A.F.C.

<i>Variab les</i>	<i>CLASSES</i>		
Nébulosité	faible (≤ 4 octas) (1)	forte (> 4 octas) (2)	
H.R. moyenne	faible ($\leq 80\%$) (3)	forte ($> 80\%$) (4)	
Vmaximale vent	faible ($\leq 16.6\text{km/h}$) (5)	moyenne (>16.6 et ≤ 33.4 °C) (6)	forte ($>33.4\text{km/h}$) (7)
Tmoyenne	faible ($\leq 10^\circ\text{C}$) (8)	moyenne (>10 et ≤ 20 °C) (9)	forte ($>20^\circ\text{C}$) (10)
Tmaximale	faible ($\leq 13.6^\circ\text{C}$) (11)	moyenne (>13.6 et ≤ 23.6 °C) (12)	forte ($>23.6^\circ\text{C}$) (13)
Vmoyenne vent	faible ($\leq 10\text{km/h}$) (14)	moyenne (>10 et $\leq 20\text{km/h}$) (15)	forte ($>20\text{km/h}$) (16)
Stabilité Pasquill	A (instable), B , C ou D (neutre)		
Direction du vent	N , E , S , W , NE , NW , SE , SW , VR (variable)		

6.4.2.2. Résultats.

Le tableau 6.7. reprend les pourcentages de variance expliquée par les 5 premiers axes factoriels. Seuls les deux premiers nous intéressent dans la mesure où les résultats sont représentés en deux dimensions.

Tableau 6.7.: variance expliquée par les 5 premiers axes factoriels (et % cumulé).

valeurs propres λ	% de variance expliquée	% cumulé
$\lambda_1= 0.4189$	15.7001	15.7001
$\lambda_2= 0.3666$	12.1433	27.8436
$\lambda_3= 0.3187$	9.0927	36.9363
$\lambda_4= 0.2751$	8.3494	45.2857
$\lambda_5= 0.2026$	5.9793	51.2651

Le graphe 6.8. présente les résultats de l'analyse des correspondances multiples suivant les deux premiers axes factoriels (λ_1, λ_2) qui expliquent 27.84% de la variabilité totale. Suite à la remarque du § 3.4.2., on se gardera d'interpréter ce chiffre en tant que tel (27.84% constituerait une mauvaise approximation de la variance totale expliquée dans une AFC classique) puisque les 100% de la variance totale doivent être répartis entre 28 valeurs propres dont pratiquement 28% pour les deux premières. Ce résultat est donc à ce titre nettement satisfaisant.

Les observations "jours odeur" sont représentées par un point comme pour les "jours non odeur" ainsi que les différentes classes des variables météorologiques. Etant donné que deux points sont proches dans le sous-espace factoriel à deux dimensions si ils sont corrélés, nous cherchons à voir quelles sont les classes de variables météo qui sont les plus proches du point "jours odeurs" (idem pour le point "jours non odeurs"). Nous pourrions ainsi distinguer quelles sont les classes de variables météo qui s'apparentent le plus au phénomène étudié en étant manifestement responsables des odeurs à l'immission.

Nous avons tracé une "sphère d'influence" autour du point "jours odeurs" et fait de même pour "jours non odeur".

Pour l'occurrence "non odeur", on retrouve (selon axe 1):

Nébulosité forte (2), Tmoy. faible (8), Tmax. faible (11), Classe de Pasquill C (à D), HR moy. forte (4), Vitesse du vent moy. forte (16), et diverses directions du vent (W, S, SW). Il faut cependant remarquer que l'occurrence "non odeur" a une contribution "presque inexistante" à l'inertie des axes (0.006% contre 0.03% en moyenne pour les autres modalités): on se gardera donc de conclure sur cette base (modalité "non odeur" trop proche du centre). Il n'est donc pas possible d'associer formellement une des modalités ci-dessus avec l'absence d'odeur à l'immission: on parlera plutôt de "conditions préférentielles".

Pour l'occurrence "odeur", on retrouve :

Tmoy. moyenne (9), Tmax. moyenne (12), Classe de Pasquill A (à B), HR moy. faible, Vitesse du vent moy. faible à moyenne (14 et 15), Vitesse du vent max. moyenne (6) et direction du vent N. Cette interprétation se trouve confirmée puisque les points sont à la fois suffisamment éloignés de l'origine avec une bonne contribution relative à l'inertie des axes.

Plus en aval de l'axe 1, on retrouve nébulosité faible, Tmoy. et max. fortes ainsi que trois directions du vent intervenant très peu dans la transmission des odeurs puisque totalement opposée aux villages riverains: E, NE (et vent variable).

Nous donnerons comme interprétation physique à cet axe factoriel 1 une nette tendance à aller des conditions climatiques les plus pluvieuses vers les conditions de plus en plus ensoleillées. L'occurrence "odeur" se positionne de façon intermédiaire par rapport à cet axe de "beau temps".

6.4.2.3. Conclusions.

En conclusion de l'A.F.C. multiple présentée nous pouvons émettre un "diagnostic (ou conseil)" quant aux conditions climatiques qui semblent être le plus souvent responsables de l'apparition d'odeurs chez les riverains.

Il s'agirait d'un type de temps où les températures moyennes et maximales sont intermédiaires (+/- entre 10 et 20-23°C), avec un vent moyen de 10 à 20 km/h pour une classe de stabilité de Pasquill de type A à B (même résultats que § 6.3.2.). Les conditions de nébulosité et d'H.R. de l'air tendent également vers un ciel de type plus dégagé (<4octas) ainsi qu'un air plus sec que la moyenne (<80%).

6.4.3. Interprétation des résultats.

La démarche adoptée dans ce chapitre pour analyser les relevés "odeur" effectués par le surveillant communal depuis 1998 était double.

Tout d'abord, sur base d'une inférence statistique des relevés en fonction de différents paramètres météorologiques (ANOVA), nous avons clairement mis en évidence le rôle des températures et de la vitesse moyenne du vent dans l'apparition des odeurs à l'immission. Selon nous, ces variables sont à considérer comme "génératrices" des odeurs au niveau du site d'Hallembaye. En outre, la notion de classe de stabilité de Pasquill abordée a permis de mettre en évidence un effet probable des classes les plus instables (A et B) dans la dispersion (ou transmission) des odeurs vers les zones riveraines (à confirmer). Cela pourrait s'expliquer par le fait que ces classes correspondent à des vents faibles où la convection au niveau de la surface du C.E.T. est moins forte.

Le second aspect considéré dans notre réflexion était de préciser parmi les variables retenues ci-dessus, quelles étaient les conditions climatiques les plus favorables à la présence d'une odeur à l'immission. Nous avons pour cela jugé nécessaire d'étendre l'analyse programmée (ACP) à toutes les variables météorologiques, y compris celles que l'ANOVA n'avait pas reconnues responsables de la génération des odeurs. Ce choix se justifiait notamment suite à la remarque formulée au § 6.1.

Les résultats obtenus ont permis de poser un "diagnostic" quant au type de temps le plus favorable à l'apparition des odeurs chez les riverains (t°max. et moy. intermédiaires, vent moyen, ciel assez dégagé et humidité de l'air faible, classe de stabilité A ou B).

Une dernière remarque doit être faite au sujet de la mesure de l'ensoleillement qui semble, selon les études précédentes réalisées au sein de notre département [ROMAIN A-C, 2000], être une variable de tout premier ordre, conditionnant à la fois la génération et la dispersion des odeurs. Ce paramètre climatique, non mesuré sur le site, ni à proximité, n'a pu être exploitée, mais un conseil pertinent pourrait être de placer un pyranomètre sur le site.

CHAPITRE VII: Synthèse, conclusions générales et perspectives de la convention.

L'objectif ultime de notre projet est l'amélioration du contrôle des émissions olfactives du C.E.T. d'Hallembaye, actuellement réalisé par l'asservissement d'un système d'aspersion de produit "anti-odeur" uniquement à partir des données climatiques du moment ou de la détection de la présence d'odeur par le personnel du C.E.T. ou par le surveillant communal. Le couplage à une information quantitative et qualitative sur les odeurs émises, détectées par un appareillage adéquat et propre à un monitoring continu constituait donc, sans nulle doute, un sujet de recherche très prometteur. Ce développement vise *in fine* à affiner les conditions de fonctionnement du système d'aspersion, répondant ainsi à des préoccupations à la fois écologiques et financières (limitation des quantités de produits utilisés).

Rappelons qu'aucun système commercial adéquat n'existait au début du projet et que la recherche partait pratiquement de zéro dans cette matière.

Nous avons donc travaillé sur la conception et la mise au point d'un appareil tout à fait inédit, relativement simple et à coût réduit, en nous basant sur les récents développements de la technologie des nez électroniques. Le prototype devait nous permettre de qualifier voire quantifier les odeurs rencontrées sur un C.E.T. (en particulier celui d'Hallembaye) moyennant un traitement adéquat de l'information (électronique intelligente).

Le présent chapitre, consacré à l'évaluation du travail accompli durant la convention FIRST, reprendra systématiquement pour chacune des étapes prévues initialement (voir l'introduction générale) les choix réalisés et le travail réellement effectué, les conclusions positives ou négatives, ainsi que les perspectives pour une application en temps réel.

L'étude bibliographique.

- Concernant l'état de l'art en matière d'application des nez électroniques en temps réel dans l'environnement, pratiquement aucune étude n'a été trouvée dans la littérature scientifique : pour ainsi dire, les seuls acquis étaient ceux de notre unité « Surveillance de l'Environnement » de la FUL.
- A l'heure où le présent rapport est rédigé, quelques études ponctuelles ont été menées, et quelques nez électroniques portables ont été développés, mais les applications en temps réel sur le terrain restent très marginales et quoiqu'il en soit, les options prises au cours du présent projet sont cohérentes avec celles exposées dans la littérature scientifique actuelle (par exemple : le nez électronique est chaque fois adapté à l'application particulière, les capteurs à oxyde d'étain figurent souvent parmi les meilleurs choix, ...).
- Concernant les odeurs générées par les déchets (compositions, concentrations, flux, mécanismes), et sur le site d'Hallembaye en particulier, l'information est disponible et a été exploitée. Au terme de la convention, il ressort qu'à Hallembaye, trois types d'odeurs sont potentiellement présentes : celle des déchets frais, celle du biogaz et celle des mâchefers. Cependant, les deux dernières s'avèrent difficile à identifier, et en tout état de cause, peu importantes en termes de transport vers les habitations des riverains. S'occuper en priorité de détecter une odeur de déchets frais émergeant dans une ambiance inodore semble donc l'objectif à poursuivre.
- Concernant enfin l'influence des conditions météorologiques sur la génération et sur la dispersion des odeurs de déchets et l'éventuelle utilisation de modèles de dispersion dans un objectif de contrôle, l'information reste étonnement discrète, alors que cette question semble de toute première importance pour les gestionnaires de CET. Dans ce domaine donc, un grand travail reste à faire, rendu difficile par le fait que les conditions

météorologiques influencent à la fois la génération et la dispersion ou le transport des odeurs, parfois de manières contradictoires. La compréhension des phénomènes et le développement de modèles qui les décrivent adéquatement émaneront probablement du traitement statistique d'un grand nombre d'observations, telles que celles réalisées aux alentours du site d'Hallembaye.

