



HAL
open science

Systemes d'aide à la décision pour le traitement des déchets industriels spéciaux

Bruno Debray

► **To cite this version:**

Bruno Debray. Systemes d'aide à la décision pour le traitement des déchets industriels spéciaux. Sciences de l'environnement. INSA de Lyon, 1997. Français. NNT : 97 ISAL 0058 . tel-00850534

HAL Id: tel-00850534

<https://theses.hal.science/tel-00850534>

Submitted on 7 Aug 2013

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

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

THÈSE

présentée

DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

FORMATION DOCTORALE : SCIENCES ET TECHNIQUES DU DECHET

par

Bruno Debray

(Ingénieur civil des mines)

**Systemes d'aide à la décision pour le traitement des
déchets industriels spéciaux.**

Soutenu le 01 juillet 1997 devant la Commission d'Examen

Jury :	Monsieur	Michel Jauzein	Rapporteur
	Monsieur	Robert Hausler	Rapporteur
	Monsieur	Christian Militon	
	Monsieur	Jacques Bourgois	
	Monsieur	Alain Navarro	
	Monsieur	Didier Graillet	

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du département Ingénierie de l'Environnement du centre SIMADE (Sciences de l'Informatique, des Mathématiques, de l'Aide à la Décision et de l'Environnement) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Je tiens avant tout à remercier Monsieur Didier Graillet, directeur de recherche, responsable du département ingénierie de l'environnement de m'avoir accueilli dans son équipe et d'avoir accepté de diriger mes travaux. Je lui dois une grande reconnaissance pour la confiance qu'il m'a accordée et pour le soutien dont il m'a gratifié.

Ma gratitude va aussi à Monsieur Alain Navarro, professeur à l'INSA de Lyon et directeur du LAEPSI, qui a co-dirigé cette thèse. Il a su me faire partager sa passion d'un domaine dont tout le monde mesure l'importance dans notre société mais qui demeure largement méconnu.

Je remercie aussi Monsieur Michel Jauzein, directeur de la recherche à l'I.R.H. Génie de l'Environnement à Nancy, et Monsieur Hausler, professeur au département de chimie de l'Université de Montréal, d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail.

Je tiens aussi à faire part de ma gratitude à Monsieur Christian Militon, responsable du département déchets industriels spéciaux à l'Ademe, pour son aide et pour le soutien financier dont a bénéficié ce travail.

Ma profonde reconnaissance va à Monsieur Jacques Bourgois, maître de recherche au département ingénierie de l'environnement de l'ENSMSE, pour son aide précieuse et amicale, pour le courage dont il a fait preuve lors de la relecture de ce document et pour ses conseils en chimie.

Je remercie enfin tous mes collègues du centre SIMADE grâce auxquels ces années de travail ont été des années agréables : Antoine et Laurent, qui ont supporté ma mauvaise humeur avec bienveillance et humour, Yacine, pour nos longues conversations, François, Philippe, Kary, Sophie et tous les jeunes chercheurs qui poursuivent leur quête avec abnégation, sans oublier Zahia, Liliane, et Bernadette, que ferions nous sans elles ?

Enfim Rose, Caroline et Marina, estrelas da minha vida. Vou lhe contar, os olhos ja não podem ver coisas que só o coração pode entender...

Résumé

Les déchets industriels spéciaux constituent une source potentielle de pollution importante. A ce titre il est nécessaire de les traiter en vue d'aboutir soit à une valorisation soit à un rejet éco-compatible et au stockage d'un déchet ultime. La mise en oeuvre pratique de ces traitements fait intervenir une grande variété de filières et de procédés suivant la nature et les caractéristiques du déchet. Le choix d'une solution de traitement est une opération délicate qui implique la connaissance de toutes les options disponibles et de leurs critères de choix.

Pour aider les producteurs de déchets, nous avons identifié dans deux contextes différents, les raisonnements et les données qui permettent d'aboutir à la liste des solutions applicables : centres et filières de traitement dans le cas du traitement externe, procédés de traitement et position dans l'unité productrice du déchet pour le traitement interne.

Ce travail méthodologique, dont l'objectif est la proposition d'outils pour aider les industriels dans le choix de solutions de traitement, a débouché sur deux systèmes informatiques d'aide à la décision :

- le premier pour l'orientation des déchets industriels spéciaux vers des solutions externes de traitement,
- le second pour l'identification de solutions de traitement interne pour les ateliers de traitement de surface.

A travers le développement de ces outils, nous avons pu mettre en évidence l'importance des systèmes d'identification et de caractérisation des déchets et proposer une méthode générale pour l'identification de solutions de traitement.

Mots clés :

Déchet industriel, déchet dangereux, traitement déchet, valorisation, aide décision, système expert, base de données.

Abstract

Decision support systems for hazardous wastes treatment

Hazardous wastes represent an important threat to the environment. A treatment is therefore necessary before their disposal. There is a large variety of techniques and facilities available, and the choice of the most appropriate solution is difficult. It involves a good knowledge of all the possibilities and of the decision criteria.

To help waste producers in the identification of treatment solutions, a study of the treatment techniques was undertaken. The distinction was made between on-site and off-site treatment. This study led to the definition of the parameters that must be taken into account for the choice of an appropriate solution.

These elements were used to develop two decision support systems for the selection of treatment solutions for hazardous wastes:

- the first one proposes off-site treatment solutions for any kind of hazardous waste,
- the second one is dedicated to the metal finishing industry for which on-site recycling or more conventional solutions are proposed.

Keywords :

Hazardous waste, solid waste, decision aid, waste treatment, recycling, database.

Sommaire

<i>Remerciements</i>	6
<i>Résumé</i>	7
<i>Abstract</i>	8
<i>Sommaire</i>	9
<i>Introduction générale</i>	15
<i>PREMIÈRE PARTIE : Des constats aux objectifs</i>	18
I Le système déchet	19
1) Un système multiforme	19
2) Définition du déchet	21
2.1) Approche réglementaire	21
2.2) Approche environnementale	22
2.3) Approche économique	22
2.4) Approche fonctionnelle	22
3) Typologie des déchets	24
4) Impacts et nuisances engendrés par les déchets spéciaux	26
4.1) Modes d'apparition de la pollution	27
4.2) Pollution des sols	28
5) "Valeur" contenue dans les déchets	29
5.1) Relation déchet matière-première	29
5.2) Production d'énergie à partir de déchets	30
6) Stratégies de gestion et filières de traitement	31
6.1) Stratégies de gestion des déchets	31
6.2) Traitement interne et traitement externe	33
6.3) Filières de traitement	33
6.4) Procédés de traitement	35
6.5) Centres de traitement	35

II Outils et sources d'information disponibles pour la gestion des déchets	51
1) Guides de choix et supports documentaires	52
1.1) Les catalogues de procédés de traitement et de technologies propres	52
1.2) Les guides réglementaires	54
1.3) Bilan des guides et catalogues	54
2) Systèmes informatiques	55
2.1) DECHAIDE : système d'aide à la décision pour l'élimination des déchets industriels spéciaux.	55
2.2) Autres outils appliqués au domaine des déchets	59
2.3) Bases découlant de l'étude des outils existants	61
 <i>DEUXIEME PARTIE : aide à la décision pour l'orientation des déchets spéciaux vers des centres collectifs de traitement</i>	 71
I Introduction	71
II Etapes de réalisation	71
III Spécification d'un outil d'aide à la décision pour le traitement externe des déchets	73
1) Fonction d'aide à la décision	73
2) Fonction d'information	73
3) Fonction d'archivage	74
IV Acquisition des connaissances : nature des raisonnements et des données	75
1) Spécification des entrées et sorties	75
1.1) Entrées	75
1.2) Sorties	76
2) Connaissance associée aux filières de traitement	78
2.1) Critères généraux de sélection	79
2.3) Nature et origine de l'information associée aux critères de sélection des filières	83
2.3) Critères spécifiques de sélection	84
2.4) Finalité des filières de traitement	84
2.5) Approche réglementaire	87
2.6) Modèles théoriques	94
3) Connaissance associée aux centres de traitement	98
3.1) Origine des données	98
3.2) Identification des déchets	98
3.3) Critères d'admission	99
3.4) Structure de données	100
4) Connaissance associée aux textes réglementaires	100
5) Proposition d'un système d'identification des déchets	101
6) Nature des liens entre les rubriques de la classification des déchets, les critères d'admission et les solutions de traitement	105

V Structure de l'outil	108
1) Choix d'un support informatique	108
2) Structure de données	108
2.3) Filières	109
2.4) Centres de traitement	109
2.5) Textes réglementaires	111
2.1) Systèmes d'identification	111
2.2) Paramètres de caractérisation	113
2.7) Seuils	114
2.8) Association entre les catégories de déchets et les solutions de traitement	114
3) Principe de fonctionnement du système d'aide à la décision	116
3.1) Identification du déchet	116
3.2) Sélection des filières candidates	117
3.3) Elimination des solutions incompatibles	118
3.4) Proposition des solutions	118
4) Implantation des connaissances et stratégie d'évolution	118
4.1) Ajout ou suppression d'une filière de traitement	119
4.2) Ajout ou suppression d'un centre de traitement	121
4.3) Répercussion des modifications de la classification des déchets	122
5) Validation et perspectives	122
5.1) Fonction de transfert	123
5.2) Approche environnementale	124
5.3) Extension des connaissances	124
5.4) Perspectives informatiques	124
V Exemple d'utilisation du système d'aide à la décision pour le traitement externe des déchets.	126
1) Identification du déchet.	126
2) Caractérisation	128
3) Résultat	131
4) Influence des données quantitatives sur le résultat	132
5) Mise à jour	133
VI Synthèse des structures et des fonctions du système	135
<i>TROISIEME PARTIE : Aide à la décision pour le traitement interne des déchets</i>	
<i>industriels spéciaux : application à l'industrie des traitements de surface.</i>	137
I Introduction	137
II Généralités sur le traitement interne	138
1) Notion de traitement interne	138
2) Motivations pour un traitement interne	140

3) Connaissance associée à la valorisation interne _____	141
4) Objectifs d'un système d'aide à la décision pour le traitement interne _____	141
III Exemple du traitement de surface et approche méthodologique du traitement interne _____	143
1) Choix du secteur d'application _____	143
2) Fonctions de traitement de surface et type de déchets générés. _____	144
3) Structure d'un atelier de traitement de surface par voie aqueuse _____	146
4) Contexte réglementaire _____	147
5) Procédés de traitement en vue d'un rejet éco-compatible _____	149
6) Avantages et inconvénients de la détoxification classique des effluents _____	152
7) Motivations pour l'implantation d'un procédé de valorisation _____	153
8) Stratégies de valorisation des déchets et effluents du traitement de surface _____	154
8.1) Régénération _____	155
8.2) Récupération _____	156
8.3) Recyclage _____	156
9) Procédés de valorisation de déchets et d'effluents de traitement de surface _____	157
10) Difficultés relatives à la formulation du problème et à la recherche d'une solution _____	159
IV Application : système d'aide à la décision pour le traitement interne des effluents et des déchets de l'industrie du traitement de surface _____	160
1) Spécifications fonctionnelles du système _____	160
1.1) Fonction de diagnostic _____	160
1.2) Fonction d'aide à la décision _____	161
1.3) Fonction d'information _____	162
2) Principes de raisonnement _____	162
2.1) Fonction de diagnostic _____	162
2.2) Aide à la décision _____	172
3) Exemple d'application _____	198
3.1) Diagnostic _____	198
3.2) Aide à la décision pour la détoxification classique des effluents _____	201
3.3) Aide à la décision pour la valorisation _____	202
3.4) Approche déductive _____	204
IV) Conclusions _____	207
<i>QUATRIEME PARTIE : Conclusions et perspectives</i> _____	208
I Conclusion générale _____	208
II Proposition d'une méthode générale pour l'identification de solutions de traitement de déchets industriels spéciaux. _____	211
<i>Annexes de la première partie</i> _____	216

ANNEXE I-1 : Critères de danger établis par la directive européenne 91/156 du 12 décembre 1991 et transposés en droit français par le décret 97-517 du 15 mai 1997	217
ANNEXE I-2 : Classes de qualité des cours d'eau suivant les teneurs en polluants qu'ils contiennent.	218
ANNEXE I-3 : Analyse détaillée des sources documentaires sur le traitement des déchets	219
ANNEXE I-4 : Les modèles de décision	225
<i>Annexes de la deuxième partie</i>	228
ANNEXE II-1 : Liste des centres de traitement	229
ANNEXE II-2 : Filières de traitement	236
1) Filières d'élimination	236
1.1) Traitements physico-chimiques	236
1.2) Filières thermiques	239
1.3) Stockage	240
1.5) Autres filières d'élimination	241
2) Filières de valorisation	241
ANNEXE II-3 : Sources réglementaires nationales, seuils de rejet	245
ANNEXE II-4 : Sources réglementaires nationales : nature et caractéristiques des déchets admissibles	250
ANNEXE II-5 : Exemples de seuils réglementaires de rejet en sortie de centre de traitement de déchets^[R.E.C.O.R.D. 94]	258
ANNEXE II-6 : Information concernant les déchets admissibles contenue dans les arrêtés de classement des centres	262
ANNEXE II-7 : Approche théorique des procédés de traitement des déchets, exemple de l'incinération et de la régénération de solvants	270
1) Incinération	270
2) Régénération de solvants	274
ANNEXE II-8 : Classification arborescente des déchets implantée dans l'outil d'aide à la décision	282
<i>Annexes de la troisième partie</i>	290
ANNEXE III-1 : fonctions de traitement de surface prises en compte	290
ANNEXE III-2 : Procédés de valorisation des effluents de traitement de surface.	292
1) Electrolyse	292

2) Résines échangeuses d'ions	296
3) Cristallisation	298
4) Electro dialyse	299
5) Electrolyse à membrane	301
6) Osmose inverse	302
7) Filtration liquide solide	303
8) Micro, ultra et nano filtration	304
9) Cémentation	304
10) Evaporation	305
<i>Références bibliographiques</i>	306
<i>Références réglementaires</i>	311
<i>Liste des figures</i>	315
<i>Liste des tableaux</i>	317

Introduction générale

Toute activité tendant à n'utiliser que la partie noble de la matière à des fins de production ou de consommation se traduit par le rejet de la partie moins noble. On parle alors de **déchet**.

Pendant de nombreuses années, on a cru qu'il suffisait de stocker cette matière à l'écart pour qu'elle disparaisse définitivement. Hélas, c'était sans compter avec l'environnement au sein duquel des phénomènes incessants de natures chimique, biologique, voire météorologique finissent par entraîner et transformer le déchet ou certains de ses composants. Les plus nocifs d'entre eux ont alors un effet négatif sur l'homme ou l'environnement lui-même. Le déchet se retrouve alors au rang des accusés : **il pollue**.

Récemment, l'homme a aussi pris conscience du caractère limité de ses ressources. L'énergie, mais aussi les matières premières ne sont pas inépuisables. Alors les soupçons se tournent à nouveau vers le déchet. Deuxième chef d'accusation : **il serait responsable d'une bonne partie du gaspillage**.

De ces deux délits sont nées bien des réactions passionnelles mais aussi des actions visant à réduire le caractère polluant de nos rejets ou à récupérer une partie de la matière ou de

l'énergie qu'ils contiennent. Traitement de détoxification et valorisation sont donc (ou devraient être) maintenant les principales solutions envisagées pour nos déchets. De nombreux chercheurs ont travaillé sur le sujet, de nombreux procédés ont été inventés ou adaptés, de nombreuses entreprises ont été créées en vue du traitement des déchets, tant et si bien que le producteur de déchets a maintenant ... **l'embarras du choix**.

Le but de cette thèse est de tenter de le tirer de cet embarras ou du moins d'imaginer des méthodes et des outils qui lui permettront d'en sortir.

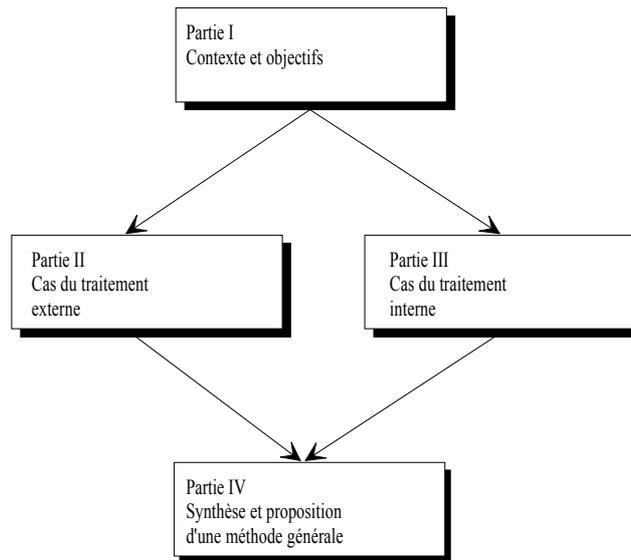
Nous nous intéresserons ici exclusivement aux déchets industriels, et plus particulièrement à une catégorie d'entre eux : **les déchets industriels spéciaux**. Bien qu'il ne représentent pas le tonnage le plus important, ces déchets constituent la menace la plus lourde pour l'environnement en raison de leur caractère toxique ou dangereux. De nature et de composition très diverses, ils constituent aussi la catégorie de déchets pour laquelle l'éventail des solutions est le plus large, et donc aussi celle pour laquelle le choix d'une solution devrait être le plus difficile.

Dans la première partie, nous allons essayer de préciser le contexte et les objectifs de notre travail en tentant particulièrement de faire ressortir les besoins en termes d'outils d'aide à la décision. Nous nous intéresserons à ce qui motive le traitement des déchets mais aussi aux contraintes qui pèsent sur lui. Nous en tirerons alors les principaux critères qui devraient présider au choix d'une méthode de traitement. Nous essayerons de faire ressortir les lacunes qui rendent le choix d'une filière difficile. Après avoir examiné les réponses apportées par d'autres auteurs à cette question, nous pourrions établir précisément les objectifs de notre travail de développement.

Dans la deuxième et la troisième partie, nous décrirons deux méthodes d'aide à la décision pour le traitement de déchets industriels spéciaux répondant à des objectifs différents. La première, développée en collaboration avec l'Ademe a permis d'aboutir à un système d'information pour la caractérisation des déchets industriels spéciaux et leur orientation vers de centres collectifs de traitement. La seconde conclut sur un outil destiné aux industriels du traitement de surfaces qui propose des solutions de valorisation ou d'élimination à mettre en oeuvre au sein même de l'entreprise productrice du déchet. Ces deux outils tentent de couvrir

deux aspects complémentaires du traitement des déchets : le traitement interne et le traitement externe, aussi bien pour la valorisation que pour l'élimination.