Le développement de l'instrument de mesure

- Concernant le choix des capteurs à oxyde d'étain de marque Figaro, même encore actuellement, ils constituent un choix optimal : ils sont robustes, fiables et l'éventail des types disponibles permet de constituer un réseau "à la carte", adapté à l'application. Leur principal inconvénient est l'importante puissance électrique nécessaire à leur chauffage. Néanmoins, lorsque le réseau électrique est disponible, comme se serait le cas pour une surveillance continue en bordure du site, cet impératif est moins contraignant. Abaisser leur seuil de détection et améliorer leur reproductibilité sont deux priorités essentielles pour les chercheurs dans ce domaine.
- La démarche de sélection des 6 capteurs Figaro adaptés à l'application s'est également avérée efficace : il s'agissait d'évaluer, en laboratoire, à la fois la sensibilité de plusieurs capteurs aux odeurs de déchets et leur aptitude à séparer les différentes sources, à partir d'échantillons prélevés sur le site. *A posteriori*, les 6 capteurs choisis semblent convenir à l'identification de l'odeur de déchets frais par rapport à une ambiance moins odorante. Un autre choix aurait peut-être favorisé la détection de l'odeur de biogaz ou celle des mâchefers, voire mieux séparé les trois groupes. En tout état de cause, le choix actuel permet de répondre au besoin prioritaire.
- La chambre des capteurs, en aluminium, pourrait avantageusement être remplacée par une enceinte en acier inoxydable ou en Téflon. Cependant, le choix de matériaux thermiquement isolants favorise l'élévation de la température dans l'enceinte, qui est chauffée par les capteurs, avec le risque de transformer les propriétés physiques et chimiques du mélange odorant. La température atteinte dans l'enceinte actuelle (une cinquantaine de degrés maximum) permet déjà probablement d'éviter toute condensation sur les parois.
La taille assez réduite de la chambre (environ 150 cm³) et le débit employé (150 ml/min, permettant donc 1 renouvellement du volume de l'enceinte chaque minute) constituent de bons choix pour satisfaire à la fois la contrainte d'un temps de réponse assez court (la stabilité complète est assurée en moins de 5 minutes) et celle d'une faible convection sur les capteurs chauffés.
Le système de carte électronique-support des capteurs, posée entre l'enceinte proprement dite et son couvercle, s'est avérée particulièrement facile à réaliser, souple à l'emploi et dégageant peu d'odeur propre.
Dans une version plus définitive, vers le développement d'un appareil de monitoring continu, il serait peut-être souhaitable d'améliorer encore la conception de l'enceinte des capteurs. Cependant, il faut garder à l'esprit que les résultats fournis par un nez électronique sont issus d'une procédure d'apprentissage, qui est tout à fait spécifique au dispositif utilisé. Donc, pour ne pas perdre les informations déjà rassemblées durant la présente étude, il convient de conserver le même genre de système.
- Pour une utilisation en continu sur le terrain, la fourniture d'un air inodore reste problématique : une bouteille d'air pur est assez lourde et encombrante, alors qu'un

dispositif de filtrage de l'air ambiant est immédiatement saturé. Les essais ont été réalisés sur base de cycles (5 min/5 min) alternant de l'air inodore prélevé en sacs, loin du C.E.T., et l'ambiance odorante du site. L'électronique d'acquisition de données et de commande du système se sont avérées, à cet égard, parfaitement adaptées à une utilisation autonome.

Par contre, il n'a pas été démontré de façon certaine au cours de cette étude que l'air inodore était indispensable. Un résultat appréciable est que la référence à une ligne de base n'est pas essentielle pour une séparation satisfaisante des différentes odeurs, mais l'air inodore sert également à régénérer les capteurs. Un fonctionnement en continu sur l'ambiance du site (sans alterner des phases avec air de référence) permettrait peut-être déjà de régénérer les capteurs lors des périodes d'atmosphères moins odorantes. Une étape de validation des modèles calibrés, durant laquelle il serait possible de comparer le fonctionnement avec ou sans cycles, pourrait fournir une réponse à cette question.

- Le système complet, alimenté par le secteur (pour le laboratoire ou l'abri en périphérie du site), par une petite batterie (pour les déplacements sur le terrain) ou par une grosse batterie (pour les mesures de plus longue durée sur le site) et placé dans une valise, constitue un ensemble très souple et polyvalent pour la phase de développement. Néanmoins, pour une utilisation en continu dans un objectif de contrôle, cet ensemble devrait être simplifié.

En outre, afin d'implanter dans l'appareil les modèles de reconnaissance calibrés, il conviendrait de lui adjoindre une intelligence (micro-processeur ou carte PC), qui pourrait alors prendre en charge également l'acquisition de données et le contrôle des vannes, des pompes, ...

Le prétraitement des données

- Selon la littérature, la variable qui donne les meilleurs résultats de discrimination est la variation de la résistance du capteur par rapport à la ligne de base (c'est-à-dire la résistance correspondant à l'air de référence inodore), normalisée relativement à l'ensemble des capteurs (c'est-à-dire divisée par la moyenne quadratique des variations de résistance pour l'ensemble des capteurs).

Comme notre ligne de base n'est jamais produite par un air rigoureusement pur, cette référence n'apporte, dans notre cas, aucune amélioration par rapport à la valeur de la résistance brute, éventuellement normalisée. Cette dernière variable sera donc toujours choisie comme entrée des procédures de traitement de données.

Ceci constitue un apport capital dans notre étude : il montre que l'on peut éviter la référence à la ligne de base, et donc l'emploi de bouteilles de gaz pur ou de filtres exigeant une maintenance.

La faisabilité de la reconnaissance

- Les tests menés au cours de la première année de recherche, sur base de l'instrument de laboratoire et d'échantillons prélevés sur le site d'Hallembaye, ont montré qu'une reconnaissance des odeurs de déchets était possible à partir d'un réseau de capteurs à oxyde d'étain et de techniques de reconnaissance de forme. D'emblée, l'identification de l'odeur de déchets frais s'est annoncée plus fiable que celle de l'odeur de biogaz ou de mâchefers.

C'est sur base de ces premiers résultats qu'ont été finalisés l'instrumentation portable et le protocole d'expériences de terrain.

L'influence des paramètres ambiants

- Depuis le début de ses recherches sur le thème de l'application du nez électronique à la reconnaissance d'odeurs environnementales, l'unité "Surveillance de l'Environnement" de la FUL se préoccupe de l'influence de la température et de l'humidité ambiantes sur les résultats de la classification des odeurs. Ces paramètres sont en effet imposés par les conditions extérieures et, contrairement aux applications en laboratoire, où il est toujours possible de se ramener à des conditions standard, il faut, pour un monitoring de terrain, les considérer comme des contraintes.
- Trois solutions sont envisageables pour s'affranchir de ces contraintes.
Une première possibilité est de compenser l'effet des paramètres d'ambiance par un algorithme adéquat. Cela suppose une connaissance exacte de l'évolution de la réponse des capteurs aux variations de température et d'humidité dans tous les cas de figure. Non seulement cette procédure serait trop fastidieuse, mais elle occulterait complètement le rôle de la température et de l'humidité dans la "tonalité" de l'odeur : par exemple, la teneur en eau fait partie intégrante de l'odeur des mâchefers, et ne peut donc être compensée.
Une deuxième solution est d'intégrer les variables température et humidité aux procédures d'apprentissage, et donc aux modèles de reconnaissance. Cette solution a été abordée dans le cadre de ce travail. Elle postule implicitement que la température et l'humidité font partie des odeurs étudiées, ce qui n'est pas toujours le cas (si c'est certain pour l'odeur de mâchefers, c'est probablement moins vrai pour l'odeur de biogaz).
En outre, le modèle calibré en période de climat particulier (par exemple en été) risque de ne plus fonctionner pour une autre période (par exemple en hiver).
Enfin, la troisième solution est celle que l'unité "Surveillance de l'Environnement" préconise, en fonction des résultats des études précédentes. Il s'agit d'effectuer l'apprentissage dans le plus grand nombre possible de conditions ambiantes (température et humidité), très différentes les unes des autres, de manière à pouvoir considérer les paramètres d'ambiance comme des variables neutres pour les procédures de reconnaissance, basées sur les seuls signaux des capteurs.
- En résumé, quelle que soit la méthode employée, il faut éviter à tout prix d'apprendre à l'instrument à reconnaître des odeurs dans des conditions particulières (par exemple : température élevée, faible humidité) et de tenter ultérieurement de lui faire identifier une odeur dans d'autres conditions (temps froid et humide).
Ce principe essentiel implique donc de multiplier les observations un très grand nombre de fois. L'appareil et les principes étant mis au point, il convient donc de continuer à perfectionner en permanence les modèles de reconnaissance.

La construction du modèle de reconnaissance des odeurs

- Les études préliminaires en laboratoire, puis les campagnes systématiques effectuées sur le terrain et enfin les tentatives ultérieures de validation ont toutes montré qu'il était possible d'obtenir des résultats satisfaisants de reconnaissance des 4 situations potentiellement envisageables sur le site du C.E.T. : pas d'odeur, odeur de déchets frais, odeur de biogaz, ou odeur de mâchefers.
Cette reconnaissance est d'autant plus efficace que les odeurs sont prélevées à proximité de la source.

Cependant, dès qu'un certain recouvrement des odeurs est accepté (mélange des composés gazeux émanant des différentes sources), cette reconnaissance devient difficile, voire impossible.

La distinction "odeur quelconque/aucune odeur" est imaginable, mais la reconnaissance la plus fiable (90%) est celle "odeur de déchets frais/air inodore". C'est sur ce principe, ou plus précisément sur celui de la séparation "odeur de déchets frais/autres ambiances", que nous envisagerons à l'avenir un appareil de suivi continu. Dans toute démarche ultérieure, l'unique objectif visé sera donc d'identifier l'émergence de l'odeur de déchets frais dans un "background" inodore ou composé d'odeurs parasites (dont celle de biogaz, de mâchefers, ou d'échappement de véhicules, ...).

L'évaluation de l'intensité de l'odeur émise

- Différents modèles ont été testés dans le but de relier les signaux des 6 capteurs gaz à l'évaluation de l'intensité olfactive faite par le chercheur sur le terrain, sur base d'une échelle à 4 niveaux.

Le modèle calibré par PLS (Partial Least Squares) fournit le meilleur résultat pour les observations réalisées à proximité des sources d'émission (141 observations, en excluant les mâchefers). Les deux sources confondues, il permet de fournir plus de 70% de prévisions conformes à l'estimation de l'opérateur sur le site. En outre, comme la PCA (Principal Component Analysis), la technique PLS fournit une classification des observations, ici en deux groupes (déchets frais/biogaz). Elle pourrait donc être utilisée comme seul outil, à la fois pour identifier la source et pour prévoir son intensité odorante. Un des apports du travail de recherche est donc de recommander l'emploi d'un modèle basé sur les PLS dans le cadre d'une application réelle de suivi continu des odeurs sur site.

- Dans cet esprit, le modèle calibré à l'émission a été appliqué au jeu de données récoltées lors de la campagne de mesure au mois d'août, en périphérie du site, dans un but de validation. Le modèle semble relativement bien adapté à la prédiction de l'intensité olfactive dans le cas des émissions de biogaz, alors qu'il surestime celle-ci dans le cas des odeurs de déchets frais.

Globalement, la validation de l'intensité de l'odeur prédite par le modèle, tout types de sources confondues, reste fort problématique. Elle souffre notamment du fait que les conditions de mesure sont fort différentes de celles des observations ayant servi à la calibration. En périphérie du site, notamment, le recouvrement entre différents types d'odeur modifie probablement la perception de l'opérateur par rapport aux niveaux ressentis à la source.

Pour le futur, il serait donc souhaitable de parfaire ce modèle de prédiction de l'intensité olfactive en introduisant dans la calibration le plus grand nombre possible d'observations, réalisées non seulement à la source, mais également en périphérie du site, dans différentes conditions climatiques.