Dans la quatrième partie, nous ferons la synthèse des résultats précédents pour proposer une méthode générale pour l'identification de solutions de traitement de déchets industriels spéciaux et nous tirerons les conclusions de ce travail.



Plan schématique de la thèse

PREMIÈRE PARTIE : Des constats aux objectifs

La présentation des méthodes utilisées et développées dans ce travail nécessite tout d'abord d'identifier précisément la nature des déchets auxquels nous nous sommes intéressés, les stratégies envisageables pour le traitement de ces déchets et les critères qui gouvernent au choix de ces stratégies, suivant les différents acteurs concernés, producteurs de déchets, administration. Nous verrons alors en quels termes se pose le problème du choix parmi les nombreuses possibilités de traitement des déchets et pourquoi il serait intéressant de disposer d'un outil qui faciliterait la prise de décision.

Nous nous intéresserons ensuite aux outils d'aide à la décision déjà existants dans ce domaine afin d'examiner leur adéquation par rapport au problème de choix formalisé précédemment. Nous examinerons enfin les différents logiciels d'aide à la décision, auxquels nous pouvons faire appel pour atteindre les objectifs qui découlent de ce premier travail d'analyse.

I Le système déchet

1) Un système multiforme

Le déchet se situe dans nos sociétés au croisement de plusieurs systèmes^[Harpet 96]. Suivant le point de vue que l'on adopte, il se couvre de qualités ou de défauts apparemment contradictoires qui appellent des comportements qui ne le sont pas moins. Il est au départ chargé d'une signification symbolique péjorative, rebut, part méprisable et méprisée, il n'appelle pas à l'attention. C'est ce caractère qui peut encore justifier certains comportements ou plutôt certains étonnements de nos contemporains devant tant de lois et tant d'obligations envers les déchets.

Le déchet est ensuite une nuisance. Immédiate lorsqu'il s'agit de l'odeur des déchets ménagers, elle se fait plus insidieuse, et donc plus sujette à "fantasmes", lorsqu'il s'agit de la pollution générée par les déchets toxiques ou radioactifs. Lorsque cette nuisance, causée ou non par une pollution effective, devient trop forte, le déchet occupe le devant de la scène. Le public souhaite alors sa disparition totale de son univers, l'intervention massive de la loi, au risque parfois de créer des contraintes telles qu'il devient impossible de ne pas les enfreindre.

Au delà de la nuisance, le déchet peut provoquer un impact sur l'environnement soit du fait de son rejet ou des rejets liés à son traitement, soit, plus indirectement, par l'impact que provoque l'exploitation des matières et de l'énergie dont il est composé s'il n'est pas valorisé. Parfois extrêmement difficiles à évaluer, ces impacts sont pourtant une des justifications principales aux différents traitements envisagés.

Le déchet est aussi un enjeu économique. Pour le producteur de déchet ou le particulier, c'est d'abord un coût, souvent insupportable. C'est aussi, pour les entreprises chargées de son traitement une "manne" considérable. Enfin, parce qu'il est constitué de matière et d'énergie, le déchet peut se révéler être un gisement qu'il faudrait savoir exploiter pour en tirer profit. Cette valeur économique du déchet se traduit par une nouvelle difficulté. Le déchet change parfois de statut pour devenir un produit à valeur marchande. Il prend pignon sur rue.

Enfin, le caractère complexe du déchet, sa grande variété et son évolutivité le placent dans une catégorie à part sur le plan scientifique et technique. Traiter du déchet oblige en effet à s'intéresser à un grand nombre de disciplines scientifiques : physique, chimie, biologie, statistique ou encore calcul économique.

Face à cet ensemble de caractéristiques, de comportements et d'intérêts contradictoires, le législateur et les pouvoirs publics doivent établir des règles justifiées et applicables, des règles qui permettent de décider ce qui est déchet et ce qui ne l'est pas, des règles qui définissent ce qu'il faut faire et ce qu'il ne faut pas faire, des règles aussi qui établissent qui doit se préoccuper des déchets. Enfin, ils doivent veiller à ce que ces règles soient appliquées.

On peut le constater, la nature même du déchet rendra toute décision à son égard délicate. Il s'agit en effet de concilier environnement et économie, passionnel et rationnel, hypermédiatisation et indifférence. Parce qu'elle est censée représenter le point de vue de la nation et des êtres qui la composent, la loi devrait être le référentiel le plus sûr. Cependant pour le législateur lui-même, il peut être très difficile d'établir des règles cohérentes, soit parce que les intérêts qu'il doit concilier sont contradictoires, soit parce que les références scientifiques ou éthiques sur lesquelles s'appuyer ne sont pas encore établies avec précision. La loi est bien souvent une information nécessaire mais non suffisante pour prendre une décision en matière de traitement des déchets.

Dans ce contexte, on comprend mieux le besoin qu'il peut y avoir d'outils d'aide à la décision, mais on mesure aussi l'ampleur de la tâche et la prétention qu'il y aurait à vouloir couvrir tous les champs. Il nous faudra donc cerner précisément nos objectifs en admettant dès le départ qu'un outil ne peut prétendre répondre à toutes les questions mais peut apporter des références utiles aux décisions dans certains contextes bien précis. En faisant la synthèse de connaissances du domaine, il peut aussi contribuer à la réflexion générale sur le traitement des déchets.

2) Définition du déchet

A l'origine de toute mesure particulière visant les déchets, il y a l'hypothèse que la notion même de déchet peut être définie. Or la plupart des auteurs s'accordent à dire qu'il n'existe pour le moment aucune définition satisfaisante du déchet^{[Leroy 94],[Galaup 96],[London 96]}. En effet, suivant les acteurs impliqués et le contexte auquel on se réfère, la notion de déchet peut viser des objets de nature et de fonctions différentes.

Pour éviter les malentendus, les différents acteurs impliqués dans la gestion de l'environnement ont tenté de donner une définition au mot déchet. Il existe en réalité plusieurs définitions qui correspondent chacune à un objectif particulier. Chaque définition vise pour un groupe d'acteur à établir l'ensemble des objets qui devront faire l'objet d'un comportement particulier ou d'une attention particulière, mais c'est en dernier lieu la définition légale qui devra servir de référence.

2.1) Approche réglementaire

Pour le législateur, il s'agissait avant tout de réglementer le traitement des déchets en interdisant le rejet dans l'environnement ou la revente en vue d'échapper aux obligations légales. Il fallait donc pouvoir définir de manière exacte ce qui entrait dans le cadre de la loi. En France, deux définitions peuvent être considérées : la définition issue de la législation nationale et celle provenant de la réglementation européenne.

La loi française du 15 juillet 1975 définit le déchet comme « *tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon* ». Il est courant de dire que pour le législateur Français, « c'est l'intention qui fait le déchet », puisque la notion d'abandon ou d'intention d'abandon est au centre de la définition. Cette notion d'abandon étant très subjective, elle se traduit par des litiges, notamment dans le cas de stockages internes de déchets dont le producteur peut prétendre ne pas souhaiter se défaire.

La directive européenne du 18 mars 1991 modifiant celle de 1975 considère comme déchet « toute substance ou tout objet figurant à l'annexe I dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ». Elle est donc plus restrictive que la définition française, puisqu'une matière abandonnée ne figurant pas à l'annexe I ne constitue pas un déchet.

2.2) Approche environnementale

Du point de vue de l'environnement, un déchet constitue une menace à partir du moment où l'on envisage un contact avec l'environnement. Ce contact peut être direct ou le résultat d'un traitement. Historiquement, du fait de la prédominance de la filière enfouissement technique durant de nombreuses années, on considérait ce contact comme inéluctable. Plusieurs définitions mettent ainsi en avant la composition du déchet comme critère d'identification (comme l'indique la directive européenne du 18 mars 1991). Cette approche peut conduire à considérer des sous-produits de nature dangereuse ou contenant des polluants comme des déchets indépendamment de leur valeur ou de leur possible réutilisation.

2.3) Approche économique

Sur le plan économique, un déchet est une matière ou un objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur à un moment et dans un lieu donné^[Maystre 94]. Cette définition exclut une bonne part des déchets recyclables, qui possèdent une valeur économique, même faible. Certaines entreprises peuvent ainsi être tentées de faire passer certains déchets pour des sous-produits pour les soustraire à la loi.

2.4) Approche fonctionnelle

Enfin, on peut choisir d'adopter pour le déchet une approche plus "fonctionnelle" illustrée par la figure I-1. Dans ce cadre, le déchet est considéré comme un flux de matière issu d'une unité fonctionnelle, celle-ci représentant une activité ou un ensemble d'activité.

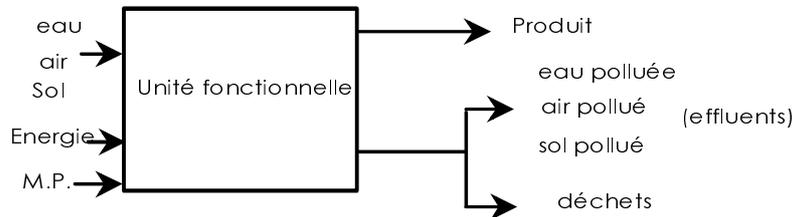


Figure I-1 : définition fonctionnelle des déchets

En entrée de l'unité fonctionnelle, on peut identifier plusieurs flux : matières premières, énergie et éléments de l'environnement : eau, air, sol. Les flux en sortie sont constitués par les produits et les résidus. Les produits correspondent, de la manière la plus générale aux résultats recherchés dans le cadre de l'unité fonctionnelle. Il peut s'agir de résultats matériels (objet, matière, énergie) ou immatériels (déplacement, information, alimentation, loisir...).

Les résidus sont eux composés des résultats non recherchés. Certains auteurs parlent de sorties désirables ("desirable outputs") et indésirables ("undesirable outputs")^[Tyteca 94]. Parmi ces résultats non désirés, on retrouve les éléments du milieu naturel transformés par l'activité. On parle alors des effluents, des nuisances (bruit), de l'énergie (pertes énergétiques) et des déchets qui correspondent à l'ensemble des éléments matériels non assimilables directement avec les éléments du milieu naturel.

On constate immédiatement que la frontière entre déchet et effluent peut être tout à fait arbitraire. Elle dépend en effet des limites que l'on choisit au delà desquelles le flux ne peut plus être assimilé à un élément du milieu naturel. En général, les opérations associées au flux détermineront s'il s'agit d'un effluent ou d'un déchet. On parle d'effluent dans le cas d'un rejet en continu après un éventuel traitement, de déchet dans le cas d'un rejet discontinu. Cette distinction entre effluent et déchet peut se révéler importante sur le plan pratique dans la mesure où les contraintes réglementaires ne sont pas les mêmes pour les deux types de rejets. Cependant un effluent peut se transformer en déchet à l'issue d'une décision de traitement.

Inversement, le traitement d'un déchet se traduit presque toujours par le rejet d'un effluent qui constitue en fait une partie du déchet initial.

Dans le cadre de ce travail, nous adopterons la définition fonctionnelle du déchet en l'étendant aux effluents liquides dans la dernière partie qui concerne le traitement interne.

Il nous faut maintenant préciser la notion de déchet industriel spécial. Nous allons pour cela le situer parmi les différentes catégories qui forment la typologie des déchets.

3) Typologie des déchets

Une première approche nous amène bien sûr à distinguer les déchets en fonction de leur nature physique : solides, liquides, gazeux. Même si de nombreux raisonnements sont applicables aux trois catégories de déchets, nous ne traiterons pas le cas des déchets gazeux, qui font souvent l'objet de traitement spéciaux et ne sont pas explicitement visés par de nombreuses dispositions réglementaires concernant les déchets.

Il est courant de distinguer les déchets suivant leur origine :

- déchets urbains, qui regroupent les ordures ménagères et les déchets des municipalités
- déchets industriels,
- déchets agricoles.

Cette distinction se traduit au plan réglementaire par une répartition des responsabilités. La gestion des déchets urbains revient aux communes alors que celle des déchets industriels est sous la responsabilité directe du producteur. (loi du 15 juillet 1975 révisée)

On peut ensuite distinguer les déchets suivant la nature du danger qu'ils font courir à l'environnement :

- déchets inertes, dont l'effet sur l'environnement est négligeable;
- déchets banals, assimilables aux ordures ménagères;
- déchets spéciaux, qui peuvent représenter un danger direct ou indirect pour l'homme ou l'environnement.

[A cette liste, il faudrait encore ajouter les déchets radioactifs. Le caractère très particulier de ces déchets en fait véritablement une catégorie à part soumise à un contrôle spécifique et destinée à des

filières d'élimination très particulières. Pour ces raisons, nous ne les examinerons pas dans le cadre de ce travail.]

La loi du 13 juillet 1992 a introduit le concept de déchet industriel spécial dans l'article 2-1 qui stipule que « *les déchets industriels spéciaux, figurant en raison de leurs propriétés dangereuses sur une liste fixée par décret en Conseil d'État, ne peuvent pas être déposés dans des installations de stockage recevant d'autres déchets. [...]* ». La liste des déchets spéciaux a été précisée par le décret 95-517 du 15 mai 1997 relatif à la classification des déchets dangereux. Dans ce texte, les déchets spéciaux sont considérés, en théorie, comme un sous ensemble des déchets dangereux. En pratique, tous les déchets énumérés en annexe du décret sont à la fois des déchets spéciaux et des déchets dangereux. Leur appartenance à ces catégories est justifiée par le fait qu'ils présentent au moins l'une des propriétés dangereuses listées en annexe I du décret (cf. annexe I-1 de ce mémoire). Ce décret récent prévoit l'établissement dans un futur proche de critères et méthodes d'évaluation des propriétés de dangers qui justifient l'inscription d'un déchet sur la liste des déchets dangereux.

Établir qu'un déchet est spécial est important sur le plan pratique puisque c'est ce qui détermine s'il est nécessaire d'entreprendre un traitement particulier, souvent coûteux, ou bien si l'on peut se contenter de traiter le déchet dans une installation réservée aux ordures ménagères ou assimilées (déchets banals) ou même de le stocker dans une décharge réservée aux déchets inertes.

Les déchets industriels spéciaux auxquels nous nous intéressons représentaient en France 7 millions de tonnes en 1990^[Geldron 95].

Un dernier mode de classification fait intervenir la position du déchet dans le processus de traitement, comme l'illustre la figure I-2. On distingue alors les déchets :

- primaires, déchets avant traitement,
- intermédiaires, ce sont les déchets issus du traitement d'un déchet ou d'un effluent,
- ultimes, dernier maillon de la chaîne de traitement.

La notion de déchet ultime a été aussi introduite par la loi du 13 juillet 1992. Elle y est définie à l'article premier :

« Est ultime au sens de la présente loi un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. »

Le déchet ultime constitue une référence importante pour le traitement. En effet, la loi du 13 juillet 1992 (article 2-1) stipule qu'à partir de 2002, seuls les déchets ultimes seront admis dans les sites de stockage.

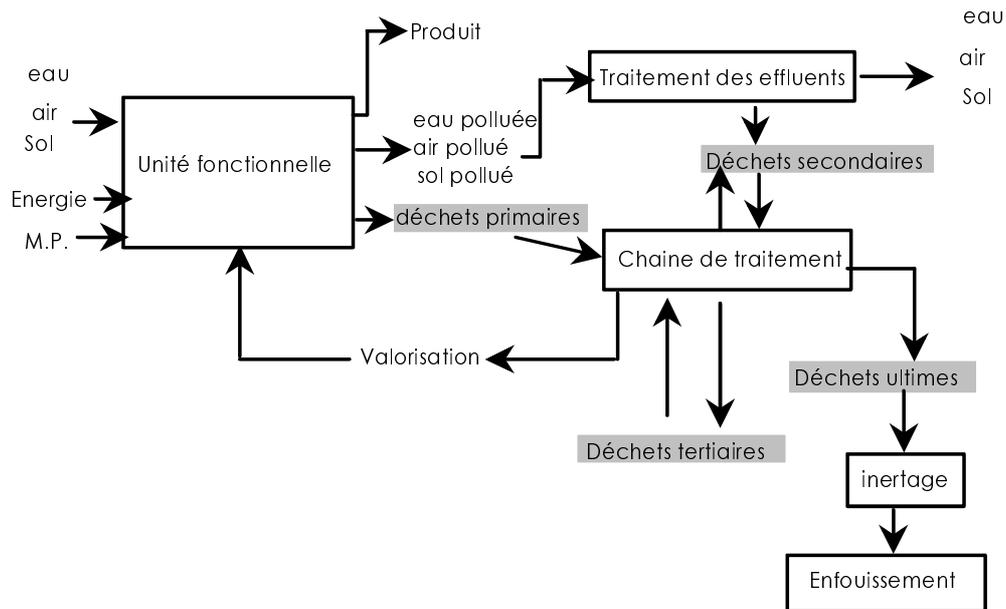


Figure I-2 : cycle de vie du déchet

Après nous être intéressés à ce que sont les déchets industriels spéciaux, nous allons rapidement rappeler les raisons pour lesquelles il est nécessaire de les traiter.

4) Impacts et nuisances engendrés par les déchets spéciaux

Les déchets, leur abandon ou leur traitement peuvent entraîner deux types de phénomènes :

- des nuisances dont le caractère est essentiellement subjectif et lié à la perception du public,
- des impacts qui peuvent se caractériser par une mesure de pollution ou de coût par exemple.

Les nuisances associées aux déchets sont de natures différentes : nuisances olfactives, nuisances esthétiques, nuisances sonores résultant du traitement. Bien qu'elles puissent jouer

dans certains cas un rôle important dans l'acceptation d'une unité de traitement par la population, elles sont placées au second rang quand il s'agit des déchets spéciaux, pour lesquels l'impact lié aux effets toxiques et écotoxiques du déchet ou des rejets résultant de son traitement est plus préoccupant. Les déchets spéciaux peuvent aussi présenter un caractère dangereux du fait de leur propriétés physico-chimiques tels que l'explosivité ou l'inflammabilité (voir annexe I-1).