- Dans la calibration, il conviendrait également d'ajouter à la variable "intensité estimée", essentiellement subjective, les concentrations en CH_4 et H_2S , fournies par les analyseurs, de manière continue et objective, pour former un bloc de variables dépendantes fiables. L'addition des données de CH_4 dans le modèle semble notamment apporter une information complémentaire très intéressante. Le CH_4 et l' H_2S , en l'occurrence, sont des traceurs typiques du biogaz. Dans l'esprit d'un monitoring visant à détecter l'émergence d'un pic d'odeur de déchets frais, la connaissance de leurs concentrations peut servir à une interprétation différentielle du signal obtenu avec le nez électronique : si celui-ci détecte

une odeur, mais qu'en même temps les concentrations en CH₄ et H₂S sont élevées, il pourrait s'agir de biogaz et non de déchets frais. Néanmoins, cette conclusion n'est pas une certitude : l'émergence simultanée d'un signal du nez électronique et des traceurs de biogaz pourrait également indiquer la génération à la fois des odeurs de déchets frais et de biogaz, et leur dispersion dans le même sens, vers les appareils de détection. C'est la raison pour laquelle le système définitif de monitoring devrait inclure beaucoup plus qu'un simple modèle algorithmique, mais davantage un réel "système expert", qui permettrait de proposer une indication de l'odeur, sur base de règles (de type SI ... ET ... ALORS ...). Ces règles devraient idéalement inclure, outre le résultat du modèle du nez électronique, des informations concernant les teneurs en CH₄ et H₂S, ainsi que les valeurs des paramètres météorologiques locaux.

L'influence des conditions météorologiques

- L'analyse des observations rassemblées par le surveillant communal a permis de noter l'importance des variables température, vitesse du vent et direction du vent dans les phénomènes de génération et de transfert de l'odeur.
Un ensemble de conditions particulières semble favorable à l'apparition des odeurs chez les riverains : type de temps instable, températures intermédiaires (entre 10 et 23°C), vent moyen (10 à 20 km/h).
- Dans le futur, cette analyse devrait être intensifiée, notamment en rendant plus systématique encore la récolte des informations et en ajoutant la mesure d'autres paramètres météorologiques. De précédentes études ont notamment montré que la radiation solaire semblait être la variable météorologique qui influençait le plus l'apparition d'odeurs de déchets chez les riverains d'un C.E.T.
- Par contre, il était envisagé dans la méthodologie initialement prévue d'introduire éventuellement un modèle de dispersion atmosphérique de type bi-gaussien comme outil supplémentaire dans le programme de contrôle pour tenir compte des conditions météorologiques. Un tel modèle s'avère inadéquat pour une commande en temps réel, dans la mesure où il n'est pas dynamique et qu'il est plutôt destiné à calculer un état moyen de dispersion au cours d'une période donnée. Un autre modèle, mettant en œuvre les équations de la dynamique des fluides, a été également envisagé, mais il s'avère beaucoup trop lourd pour une utilisation sur le terrain. L'usage de modèle de simulation a donc été abandonné dans le cadre de ce projet.

La validation en continu

- Les travaux concernant la mise au point de l'appareil, y compris les techniques de traitement de l'information, étant suffisamment avancés, nous considérons le volet "recherche" comme étant actuellement terminé. Nous souhaitons cependant exprimer quelques perspectives quant au suivi du projet dans son application pratique pour les gestionnaires du C.E.T.
- D'une part, il semble intéressant de se réserver une plus longue période pour l'apprentissage et la calibration des modèles établis, en laissant le nez électronique fonctionner en continu sur le site. Ceci ne pourra se réaliser qu'avec l'appui et la collaboration des gestionnaires du C.E.T.
- L'unité "Surveillance de l'Environnement" envisagerait dès lors de concevoir un appareil de suivi continu sous forme de module à placer dans l'armoire de contrôle, sous les

appareils de mesure d'H₂S et de CH₄, situé au niveau de la station météo, en périphérie du site. Elle pourrait, moyennant accord de l'entreprise, continuer à valider l'information fournie par le nez électronique durant quelques mois.

- Au stade actuel de développement, une proposition cohérente serait, en plus du stockage régulier des informations, d'émettre un signal se traduisant par un "bip sonore" sur un récepteur portable. Les opérateurs de la F.U.L. ou les préposés du site d'Hallembaye, voire le surveillant communal, pourraient porter ce récepteur, sous forme d'un petit boîtier peu encombrant et ainsi vérifier si le signal envoyé correspond bien à une odeur.

Tout ce programme de validation avait été prévu dans le cadre d'une éventuelle troisième année de travail. Pour diverses raisons, le chercheur en place ne désirait pas poursuivre au-delà de la clôture normale de la convention. L'unité "Surveillance de l'Environnement" n'a dès lors pas négocié de prolongation, car elle n'avait pas en son sein d'autre chercheur disponible. Donc, pour une seule année de recherche supplémentaire, elle aurait dû former une troisième personne, qui n'aurait probablement pas pu être opérationnelle avant quelques mois.

Par ailleurs, il serait bon de prendre un peu de recul par rapport aux résultats obtenus et de peaufiner le développement de l'appareil de suivi continu, de manière à être prêt pour la prochaine saison estivale, époque d'odeurs plus intenses.

La convention FIRST se clôture donc par un souhait réciproque de poursuivre la collaboration entre l'institution de recherche et l'entreprise, au vu des résultats très prometteurs obtenus à l'issue de la phase de recherche exploratoire.

CHAPITRE VIII: Conclusions sur le déroulement de la convention FIRST.

8.1. Avis du promoteur de l'unité universitaire.

Un contrat FIRST, par définition est un challenge : il doit comporter une part de risque : il s'agit avant tout d'une recherche, exploratoire par essence, mais qui doit répondre à un besoin immédiat de l'entreprise partenaire. Ces deux critères sont particulièrement rencontrés dans ce projet.

La part de risque est importante : le concept de "nez électronique", que nous envisagions d'appliquer pour atteindre les objectifs fixés par le cahier des charges, est un concept récent, il date tout au plus d'une dizaine d'années. Son application pour la mesure des odeurs dans l'environnement n'est pas fréquente : peu de laboratoires de recherche s'y sont risqués dans la communauté scientifique. Mais l'originalité la plus marquante est son utilisation en temps réel, directement sur le terrain. Nous pouvons affirmer que l'unité "Surveillance de l'environnement" de la FUL est une des seules qui en fait un de ses objectifs principaux.

Par ailleurs, l'entreprise Watco/Sotradec souhaitait répondre à un besoin très pragmatique, qui consistait à contrôler, de la manière la plus fiable possible, les dispositifs d'abattement de l'odeur mis en place sur le Centre d'Enfouissement Technique (CET) d'Hallembaye, de manière à tenter de garantir au maximum le confort des riverains.

Cependant, le risque pris en proposant ce projet était, dès le départ, tout à fait mesuré. D'une part, l'Unité de recherche de la FUL possédait déjà une solide expérience en matière de mesure des odeurs environnementale par le principe du "nez électronique". De précédents contrats, dont une autre convention FIRST (Nez électronique adapté aux odeurs de sucrerie - Convention n° 2925), lui avait permis de tester la faisabilité de la méthode, d'acquérir une solide expérience en la matière, de créer un laboratoire de référence, et surtout, de jeter les bases du concept d'appareil portable, utilisable sur le terrain. D'autre part, le profil du chercheur proposé devait constituer une garantie d'atteindre les résultats escomptés, en limitant sensiblement les risques.

Pour ce travail, la FUL proposait en effet un ingénieur agronome : aguerri aux principes de chimie et de biologie qui conditionnent les phénomènes de fermentation et de dispersion des odeurs de déchets, l'ingénieur agronome n'est pas non plus étranger à la technologie sous-jacente au nez électronique. Si, par ailleurs, il pouvait également se débrouiller dans l'utilisation pertinente des méthodes de traitement de données, il possédait toutes les qualités requises pour mener cette recherche à son terme.

Ces qualités pluridisciplinaires, les deux chercheurs engagés dans le cadre de cette convention les possédaient.

La première personne engagée, Véronique Wiertz, a jeté les bases de la recherche, en imaginant l'appareil portable qui allait servir à l'apprentissage, puis au monitoring des odeurs de CET. Elle a pris les premiers contacts, imaginé les premiers protocoles, orienté le choix des capteurs de mesure et des procédures d'échantillonnage sur le terrain, en relation constante avec le reste de l'équipe de recherche. Sa bonne vision des objectifs et sa clairvoyance dans les choix effectués furent ses principales qualités.

Pour des raisons familiales, Véronique Wiertz n'a pas pu terminer ce contrat : après un premier arrêt des recherches pour congé de maternité, elle a préféré quitter l'institution pour se consacrer entièrement à ses enfants. Néanmoins, le projet était bien lancé, et le second chercheur, David Monticelli, également ingénieur agronome, a "pris le train en marche", en peaufinant l'instrumentation, en précisant de manière rigoureuse le protocole d'expérimentation sur le terrain, puis en calibrant les modèles de reconnaissance, qu'il a employés en spécialiste.

A posteriori, cette interruption fut probablement bénéfique : elle fut l'occasion de prendre du recul par rapport au sujet, d'abandonner certaines stratégies, au profit d'autres, plus efficaces, de reprendre de nouveaux contacts, et de donner une nouvelle impulsion à la recherche.

L'un comme l'autre, les deux chercheurs se sont parfaitement adaptés aux exigences du projet. Ils ont pu appliquer et approfondir les disciplines qu'ils avaient apprises dans le cadre de leurs études de base, mais ils ont surtout appris à manipuler des appareils électroniques et les logiciels de traitement des données, à établir un plan d'échantillonnage, à employer judicieusement leur temps sur le terrain, malheureusement fort éloigné du laboratoire, et à exploiter au maximum l'information dont ils disposaient.

Probablement, ni l'un, ni l'autre ne continueront exactement dans cette voie : pour diverses raisons, ce n'était pas leur souhait. Cependant, l'expérience nouvelle qu'ils ont acquise leur permettra d'entrer de plein pied dans la vie professionnelle, et de briguer des emplois dans le très exigeant domaine de l'environnement.

En ce qui concerne les objectifs du projet, ils sont pratiquement atteints : la faisabilité du monitoring continu des odeurs sur un site de CET est prouvée, un appareil portable a été conçu et expérimenté avec succès sur le terrain. Il est maintenant envisageable de placer un tel instrument à demeure sur le CET, dans l'espoir de pouvoir un jour contrôler les dispositifs d'aspersion de produits anti-odeurs en périphérie du site. Le traitement des données météorologiques et l'étude de la dispersion des odeurs ont également apporté des informations intéressantes et peuvent servir à alimenter un logiciel de contrôle.

Un des intérêts du projet est certainement d'imposer un contact constant du chercheur avec la réalité du terrain, et donc avec l'ambiance de l'entreprise d'accueil. Le principe de la méthode de mesure exige en effet de recueillir un grand nombre d'observations sur le site. Ces déplacements auraient probablement pu être encore plus nombreux si la distance entre l'université et le site d'accueil avait été plus courte.

Comme annoncé dans le projet initial, une troisième année aurait probablement permis de concrétiser le principe et de le valider par un test continu sur le terrain, en parallèle avec des mesures olfactives. Si cette troisième année n'a pas été envisageable dans le cadre du contrat FIRST, ces tests pourront cependant être probablement réalisés.

L'unité Surveillance de l'Environnement a en effet mis en œuvre un appareil à fixer dans la baie de mesure, située dans un abri en périphérie du CET. Cet appareil possède les mêmes capteurs et le même dispositif de contrôle des flux gazeux que le nez électronique portable utilisé dans la phase d'apprentissage. Il est en outre doté d'un dispositif intelligent intégrant les modèles de reconnaissance et d'évaluation des odeurs, précédemment calibrés et,

il sera capable de prendre également en compte les influences climatiques. Dans un premier temps, l'appareil enverra un signal chaque fois qu'il détecte le dépassement de l'odeur caractéristique des déchets frais.

Le bilan de la convention FIRST est donc globalement positif: Même si les deux chercheurs engagés au cours de ces deux années ne souhaitent pas engager leur carrière professionnelle dans la voie de la mesure des odeurs de CET, ils ressortent de l'expérience avec un acquis qu'ils pourront valoriser. En outre, la FUL envisage donc de poursuivre la collaboration avec les gestionnaires du CET, dans le but d'atteindre l'objectif de monitoring et de contrôle des odeurs en continu : il s'agirait là d'une première en la matière, qui pourrait faire "boule de neige" et servir de base pour d'autres applications.