4.1) Modes d'apparition de la pollution

Le transfert de pollution du déchet vers le milieu naturel peut avoir lieu dans les circonstances suivantes :

- rejet direct dans l'environnement
- stockage temporaire
- transport
- stockage définitif
- traitement

Ce transfert peut être accidentel, dans le cas du transport par exemple, ou chronique. Dans le cas d'une pollution consciente, l'objectif est de la maîtriser afin d'en diminuer l'impact. Dans le cas d'une pollution inconsciente liée par exemple au rejet d'effluents pollués, une première étape de diagnostic est nécessaire. Elle doit mettre en évidence le caractère nocif de l'action à l'origine de la pollution.

Les milieux concernés par la pollution sont le sol, l'air et les milieux aquatiques. Les conséquences des pollutions sont variées. Elles peuvent être de type sanitaire, liées à la contamination des ressources en eau ou de l'alimentation d'une population, écologique, lorsqu'elles se traduisent par une modification sensible d'un écosystème, esthétiques, agricoles, ou même industrielles si la pollution entraîne une limitation de l'usage de l'eau à des fins industrielles (industries agro-alimentaires, par exemple) ^[Gaujous 93]. Elles sont difficiles à évaluer quantitativement dans la mesure où elles sont dues en partie à des rejets non contrôlés. D'autre part, si les flux de certains polluants peuvent être estimés, il n'est pas toujours évident de lier cette estimation à un effet sur le milieu naturel ou l'environnement. On peut cependant faire la relation entre les quantités de polluants rejetés dans l'environnement et les

concentrations dans les milieux aquatiques, celles-ci ayant des conséquences directes sur la qualité des eaux et l'activité biologique qu'elles abritent.

La campagne de mesure de la qualité des eaux du bassin Loire-Bretagne effectuée en 1991^[AFB-LB 92] a montré que 72% des rivières du bassin étaient classées en catégorie 2 ou supérieure (c'est-à-dire impropre à la baignade et à la reproduction normale de la faune et de la flore aquatique), dont 28% en catégories 3 et hors catégorie (impropres à toutes les utilisations autres que la navigation et à la survie de la faune aquatique (cf. annexe I-2)) . L'essentiel de cette pollution est de nature organique, d'origine urbaine. Cependant, cette même étude révèle que sur 50 points de mesure, 6 sites présentent des pollutions importantes dues aux métaux lourds (mesurées sur la flore aquatique) et 13 sites une pollution certaine. **Ces chiffres montrent l'impact que peuvent avoir les rejets industriels sur l'état des cours d'eau.**

4.2) Pollution des sols

Le ministère de l'environnement publie régulièrement un inventaire des sites pollués. Cet inventaire recense les sites présentant les pollutions les plus notables, pour lesquels une étude doit être entreprise en priorité. En 1994, le nombre de ces sites était de 669^[Min.Env 94]. Parmi eux on comptait 255 anciennes décharges de déchets industriels spéciaux éventuellement mélangés à d'autres types de déchets, 129 dépôts de déchets ou de substances polluantes et 357 sols ou nappes pollués par des retombées, des infiltrations ou des déversements de substances polluantes, soit plus de la moitié de sites pollués en raison d'une mauvaise gestion de déchets ou d'effluents. Le fait qu'un site soit pollué n'implique pas nécessairement qu'il représente un danger direct pour l'environnement. Les 669 sites inventoriés doivent maintenant faire l'objet d'études complémentaires pour déterminer la nature des risques qu'ils font encourir à l'environnement humain et naturel^[BRGM 95]. L'étude des premiers cas fait cependant apparaître des contaminations de ressources d'eaux souterraines utilisées parfois en alimentation en eau potable, des dangers d'incendies ou d'explosions pour des sites contaminés par des produits organiques dont certains sont accessibles aisément, donc dangereux.

Au delà de l'impact de ces pollutions sur l'environnement, il faut aussi s'intéresser au coût de réhabilitation des sites. En 1993 l'Ademe a engagé des actions de dépollution pour un montant global proche de 70 millions de francs.^[ADEME 94]

5) "Valeur" contenue dans les déchets

Au cours des dernières années, il est apparu que les déchets constituent un gisement considérable de matières premières et d'énergie. Cependant, l'exploitation de ce gisement nécessite la mise en oeuvre de techniques souvent coûteuses dont la compétitivité économique vis-à-vis de l'utilisation de matières premières neuves peut être faible. Bien que la valorisation soit devenue officiellement une priorité depuis la loi du 13 juillet 1992, la faible réceptivité du milieu industriel aux techniques de valorisation montre à quel point il n'est pas encore évident que le déchet soit considéré comme un gisement qu'il faut exploiter. Ceci est dû en partie au fait que les objectifs de la valorisation ne sont pas toujours bien identifiés. Avant de nous intéresser aux stratégies de gestion des déchets que l'on peut mettre en oeuvre, nous allons examiner en quoi les déchets présentent un potentiel pour la valorisation. Différents points de vue, suivant lesquels le déchet peut représenter une valeur effective ou au contraire une contrainte, sont à considérer.

5.1) Relation déchet matière-première

Une analyse effectuée par l'ANRED^[Gardais 90] estime à environ 530 t/an la quantité de chrome rejeté dans les déchets industriels. Pour le cuivre, ce sont 44 t/an qui partent en déchets, tout comme 108 t/an d'hydrocarbures. Ces chiffres montrent à quel point l'élimination des déchets sans valorisation peut se traduire par une perte conséquente de matière première. Le fait de disposer de cette matière première a des conséquences à différents niveaux :

Au niveau de l'entreprise utilisatrice de la matière il s'agit :

- de réduire les achats de matières premières neuves

- de réaliser des économies d'énergies par la mise en oeuvre de matière première secondaire. Un exemple pour le verre est indiqué dans la figure I-3 ^[Navarro 95] pour lequel l'énergie E_4 à mettre en oeuvre pour obtenir du verre fondu à partir du calcin (déchet en verre) est inférieure à celle (E_1) nécessaire pour obtenir du verre à partir des matières premières initiales.
- d'éviter un traitement d'élimination coûteux pour le déchet.

Dans les trois cas considérés, des économies financières peuvent être obtenues. Elles ne sont cependant pas certaines et de nombreux exemples montrent même qu'il est souvent plus coûteux de récupérer une matière première à partir d'un déchet que d'utiliser une matière première neuve.

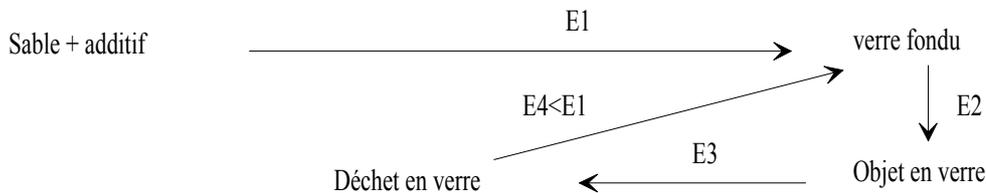


Figure I-3 : cycle énergétique du verre^[Navarro 95]

Du point de vue global la valorisation des déchets peut permettre de :

- préserver les ressources correspondantes. Ceci se traduit par une disponibilité des ressources à plus long terme, mais aussi par une diminution des atteintes à l'environnement associées à l'exploitation de ces ressources. Là encore, le gain n'est pas nécessairement positif lorsqu'il s'agit de matières premières abondantes ou renouvelables ou lorsque les techniques de collecte et de valorisation se révèlent polluantes.
- éviter des atteintes à l'environnement du fait d'un traitement classique du déchet. Ceci n'est effectif que si la technique de valorisation n'est pas trop polluante.

5.2) Production d'énergie à partir de déchets

On a évoqué précisément les économies potentielles d'énergie liées à l'utilisation des déchets comme matière première de substitution. On peut aussi exploiter le contenu énergétique des déchets (organiques) en les utilisant comme combustibles. Ceci se traduit par une préservation des ressources énergétiques d'un point de vue global et par une éventuelle économie financière au niveau local, à condition que les traitements destinés à compenser les pollutions induites par l'utilisation des déchets comme combustible ne soient pas trop coûteux.

On peut donc estimer que les déchets représentent un gisement potentiel de valeur, tant par leur contenu énergétique que par leur contenu en matières premières. Cependant, cette valeur peut se manifester à différents niveaux, local (de l'entreprise), national, global. Si la nécessité de s'intéresser à la valeur contenue dans le déchet semble évidente, les objectifs poursuivis peuvent être très différents, voire contradictoires, suivant les points de vue (économie, protection de la nature, préservation des ressources).

6) Stratégies de gestion et filières de traitement

Après avoir rappelé les principaux objectifs poursuivis à travers le traitement des déchets :

- minimiser les nuisances et les impacts associés aux déchets,
- exploiter la valeur contenue dans ces déchets,

il s'agit de déterminer quelles sont les possibilités qui s'offrent aux producteurs de déchets pour atteindre ces objectifs.

6.1) Stratégies de gestion des déchets

Alain Navarro^[Navarro 94] a identifié cinq stratégies de gestion des déchets :

Arrêt de la production. C'est la stratégie la plus radicale, qui consiste à ne plus produire un produit constituant en fin de vie un déchet difficilement éliminable ou entraînant lors de sa production la génération de déchets difficilement éliminables. C'est la stratégie qui a été

choisie pour les CFC et les PCB par exemple. La contrepartie de cette stratégie est la recherche de produits de substitution.

Optimisation et innovation technologique en vue de réduire les quantités de déchets produits et leur toxicité. Cette stratégie est couramment assimilée au moyen employé pour la mettre en oeuvre : les technologies propres. C'est ici la recherche de procédés de substitution qui constitue le goulot d'étranglement.

Mise en oeuvre d'une politique de recyclage, de valorisation et de réutilisation des déchets de la production et de la consommation (que nous désignerons plus simplement sous le nom de valorisation). La difficulté consiste à trouver des procédés de transformation des déchets et des débouchés pour les matières issues de la valorisation.

Rejet "écocompatible" des déchets. Il s'agit de retenir et concentrer la pollution afin de pouvoir rejeter un effluent dépollué vers l'environnement (rejet écocompatible) et stocker un déchet ultime.

Stockage. Le stockage ne constitue pas une stratégie à proprement parler. Il s'agit de la dernière étape de tout traitement débouchant sur un déchet ultime auquel il faut bien trouver un exutoire.

On peut répartir ces cinq stratégies en deux catégories : les stratégies préventives (arrêt de la production et innovation) et les stratégies curatives (valorisation, rejet écocompatible, stockage), ces dernières étant désignées habituellement par le mot traitement. Dans ce mémoire, nous nous intéresserons uniquement aux stratégies curatives.

Les cinq stratégies ne constituent pas intrinsèquement des solutions au problème des déchets. Ce n'est qu'en les confrontant aux deux objectifs :

- réduction des nuisances et des impacts,
- diminution des pertes de valeur,

que l'on peut établir véritablement leur pertinence. Ainsi, l'arrêt de la production peut se révéler négatif si le produit de substitution ou l'absence de la fonction remplie anciennement par le produit entraînent des effets négatifs imprévus sur l'environnement.

Tout en considérant qu'il est nécessaire de prendre en compte les performances effectives de la solution technique mise en oeuvre dans le cadre d'une stratégie et que la résolution d'un problème de déchets peut faire intervenir plusieurs stratégies, on peut néanmoins établir une hiérarchie fondée sur les potentialités de chacune d'entre elles. Ainsi, les deux stratégies

préventives offrent-elles la possibilité de réduire les impacts et d'éviter la perte de valeur due au rejet du déchet. La stratégie de valorisation, à condition d'avoir défini ses objectifs de manière cohérente et de la mener dans le respect des contraintes environnementales, peut aussi permettre d'atteindre les deux buts. En revanche, le rejet écoresponsable et le stockage n'ont aucun effet positif sur la limitation des pertes. Enfin le stockage, même s'il est pratiqué selon les règles, ne constitue pas intrinsèquement une action en faveur de la réduction des impacts.

6.2) *Traitement interne et traitement externe*

Les stratégies préventives (arrêt de la production et optimisation) ne peuvent être mises en place qu'au sein de l'entreprise productrice du déchet visé. Pour les stratégies de traitement, deux possibilités existent : une mise en oeuvre directement par le producteur de déchet, on parle alors de traitement interne, ou le recours à une entreprise spécialisée dans le traitement des déchets, auquel cas on parle de traitement externe. Les deux modes de traitement concernent en France des quantités de déchets équivalentes^[ADEME 95].

Le traitement interne a l'avantage de limiter les transports de déchets. Cependant, la maîtrise d'une installation de traitement requiert parfois des compétences que les petites entreprises ne possèdent pas nécessairement. Ceci se traduit par un mauvais fonctionnement des installations et un problème de pollution chronique qui pourrait être évité par un recours au traitement externe.

Enfin, dans le cas des grandes entreprises (pétrochimie, sidérurgie...), les installations de traitement interne peuvent être assimilées à des installations de traitement externe étant donné les quantités importantes de déchets qu'elles reçoivent et la provenance de ces déchets issus parfois d'usines éloignées.

Les questions que se pose un producteur de déchets ne sont pas les mêmes suivant qu'il envisage une solution externe ou interne. Dans le premier cas, il cherchera principalement à savoir où faire traiter le déchet produit alors que, dans l'autre cas, il devra identifier comment le traiter.

6.3) *Filières de traitement*

Les stratégies de traitement (valorisation, rejet écoresponsable, stockage) sont mises en oeuvre de manière concrète à travers ce que l'on appelle des filières de traitement. A l'origine, la

notion de filière désigne un enchaînement d'opérations. Dans le domaine du traitement des déchets, il s'agit de l'ensemble des opérations à mettre en oeuvre pour aboutir aux résultats souhaités : valorisation du déchet et/ou rejet éco-compatible d'effluents dépollués et/ou stockage d'un déchet ultime. Il existe plusieurs classifications des filières selon les critères suivants :

- nature du déchet traité (ex : huiles solubles),
- procédé principal mis en oeuvre (ex : évapo-incinération),
- objectif du traitement (ex : valorisation thermique),

Alain Navarro^[Navarro 94] a ainsi proposé une classification des filières à plusieurs niveaux (tableau I-1) qui fait essentiellement apparaître les objectifs du traitement et la nature du déchet visé.

A) Valorisation énergétique	D) Valorisation en agriculture et agro-alimentaire
1- Combustion avec récupération d'énergie	12- Amendement organique
2- Élaboration de combustibles dérivés par des procédés mécaniques	13- Amendement minéral
3- Élaboration de combustibles dérivés par des procédés thermiques	14- Alimentation pour animaux
4- Élaboration de combustibles dérivés par des procédés biologiques	
	E) Valorisation en science de l'environnement
B) Valorisation matière première	15- Traitement des effluents pollués liquides ou gazeux
5- Matières premières organiques naturelles ou artificielles	16- Solidification ou stabilisation des déchets toxiques
6- Matières premières minérales métalliques ou non métalliques	
	F) Élimination
C) Valorisation en science des matériaux	17- Incinération
7- Liants hydrauliques et matériaux de structure	18- Traitement biologique des déchets
8- Verres et céramiques	19- Traitements physico-chimiques
9- Plastiques et caoutchouc	20- Mise en décharge
10- Fibres cellulosiques de récupération	
11- Autres	

Tableau I-1 : Classification des filières de traitement des déchets d'après Alain Navarro (1994)

Les agences de l'eau ont également établi une classification des filières de traitement externe répondant à leurs besoins spécifiques, et plus particulièrement adaptée à l'affectation d'aides au traitement dans les centres collectifs de traitement. Chacune des six agences de l'eau a sa propre nomenclature qui peut différer légèrement de celle des autres en raison des particularités régionales (présence d'une filière spécifique, politique locale de gestion des

DIS). Le tableau I-2 donne la liste des filières conventionnées par l'agence de l'eau Artois-Picardie^[AFB-AP 92].

Codes	Libellé de la filière
01	Déchromatation
02	Décyanuration
04	Neutralisation
06	Régénération de résines
07	Déshydratation mécanique
08	Solidification
09	Séparation de phase des émulsion
12	Traitement spécial des solutions aqueuses organiques
20	Incinération en unités spécialisées à T>1200 °C de PCB, PCT, Chlorophénols
203	Décontamination d'huiles souillées par PCB<1%
21	Incinération d'organohalogénés (Cl > 1%) en unités spécifiques avec neutralisation des gaz
212	Incinération d'organohalogénés (1%<Cl<8%) en cimenterie
218	Incinération des déchets des pressings en unités spécifiques
22	Evapo-Incinération
221	Evapo-Incinération (procédé VIDAM)
25	Incinération des déchets autres boueux - pâteux - solides
28	Incinération en cimenterie au capot de chauffe et incinération déchets liquides à PCI<6000 cal/g
29	Incinération en cimenterie filière pâte
41	Reconditionnement et enfouissement en mines de sel
43	Produits toxiques divers en petits conditionnements (<100 litres)

Tableau I-2 : Nomenclature des filières (de traitement externe) conventionnées par l'agence de l'eau Artois Picardie

6.4) Procédés de traitement

A la notion de filière qui peut se révéler assez vague dans certains cas, on préférera parfois, notamment lorsque l'on s'intéresse au traitement interne, la notion de procédé. Une filière de traitement peut faire intervenir plusieurs procédés. D'autre part, un même objectif en terme de filière peut être atteint à l'aide de procédés différents qui ne sont pas soumis aux mêmes contraintes. L'Ademe a publié récemment un catalogue^[ADEME 95] des procédés de traitement des déchets industriels qui fait intervenir une liste de 68 procédés.

6.5) Centres de traitement

Le traitement externe fait appel à des centres collectifs de traitement répartis sur toute la France. Il s'agit d'installations classées dûment autorisées à exercer le traitement des déchets et soumises à ce titre à une réglementation particulière. La figure I-4 propose une carte des centres de traitement français. La distribution des unités de traitement de déchets recouvre à

peu près celle de l'activité industrielle. Cette carte illustre la diversité des solutions envisageables, tant sur le plan géographique que technique. C'est notamment de cette diversité que provient la difficulté pour un producteur d'identifier la meilleure solution. Avec la multiplication des filières de valorisation, cette diversité risque d'augmenter beaucoup dans les années à venir.