8.2. Note du chercheur.

Le présent projet de recherche, qui s'est déroulé sur deux années, relevait d'une approche nettement pluridisciplinaire dont les aspects enrichissants étaient séduisants. En effet, il s'agissait tout d'abord d'un sujet nécessitant aussi bien des compétences de base d'ingénieur agronome (physique, statistique) que des compétences plus particulières en matière d'aménagement du territoire (sensibilité propre aux conditions "terrain").

Le travail de recherche poursuivi m'a permis, pour une première expérience professionnelle, de m'insérer au sein d'un groupe de travail, coordonné par le Professeur Jacques NICOLAS et l'assistante doctorante Anne-Claude ROMAIN dont les enseignements et les compétences en matière de nez électronique s'avéraient essentielles pour mener à bien ce projet. A ce titre, je tiens à remercier l'ensemble des membres de l'équipe de la F.U.L. (département "surveillance de l'environnement) qu'ils soient professeurs, chercheurs ou techniciens pour leur encadrement.

La collaboration avec WATCO TREATMENTS.a. et les gestionnaires du site d'Hallembaye de chez INTRADEL a permis également un contact direct avec le monde industriel, donnant ainsi une dimension réellement appliquée aux résultats obtenus à l'issue des deux années de travail. Cet aspect concret du projet a également abouti à une meilleure compréhension de leurs souhaits en matière de recherche et développement.

8.3. Note de l'entreprise partenaire.

WATCO TREATMENT

WATCO TREATMENT S.A.
Division Herstal

Haccourt, le 11 décembre 2000

Port de Herstal
Pré Wigl
B-4040 Herstal

Tél. 04-240 74 25
Fax 04-264 67 98

TVA BE 413.510.109
RCL 202.199
N° enreg. 03.25.11
Société Général 688-1003314-48
Générale de Banque 240-0764500-47

Réf : FF/FDC/00315

F.U.L.
A l'attention de M. J. Nicolas
Av. de Longwy, 185

6700 ARLON

Monsieur,

Lorsque la F.U.L. nous a contacté pour devenir le partenaire industriel nécessaire à la réalisation du projet en question, nous venions de terminer une étude sur l'efficacité opérationnelle des nez électroniques alors disponibles sur le marché. Malheureusement, aucun nez électronique ne semblait pouvoir répondre aux critères que nous estimions indispensables pour asservir efficacement notre système d'aspersion périphérique de produit anti-odeur.

Au bout de ces deux années de recherche, un nez électronique tenant compte des contraintes du terrain a pu être mis au point par les deux chercheurs de la cellule Surveillance Environnement de la FUL.

Contrairement à l'idée initiale, cet appareil n'est pas encore capable de discriminer les trois différents type d'odeur (déchets frais, biogaz et vapeurs mâchefers) de manière représentative. Il permet cependant de discerner avec une certaine fiabilité (90%) l'odeur des déchets frais d'un air inodore. Dès lors, les possibilités d'utilisation de celui-ci en tant qu'instrumentation de contrôle/commande de notre système d'aspersion restent donc bien d'actualité.

Comme le propose M. Nicolas, il convient maintenant de valider les résultats obtenus sur une plus grande période. Watco Treatment peut apporter à la cellule Surveillance Environnement sa collaboration dans ce sens afin d'installer à demeure le nez électronique de terrain sur le site d'Hallembaye pour le printemps-été 2001. Nous nous investirons également dans le report d'une alarme en cas de détection d'odeur et ceci au travers du système de supervision globale du site.

Tout au long de ces deux années, nous avons pu apprécier la démarche de qualité et le professionnalisme des deux chercheurs ayant travaillé sur le projet. Ils ont en effet fait preuve, au vu des développements mathématiques réalisés et des traitements statistiques utilisés, de persévérance, de motivation et d'une sincère implication dans cette recherche. Nous nous sommes également réjouis de la manière dont les différents acteurs intervenant sur le site, à savoir Watco, Intradet et le surveillant communal, ont été intégrés dans cette recherche.

Dans l'attente des suites de notre collaboration, nous vous prions de croire, Monsieur Nicolas, en l'assurance de notre haute considération.


Frédéric FOREST
Directeur

ège social : rue Gatti de Garmond, 254 - 1180 BRUXELLES - RCB 379.494



BIBLIOGRAPHIE.

BACCINI et BESSE Ph. (1999). Statistique descriptive multidimensionnelle: techniques factorielles de base.

CORCORAN P. *et al.*(1994). An intelligent Gaz sensor. *In Sensors and Actuators A*, 41/42, pp 192-197.

DAGNELIE P (1975). Théorie et méthodes statistiques. Les méthodes de l'inférence statistique (vol 2).

De BRITO V. (1997). Caractérisation et analyse des données d'un capteur de gaz intelligent. Rapport de D.E.A., Nancy 1.

GARDNER J.W (1991). Detection of vapours and odours from a multisensor array using pattern-recognition techniques Part 1. Principal Component and Cluster Analysis, *Sensors and actuators B*, 4, pp 109-115.

GARDNER J.W. and BARTLETT P.N. (1991). Sensors and sensory systems for an electronic nose, NATO ASI Series.

GARDNER J.W. and SHURMER H.V. (1991). Integrated tin oxide odour sensors, *In Sensors and Actuators B*, 4, pp 117-121.

GARDNER J.W., HINES E..L. and TANG H.C. (1992). Detection of vapours and odours from a multisensor array using pattern-recognition techniques. Part 2. Artificial Neural Network, *In Sensors and Actuators B*, 9, pp 9-15.

KELLER P. (1992). Electronic nose and their applications. Neural Network application studies workshop, Portland, USA.

KRAMER R. (1998). Chemometric techniques for quantitative analysis. Marcel Dekker Inc., Massachusetts, USA.

MONTICELLI D. (2000). Contrôle et commande de la réduction d'odeur générée par un C.E.T. Programme FIRST/ Visa n°98 13730, troisième rapport intermédiaire.

PALM R. (1992). Note de statistique descriptive sur les méthodes d'analyse factorielle, Service de Statistiques et Informatique, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux.

ROMAIN A-C., NICOLAS J. and ANDRE, P (1997). In situ measurement of olfactive pollution with inorganic semiconductors : limitations due to the influence of humidity and temperature, *Seminars in food analysis* 2, 4, pp 283-296.

ROMAIN A.C., NICOLAS J., WIERTZ V., MATERNOVA J. and ANDRE Ph. (1999). Use of a simple tin oxide sensor array to identify five malodours collected in the field. *In Sensors and Actuators B*, 62, pp 73-79.

ROMAIN A-C (2000). Collecte et traitement des données relatives au suivi des odeurs sur et aux alentours du C.E.T. de Braine-le-Château, Fondation Universitaire Luxembourgeoise.

SHURMER H.V. (1989). The application of discrimination techniques to alcohols and tobaccos using tin-oxide sensors, *Sensors and Actuators*, 18, pp 361-371.

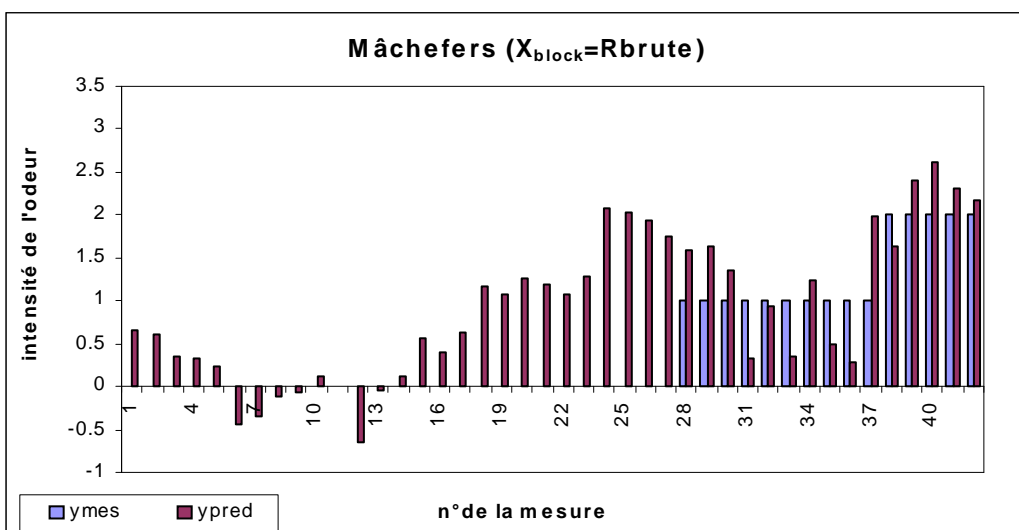
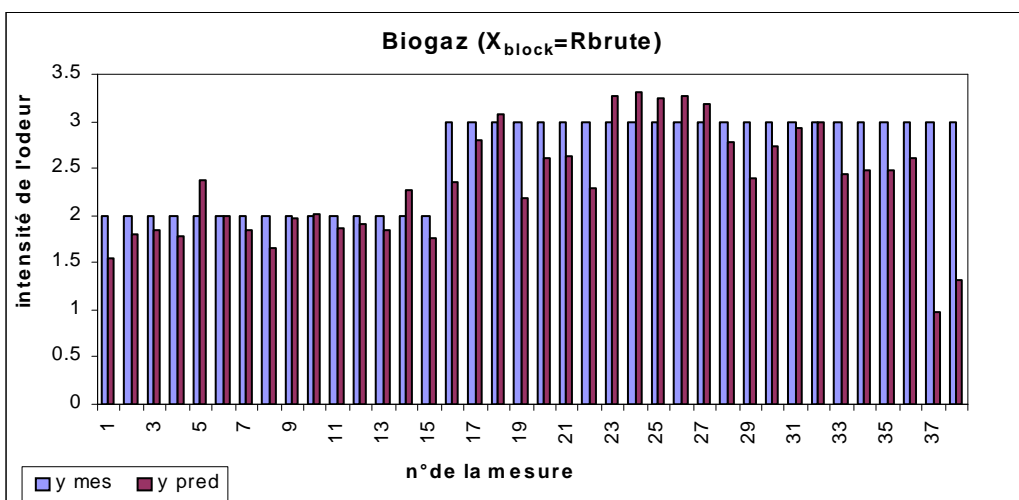
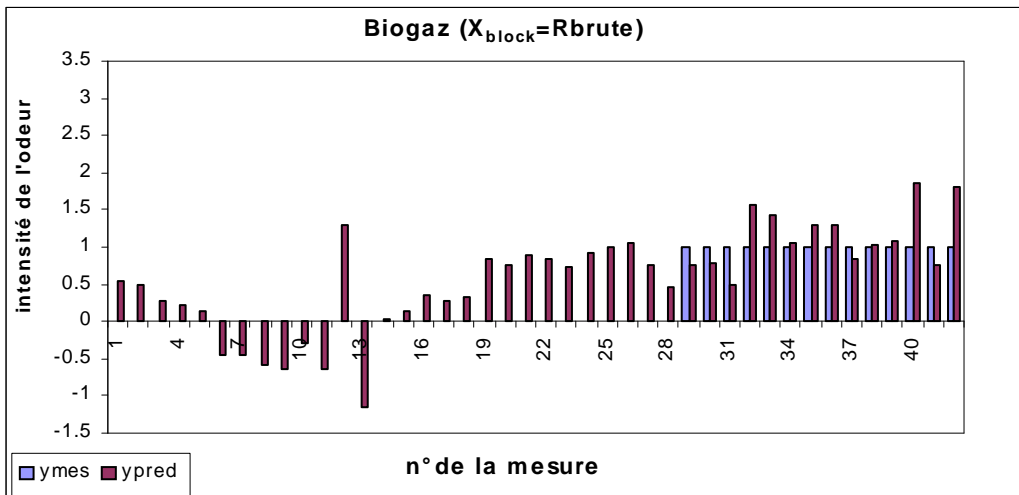
SHURMER H. V., GARDNER, J. W., CORCORAN, P. (1990). Intelligent vapour discrimination using a composite 12-element sensor array, *Sensor and actuators B1* pp 256-260.