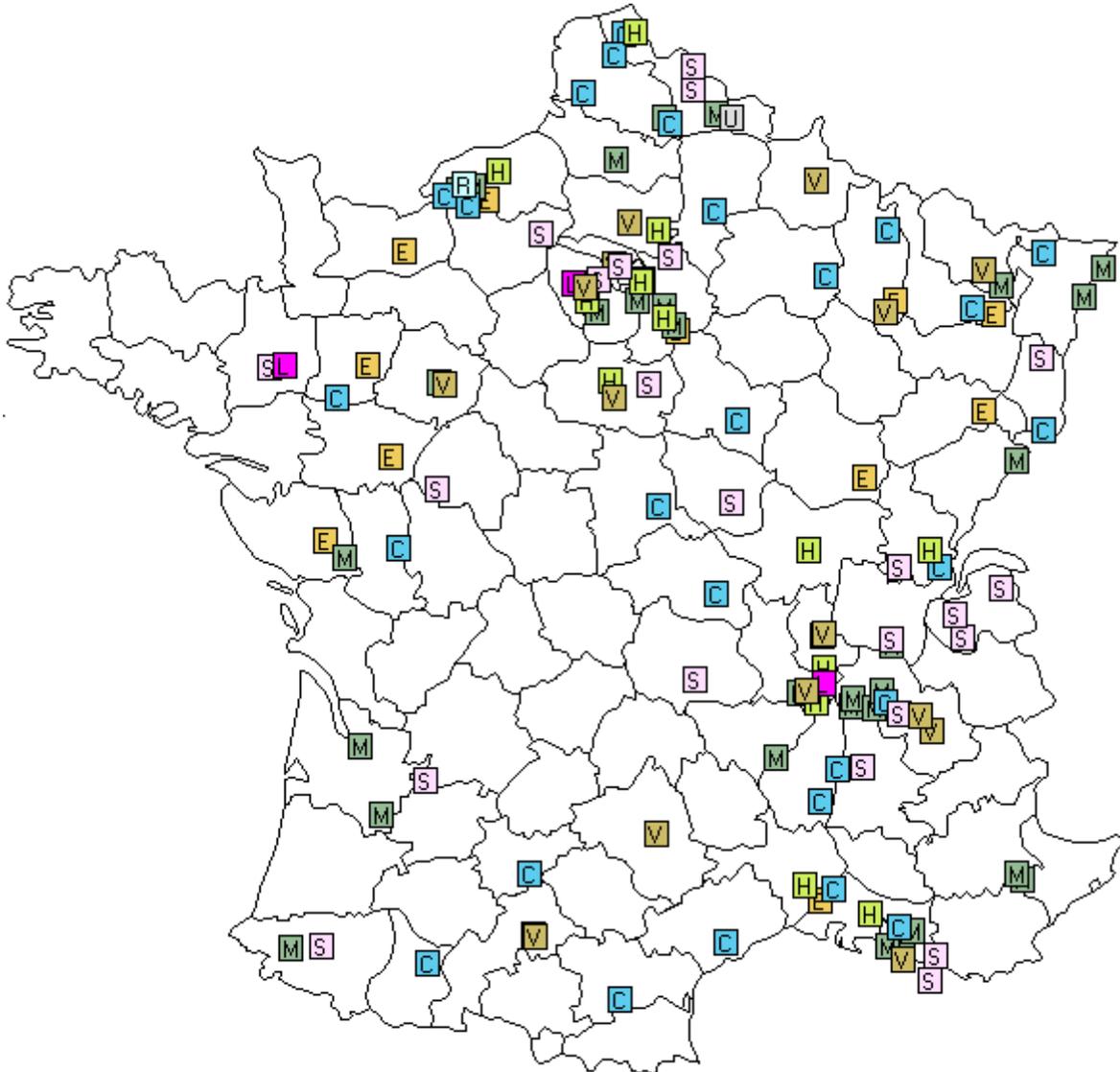


Figure I-4 : Carte des centres collectifs de traitement (les lettres correspondent à l'activité principale du centre : M= multifilière, incinération et physico-chimique, C= cimenterie, E=enfouissement, H= élimination d'huiles, S= régénération de solvants, V=valorisation, L=traitement des déchets de laboratoire, R= régénération d'huiles noires)

Le tableau I-3 présente les quantités de déchets traitées suivant les différentes filières en 1992 et 1993 (les chiffres des années suivantes ne sont pas encore disponibles). On constate que

l'incinération représente près de la moitié des quantités traitées, l'autre moitié se partageant à près d'un tiers pour les traitements physico-chimiques et deux tiers pour l'enfouissement technique.

	Capacités en 1992 (t)	Taux d'utilisation en 1992 (%)	Tonnages traités en 1992 (t)	Tonnages traités en 1993 (t)
Traitements physico-chimiques	660 000	56	368 026	343 773
Incinération en centres spécialisés dont évapo-incinération	810 000	86	698 189	675 160
Incinération en UIOM	42 000	61	25 644	30 653
Incinération en cimenteries	520 000	50	260 596	337 434
Total incinération	1 372 000		984 429	1 043 157
Traitements divers			9 646	7 625
Régénéraion huiles noires	110 000	80	87 586	86 290
Régénération solvants	67 000	73	49 000	66 035
Centres de stockage de classe I	10 à 15 ans de capacité restante		773 152	718 846

Tableau I-3 : Quantités de DIS traités dans les centres collectifs [ADEME 95]

7) Les objectifs de la gestion des déchets en France ou les "conséquences de 92"

7.1) Les textes fondateurs

Au chapitre 4 et 5, nous avons identifié les raisons pour lesquelles il est nécessaire de traiter les déchets industriels : limitation des impacts sur l'environnement et limitation des pertes de valeur. Ces raisons, si elles paraissent maintenant presque évidentes, ne l'ont pas été de tous temps, et ne le sont probablement pas de manière universelle^[Thompson 94]. Il a donc fallu se doter de lois définissant une politique nationale de gestion des déchets et établissant des contraintes obligeant les producteurs de déchets à la suivre. Ce processus entrepris dans les années 60 avec la loi sur l'eau s'est poursuivi dans les années 70 avec la loi 75-633 du 15 juillet 1975 sur la gestion des déchets. A l'époque, il s'agit principalement d'établir l'obligation d'élimination des déchets sur la base de leur impact potentiel, et de définir les responsabilités. Parallèlement à la démarche entreprise en France, l'Europe se dote d'une politique de gestion

des déchets avec la directive "Déchets" 75-442 du 15 juillet 1975. Cette même démarche est suivie progressivement par la plupart des pays industrialisés^[ADEME 94].

En plus des lois sur la gestion des déchets, les lois sur les installations classées, la loi sur l'eau et sur l'air vont compléter l'encadrement de la politique environnementale de la France. Des mesures concrètes comme le suivi des déchets industriels spéciaux découleront à la fois du contexte réglementaire "déchet" et des dispositions relatives aux installations classées. De la même manière, toute gestion de déchets liquides devra prendre en compte les textes relatifs aux rejets d'effluents liquides découlant de la loi sur l'eau.

7.2) 1992 et la nouvelle politique

En 1992, la loi du 15 juillet 1975 est profondément remaniée (loi 92-646 du 13 juillet 1992). Elle fait apparaître les nouveaux objectifs de la politique de gestion des déchets :

"Les dispositions de la présente loi ont pour objet :

- 1° de prévenir ou de réduire la production et la nocivité des déchets, notamment en agissant sur la fabrication et sur la distribution des produits ;
- 2° d'organiser le transport des déchets et de le limiter en distance et en volume ;
- 3° de valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir à partir des déchets des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;
- 4° d'assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique des opérations de production et d'élimination des déchets, sous réserve des règles de confidentialité prévues par la loi ainsi que sur les mesures destinées à en prévenir ou à en compenser les effets préjudiciables."

En d'autres termes, les priorités fixées sont :

technologies propres,
réduction des transports,
valorisation,
information.

Ce préambule est complété par l'introduction de la définition des déchets ultimes (cf. 3.). Il est décidé qu'à partir de 2002 seuls les déchets ultimes pourront être admis en décharge.

Pour les déchets industriels spéciaux, la décision de réserver les décharges aux déchets ultimes s'est traduite rapidement par les arrêtés du 18 décembre 1992 (modifiés par ceux du 18 février 1994), qui fixent la liste des déchets admissibles en centre de stockage de classe I. Ces textes restreignent l'accès aux centres de stockage. Ils rendent aussi beaucoup plus contraignants les critères d'admission des déchets en fixant des seuils maxima de solubilité pour différents éléments suivant les familles de déchets concernés. Ils imposent également, à court ou moyen terme, une stabilisation des déchets avant mise en décharge. Avec la circulaire sur les études déchets, ce sont les textes qui vont induire le plus de changement dans les comportements des industriels, parce que le recours systématique au stockage leur est à présent interdit mais aussi parce que les contraintes qui pèsent sur cette filière d'élimination vont la rendre de plus en plus onéreuse.

7.3) Études déchet

L'accès à la décharge est limité, les technologies propres et la valorisation sont identifiées comme des priorités, cependant aucun autre texte ne vient véritablement contraindre au plan national les industriels à s'orienter vers ces deux dernières stratégies. C'est au niveau local que la contrainte peut apparaître à l'occasion de l'attribution ou du renouvellement d'un arrêté préfectoral d'autorisation au titre de la loi sur les installations classées. La réglementation prévoit (Circulaire 90-98 du 28 décembre 1990) de procéder, dans ce cas, à une "étude déchet" dans le cadre de l'étude d'impact. Cette étude déchet prévoit plusieurs étapes :

description de la situation existante en ce qui concerne la production, la gestion et l'élimination des déchets ;

étude technico-économique des solutions alternatives pour la production, la gestion et l'élimination des déchets ;

présentation et justification des filières retenues pour l'élimination des déchets.