WIERTZ V. (1999). Contrôle et commande de la réduction d'odeur générée par un C.E.T. Programme FIRST/ Visa n°98 13730 , Premier rapport intermédiaire.

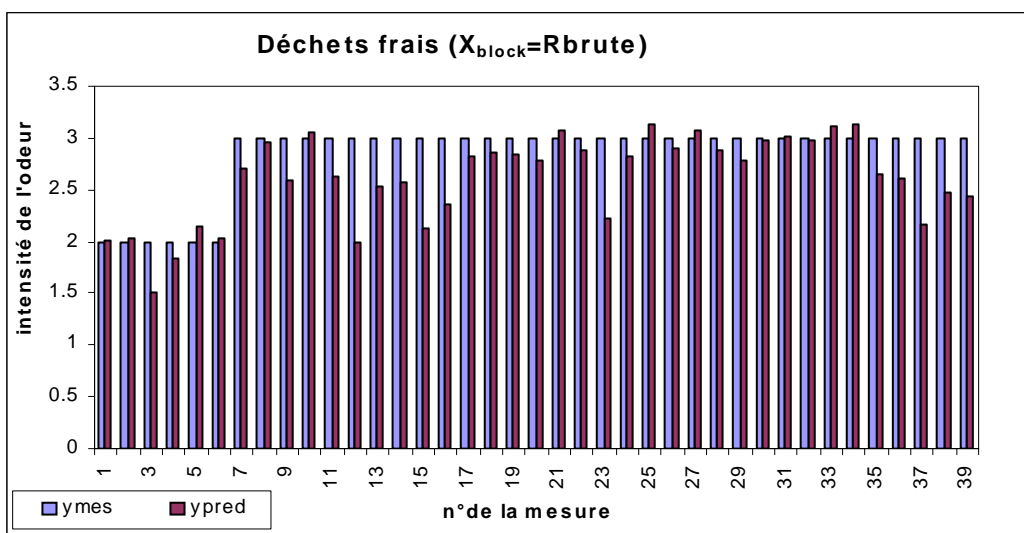
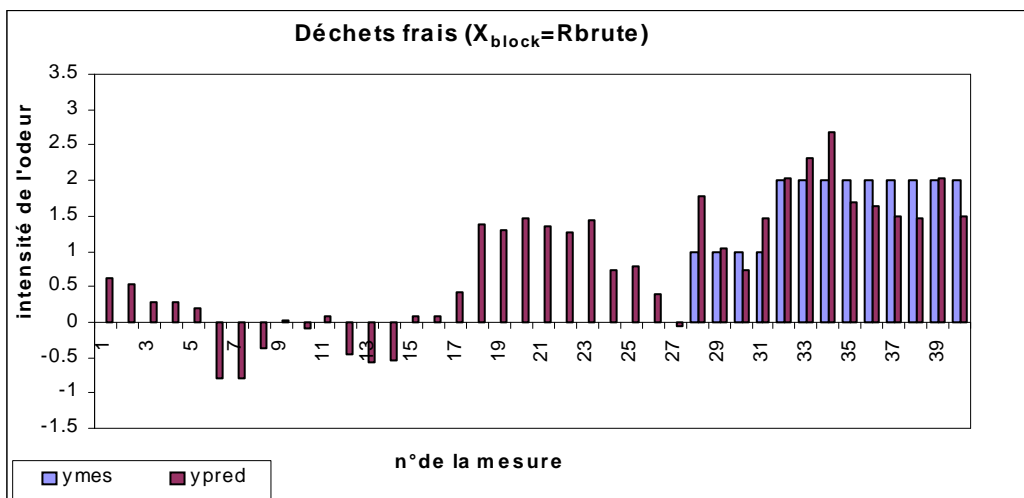
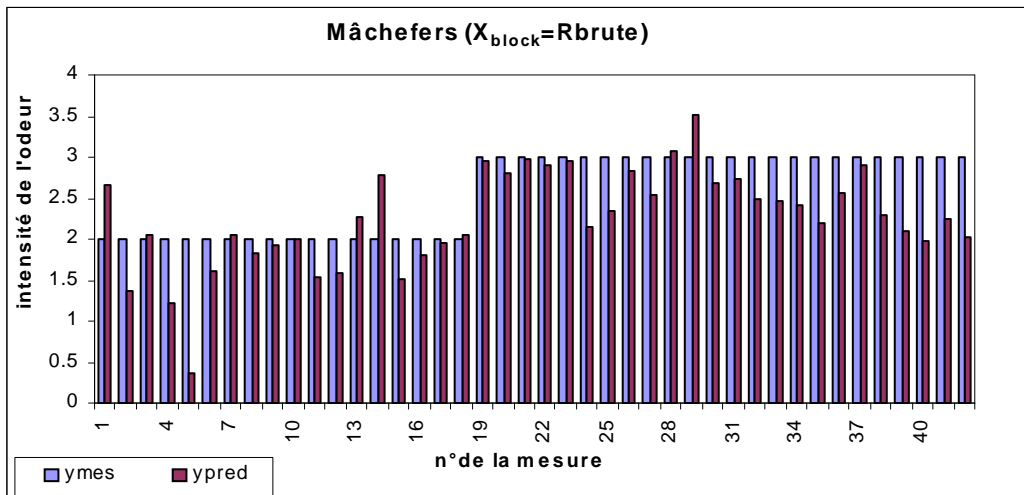
WIERTZ V. (1999). Contrôle et commande de la réduction d'odeur générée par un C.E.T. Programme FIRST/ Visa n°98 13730, Deuxième rapport intermédiaire.

ANNEXE I

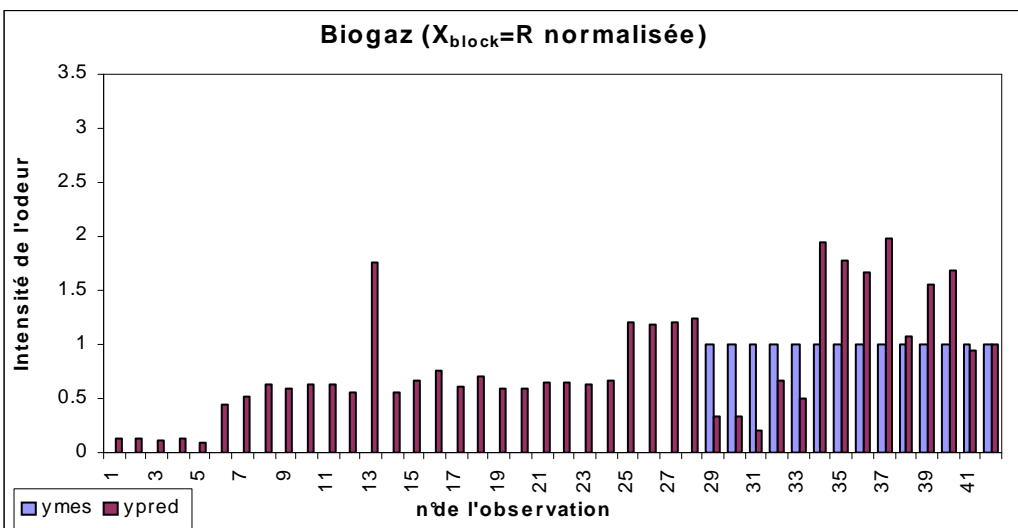
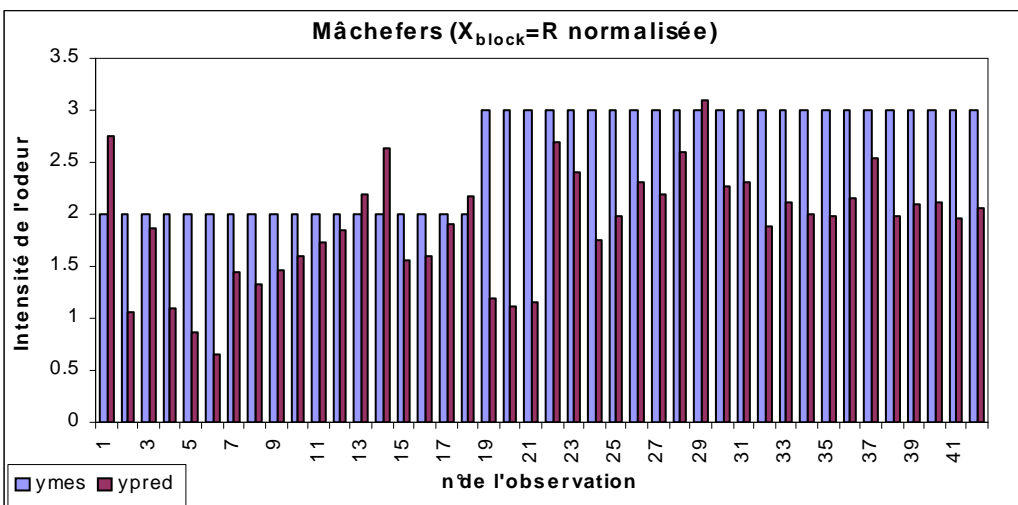
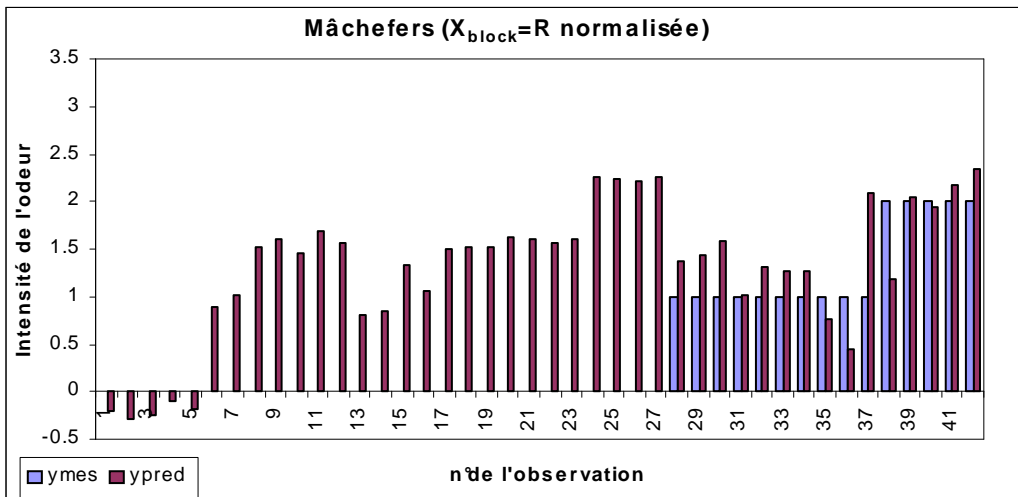
ANNEXE II



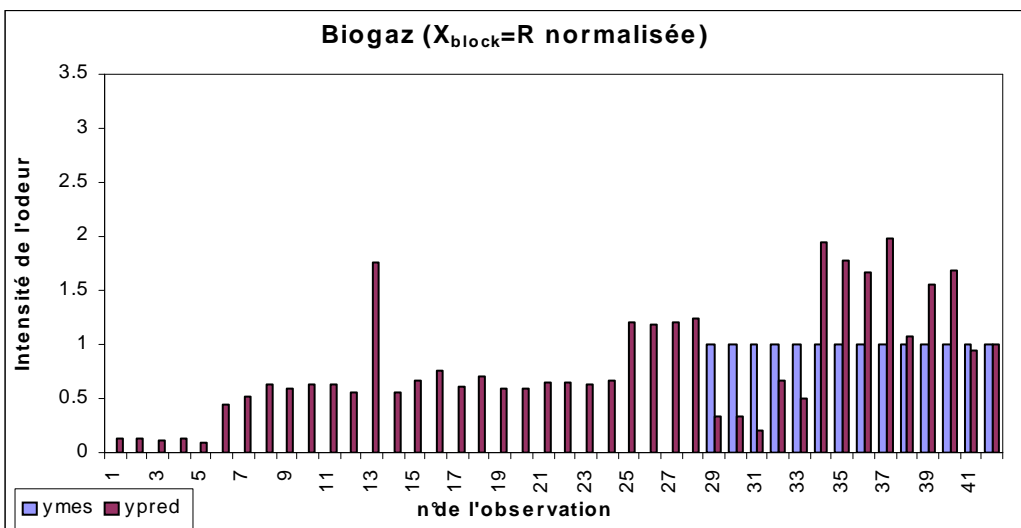
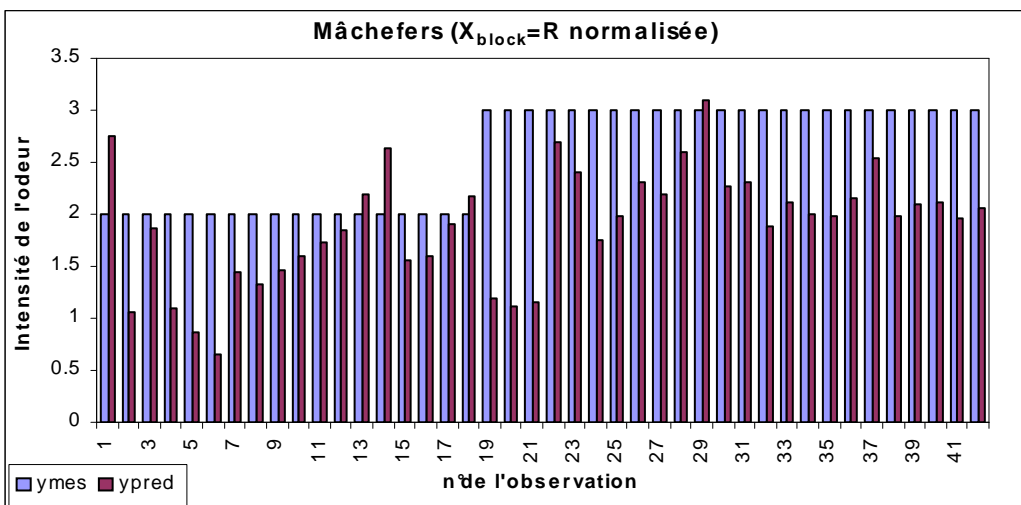
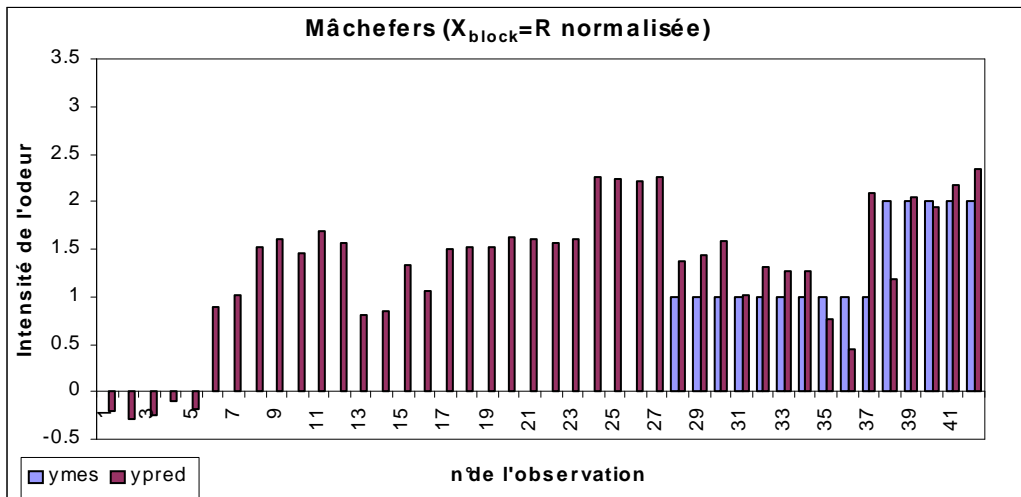
Graphes 5.4.a: histogrammes des valeurs d'intensité odorante mesurées in situ et prédites par le modèle (régression PLS) pour la variable d'entrée R brute.



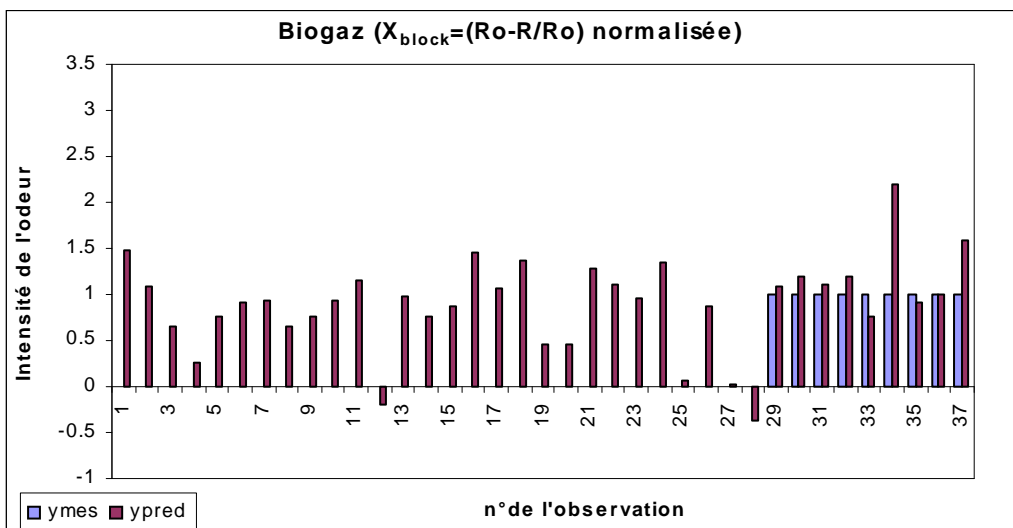
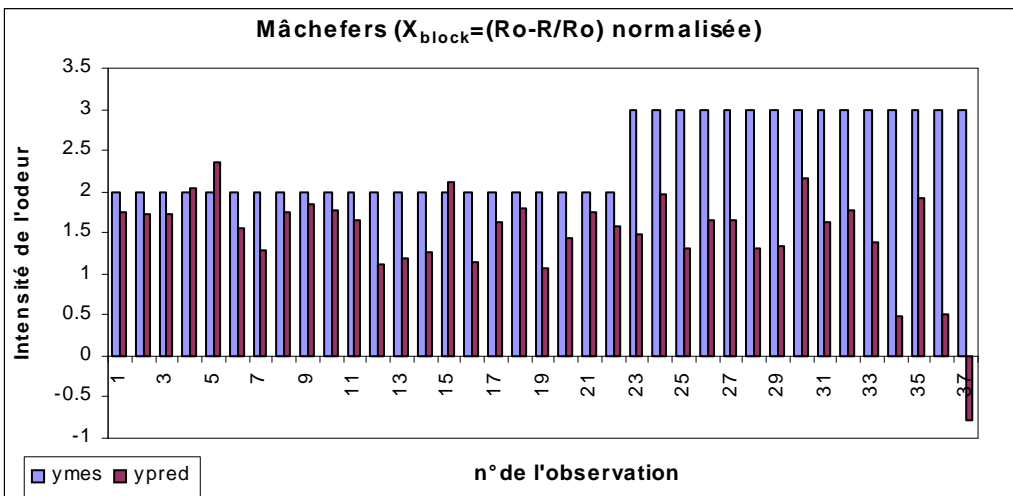
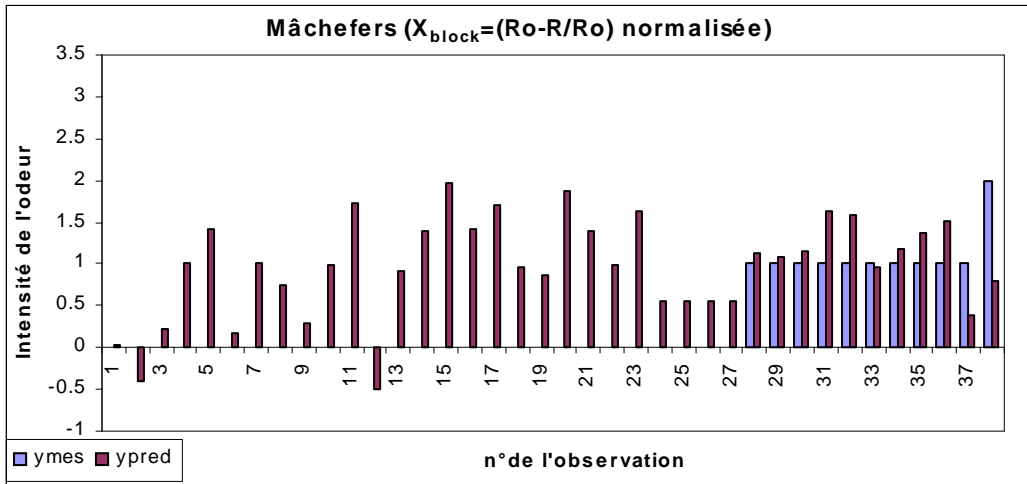
Graphes 5.4.a (suite) : histogrammes des valeurs d'intensité odorante mesurées in situ et prédites par le modèle (régression PLS) pour la variable d'entrée R brute.



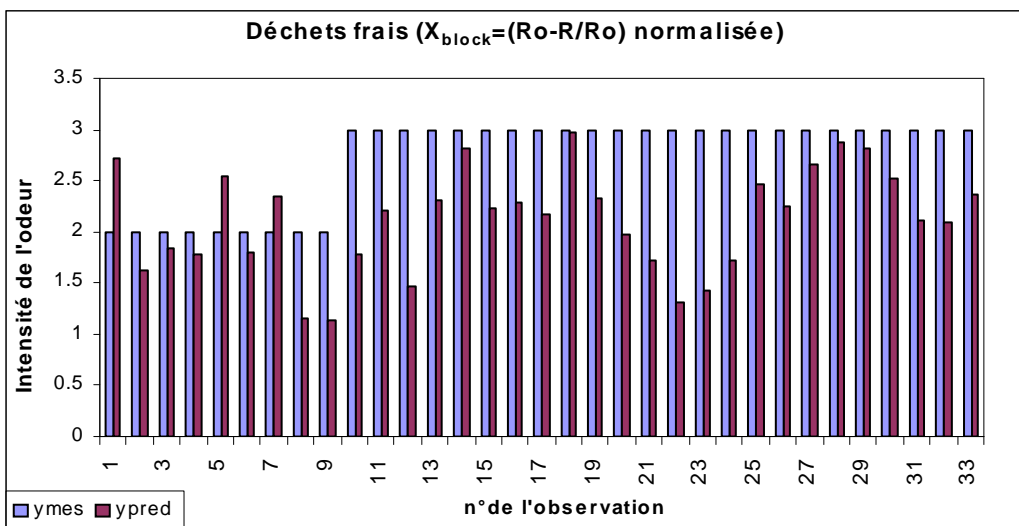
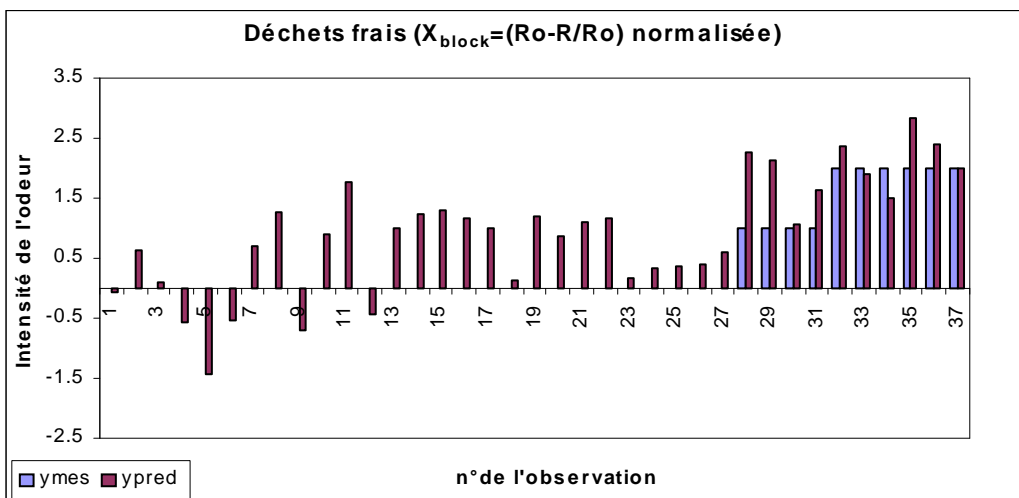
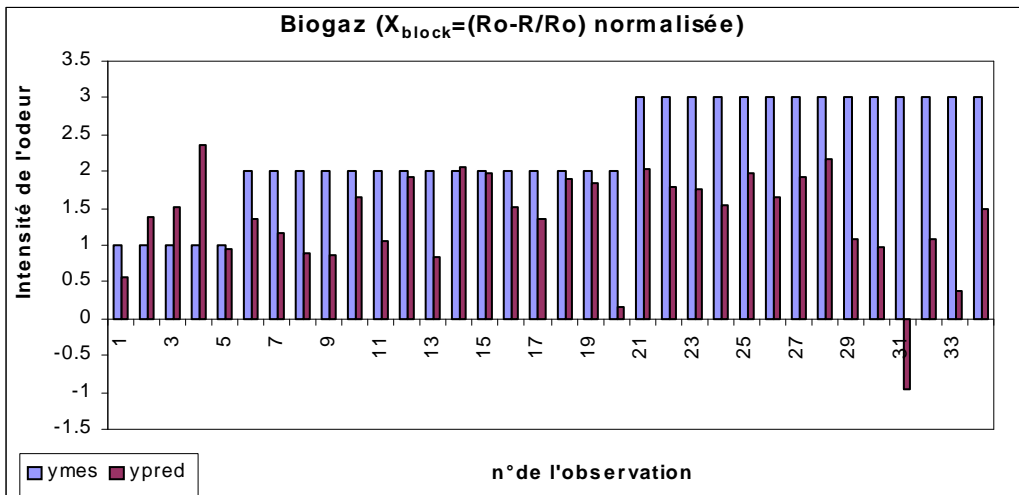
Graphes 5.4.b: histogrammes des valeurs d'intensité odorante mesurées in situ et prédites par le modèle (régression PLS) pour la variable d'entrée R normalisée.



Graphes 5.4.b (suite) : histogrammes des valeurs d'intensité odorante mesurées in situ et prédites par le modèle (régression PLS) pour la variable d'entrée R normalisée.

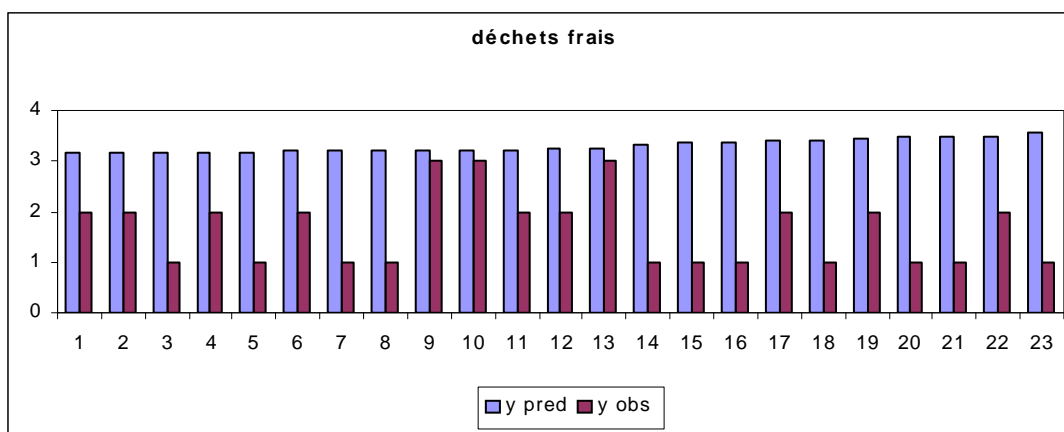
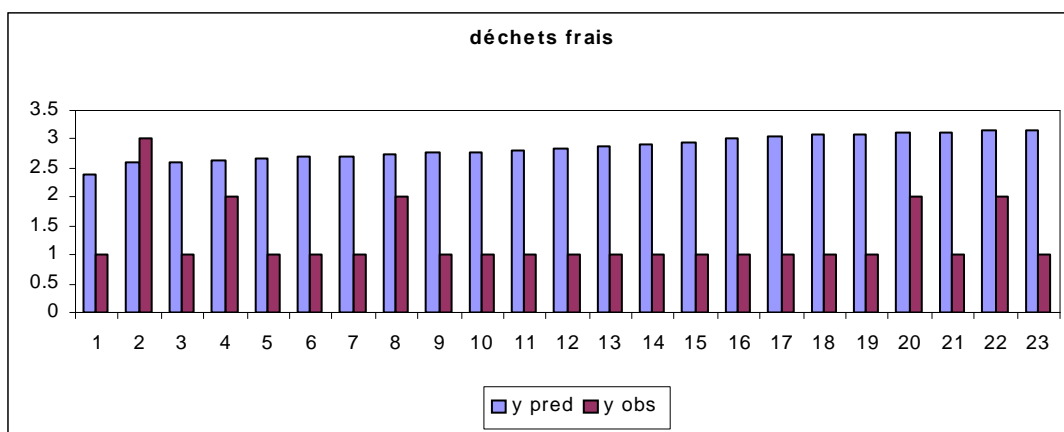
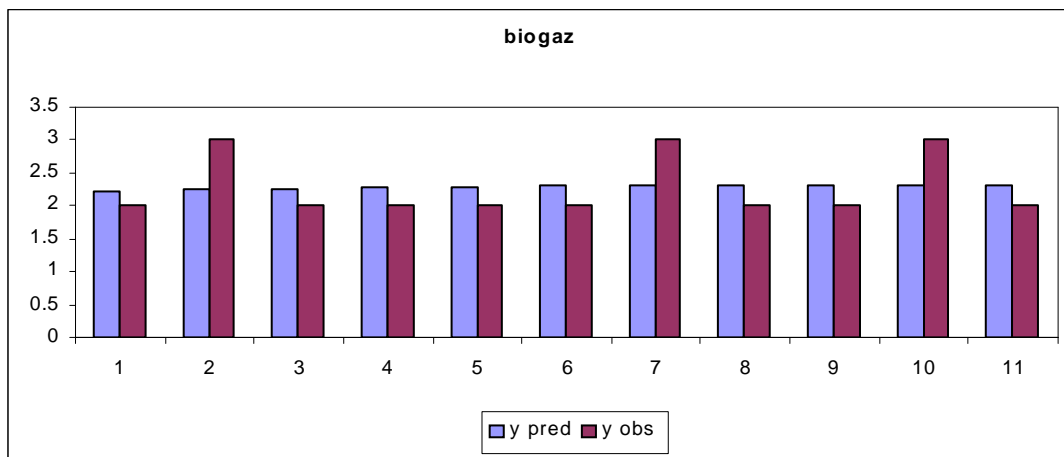


Graphes 5.4.c: histogrammes des valeurs d'intensité odorante mesurées in situ et prédites par le modèle (régression PLS) pour la variable d'entrée ($Ro-R/Ro$) normalisée.



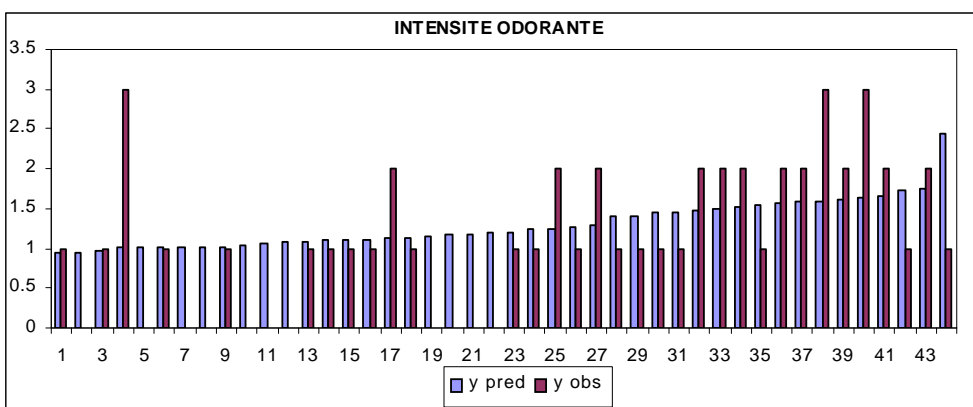
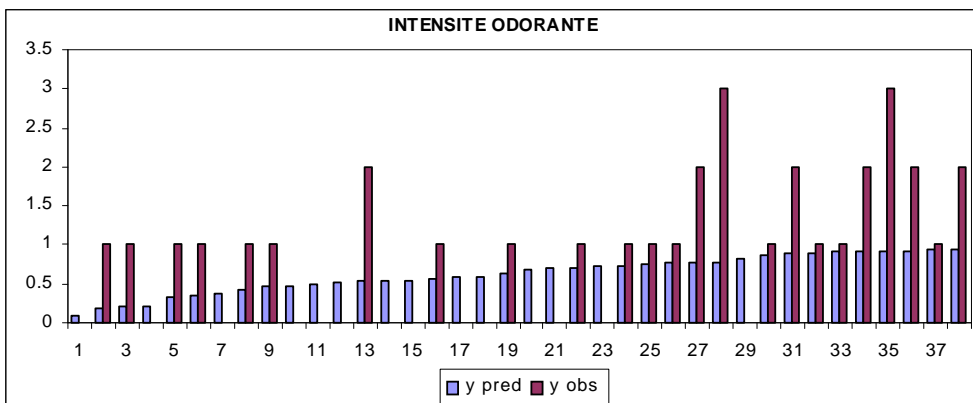
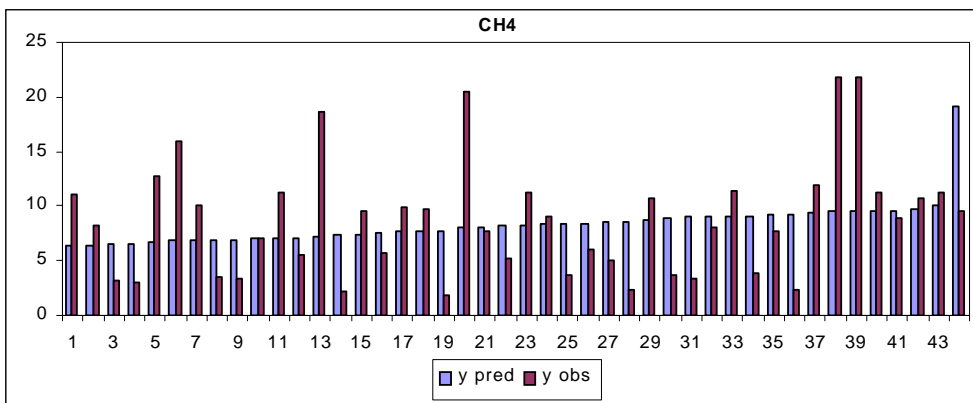
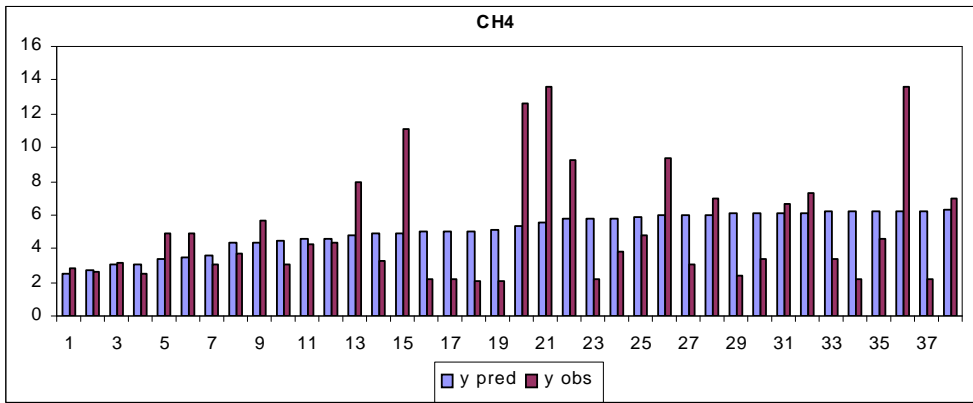
Graphes 5.4.c (suite) : histogrammes des valeurs d'intensité odorante mesurées in situ et prédites par le modèle (régression PLS) pour la variable d'entrée (Ro-R/Ro) normalisée.

ANNEXE III

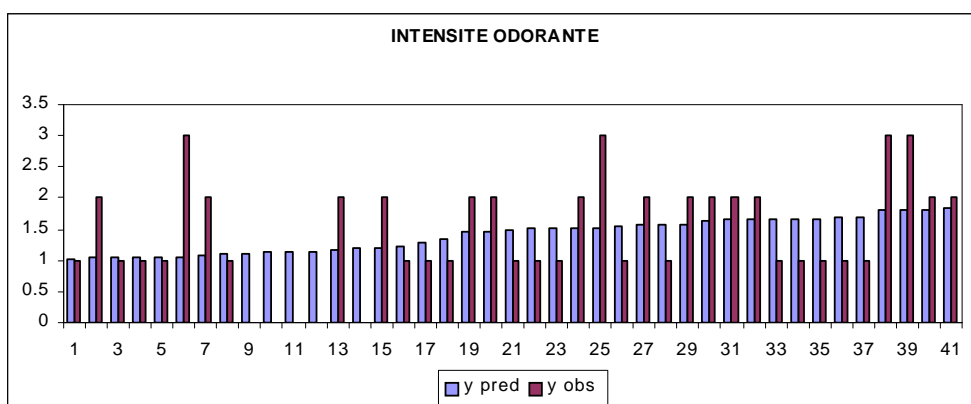
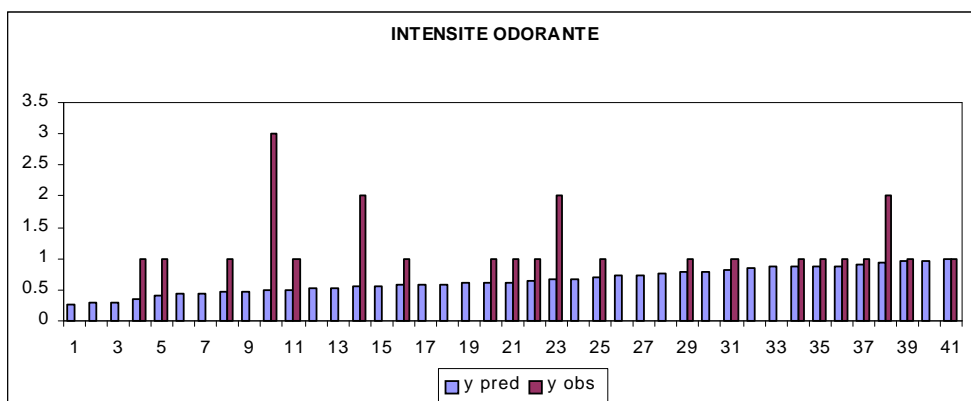
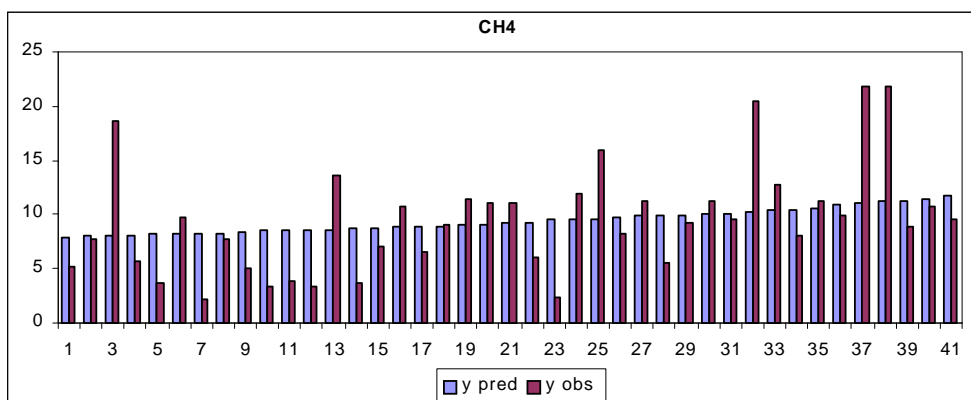
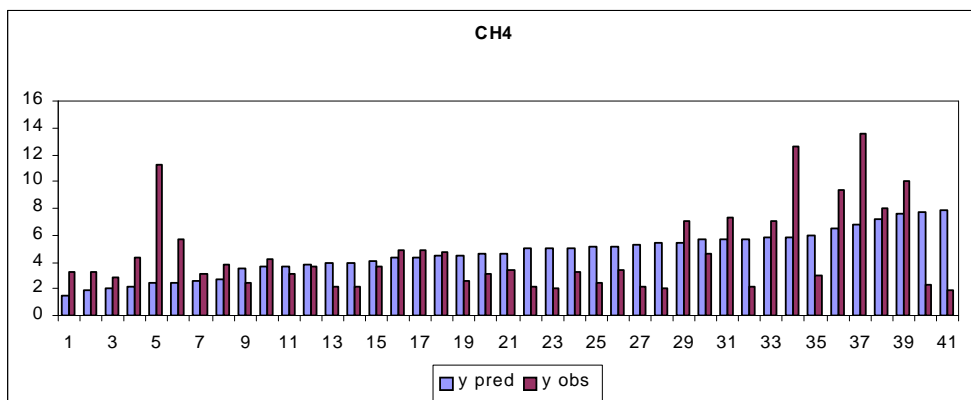


Graphes 5.6.b: histogrammes des valeurs prédictives vs. valeurs observées pour une validation des modèles "biogaz et déchets frais" à partir du jeu de données de la campagne d'août (variable d'entrée Rbrute).

ANNEXE IV

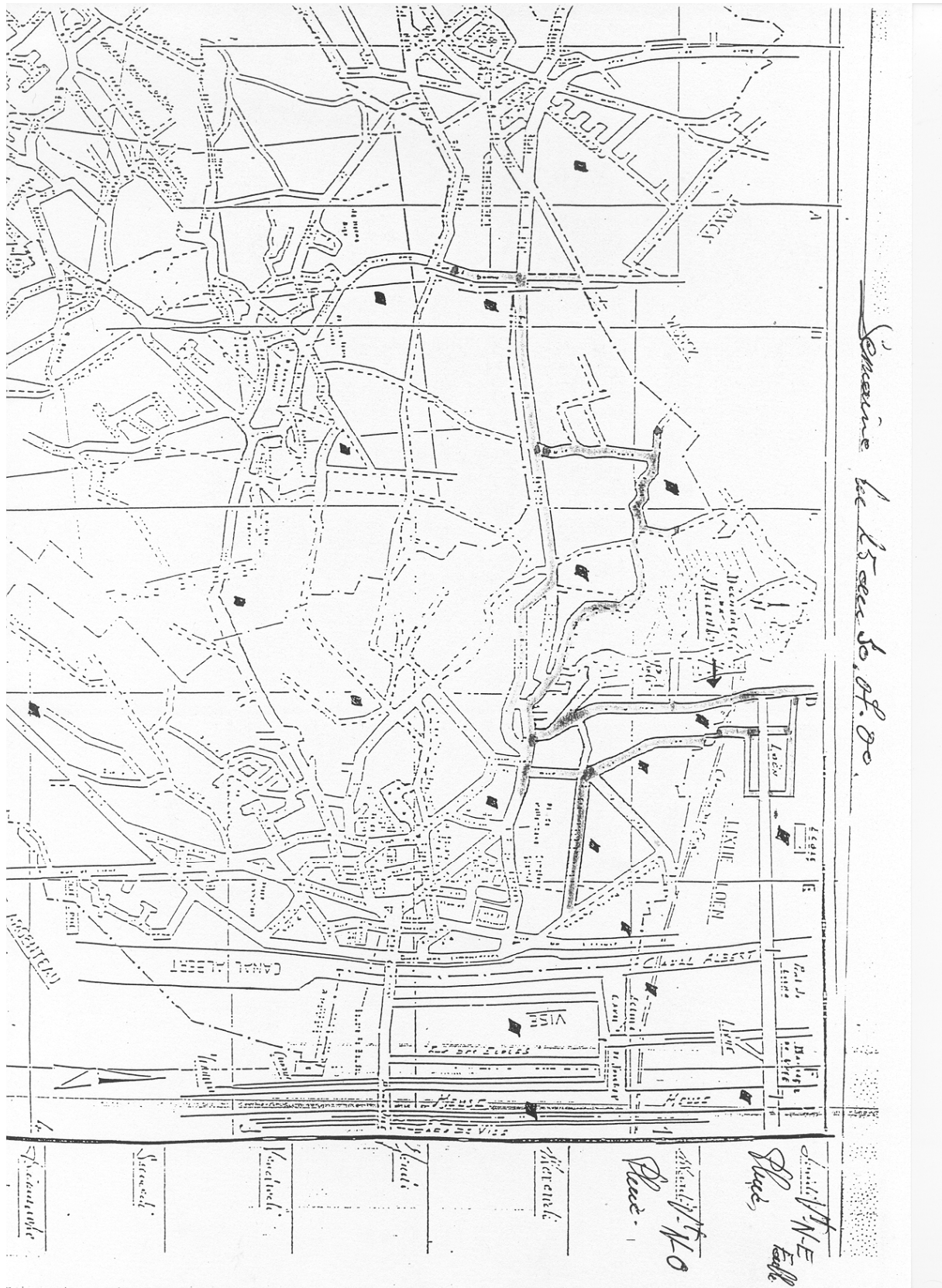


ANNEXE IV: valeurs prédictives vs. observées pour un modèle calibré à la fois sur l'intensité odorante et les valeurs de concentration de méthane dans l'air (variable d'entrée R brute).



ANNEXE IV: valeurs prédictives vs. observées pour un modèle calibré à la fois sur l'intensité odorante et les valeurs de concentration de méthane dans l'air (variable d'entrée R normalisée).

ANNEXE V



Annexe Va : Modèle de carte sur laquelle est consignée l'information "odeur" par le surveillant communal et sur base de laquelle sont conçues les fiches d'observations.

date	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Somme	Odeur	vent	Néb.	T° moy.	T° max.	HR moy.	vit vent	vit max
5/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	1	SW	7	5.2	7.1	80	29	68
6/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	1	SW	6	4.9	8.4	85	22	61
7/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SW	7	9.3	11.2	80	22	65
8/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SW	6	9.4	10.7	75	22	50
9/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SW	6	9.7	13.2	81	14	36
10/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a	2	8.7	12.9	66	14	32
11/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a	1	8.4	11.3	64	18	36
12/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SW	5	8.2	11	73	22	32
13/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SW	6	8.9	11	75	22	47
14/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SW	7	7.8	9.6	76	22	58
15/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SW	8	5.8	8.2	88	25	58
16/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S	7	7	8.6	91	18	43
17/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a	5	3.6	6.7	89	18	36
18/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a	7	4.2	6.1	75	32	61
19/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	W	8	4.3	5.9	87	29	58
20/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NW	8	1.8	3.6	93	22	47
21/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a	7	-0.3	0.8	86	7	22
22/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NE	7	-0.1	0.5	76	11	29
23/01/98	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	a	8	-0.2	1.1	93	14	25
24/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a	7	0.5	2.1	88	14	40
25/01/98	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	N	8	-0.8	0.8	76	22	43
26/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NE	1	-3	0.6	80	11	29
27/01/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	/	0	-3.9	0.4	86	7	22
28/01/98	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	E	7	-2.7	0.6	91	4	11

Annexe Vb : Exemple du tableau final de la base de données ainsi que les variables météorologiques encodées