La circulaire fait apparaître quatre niveaux de gestion des déchets :

- niveau 0 : gestion à la source par diminution des volume et de la nocivité
- niveau 1 : valorisation
- niveau 2 : élimination par traitement
- niveau 3 : stockage

Le producteur d'un déchet géré au niveau n (par exemple élimination) doit impérativement étudier des solutions de niveaux $n-1$ ou $n-2$ (ex: valorisation, réduction à la source) et justifier dans son étude le rejet éventuel de ces solutions.

Les études déchets constituent la seule procédure légale destinée à inciter les entreprises à recourir à des techniques plus propres ou à la valorisation. A ce jour, environ 2000 entreprises ont été soumises à cet exercice à titre "rétroactif". Elles ont été choisies pour leur taille, leur caractère polluant ou en raison de la grande quantité de déchets qu'elles produisent. Les autres industriels, de plus petite taille, ne sont donc pas directement incités à faire évoluer leur mode de gestion.

Pour mener à bien leur étude déchet, et plus particulièrement la phase 2, les industriels doivent disposer d'informations sur les différentes filières et les différents procédés envisageables. Ils doivent aussi être à même d'interpréter cette information en fonction des caractéristiques de leur installation et du contexte réglementaire. Très souvent, les petites entreprises sont obligées de recourir aux services de bureaux d'étude spécialisés pour réaliser cette étude déchet.

7.4) La loi n'impose aucune filière

En identifiant la valorisation comme un mode de gestion prioritaire, la réglementation n'a pas fixé d'objectif précis à celle-ci. De plus, elle introduit la notion de coût acceptable (dans la définition du déchet ultime par exemple), sans définir toutefois ce qu'il recouvre. Ainsi, un industriel ne dispose comme critère de valorisation que du critère économique relatif à son entreprise. Il serait tenté de ne considérer comme valorisé que ce qui permet de dégager un bénéfice ou de minimiser les coûts par rapport à une situation antérieure de traitement. En pratique, l'obligation de recourir à la valorisation n'existe que pour les huiles usées (Loi 80-531 du 15 juillet 1980).

De la même manière, rares sont les déchets pour lesquels une filière de traitement est imposée. Ceci découle d'une volonté de ne pas figer les techniques de traitement, ce qui risquerait de limiter les possibilités d'évolution et de progrès dans le domaine du traitement des déchets^[Legrand 83]. En pratique, seuls les déchets suivants font l'objet d'une imposition de filière

: huiles minérales usées, sables de fonderie, déchets de l'industrie du dioxyde de titane, PCB/PCT. Pour les autres déchets spéciaux les seules indications disponibles dans la réglementation nationale concernent soit des interdictions, soit des autorisations (uniquement dans le cas de la mise en décharge), mais en aucun cas une obligation d'avoir recours à une filière particulière. Un producteur de déchet ne peut donc pas déterminer à partir de la réglementation quelle solution il doit mettre en place.

7.5) Déchets admissibles, normes de rejet, ce que dit la loi

Hormis dans le cas du stockage des déchets en centre d'enfouissement technique, et, dans une moindre mesure, dans le cas de l'incinération en cimenterie (arrêté du 10 octobre 1996), il n'y a pas dans la réglementation nationale d'indication sur la nature des déchets pouvant être traités par les installations collectives de traitement. Celle-ci est définie localement dans l'arrêté préfectoral de classement au même titre que les normes de rejet de l'établissement. Dans le cas des centres d'enfouissement techniques, les normes de rejet (lixiviats) sont appliquées en accord avec les valeurs guides données par les arrêtés du 18 décembre 1992. Pour les incinérateurs, l'arrêté du 10 octobre 1996 sur l'incinération des déchets industriels fixe notamment les flux maximaux de poussières, de métaux lourds et de chlore dans les fumées.

Dans le contexte du traitement interne, les installations de traitement doivent se conformer à l'arrêté du 1^{er} mars 1993 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux rejets de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation, à l'exception de certaines activités (cimenteries, papeteries, traitement de surface,...). Localement, l'arrêté de classement vient préciser ce texte national en le renforçant éventuellement.

7.6) Contrôles, incitations, conseil : les institutions doivent avoir réponse à tout

Le producteur de déchets est dans un environnement contraignant, qui l'oblige à traiter son déchet et à respecter certaines normes de rejet, sans que cela soit, nous l'avons vu, très explicite. Pour s'assurer de la bonne application de la réglementation, et pour inciter les producteurs de déchets à pratiquer une bonne gestion environnementale, il a été mis en place

un triple système de contrôle et d'incitation et de conseil. Bien que les attributions des services soient assez précisément codifiées, il arrive que les rôles se confondent. On peut cependant schématiquement dire que les DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement) sont chargées du contrôle, les agences de l'eau de l'incitation, et l'Ademe du conseil.

Le contrôle des DRIRE porte essentiellement sur le respect des prescriptions de l'arrêté de classement (dont les champs d'application dépassent le simple domaine des déchets), le suivi des déchets industriels spéciaux au titre de l'arrêté du 4 janvier 1985 sur le *contrôle des circuits d'élimination des déchets générateurs de nuisances* et l'évaluation des études d'impact, qui comprennent notamment le volet étude déchet. A ce titre, les inspecteurs des installations classées doivent être à même d'identifier pour chaque type de déchet le mode de traitement qui lui conviendrait le mieux. Il s'agit aussi bien de valorisation ou de technologie propres, dans le cadre des études déchets, que de centres collectifs de traitement, dans le contexte du suivi des déchets spéciaux.

Les agences de l'eau gèrent la redevance "pollution" destinée à inciter les industriels à réduire leurs rejets de polluants dans l'environnement. A ce titre, elles exercent un suivi des rejets fondé principalement sur l'autocontrôle. La redevance pollution a augmenté de façon considérable au cours des dernières années comme le montre la figure I-5 ^[Nicolazo 94]. Cette augmentation constitue une pression supplémentaire sur les industriels les incitant à modifier leur gestion des déchets.

En plus de la redevance pollution, les agences de l'eau gèrent aussi des aides au traitement dans les centres collectifs de traitement. Des montants forfaitaires ou proportionnels aux coûts sont attribués aux producteurs de déchets par tonne de déchets traitée dans un centre de traitement conventionné. Dans ce contexte, il est nécessaire pour une agence de pouvoir identifier le ou les centres de traitement qui peuvent recevoir un déchet donné afin de s'assurer que le traitement est approprié. D'un autre côté, il faut que le producteur puisse identifier et comprendre les aides qui lui sont proposées en faisant la relation avec les centres de traitement et les filières de traitement.

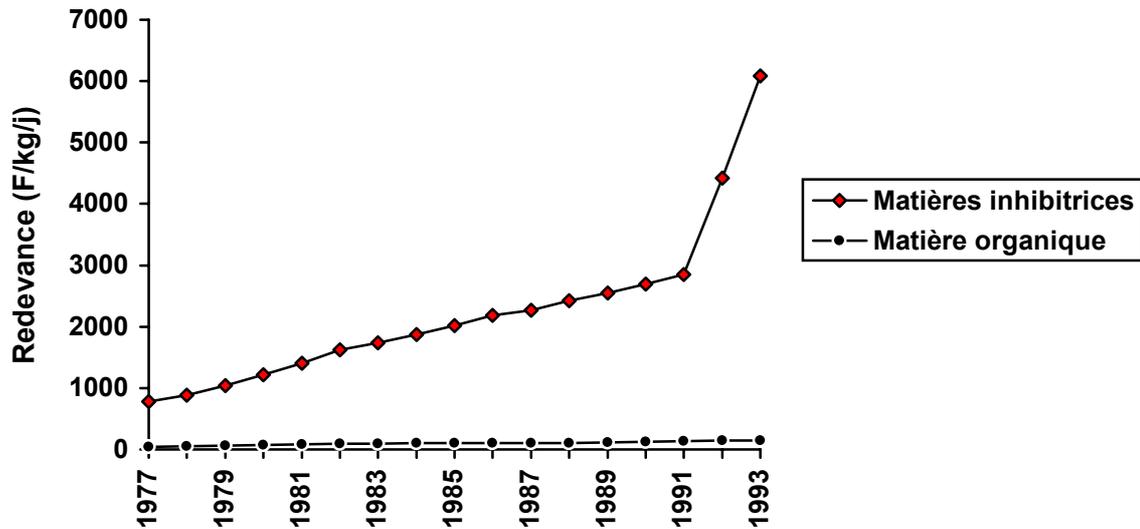


Figure I-5 : Evolution de la redevance pollution pour l'agence de l'eau Loire Bretagne (les matières inhibitrices sont essentiellement les métaux lourds, le cyanure, les phénols)

Enfin, l'Ademe joue un rôle de conseil, en aidant les industriels à mettre en place des solutions adaptées à leur situation propre. Elle doit donc maîtriser l'ensemble des solutions de traitement, internes et externes, afin de donner des informations appropriées aux demandeurs.

7.7) Plans régionaux de gestion des DIS: quels moyens pour quels déchets ?

La gestion des déchets industriels spéciaux au plan régional prévoit notamment la mise en place de plans régionaux d'élimination des déchets industriels spéciaux. Le décret n°93-140 du 3 février 1993 prévoit :

un inventaire prospectif à terme de dix ans des quantités de déchets à éliminer selon leur origine, leur nature et leur composition ;

le recensement des installations existantes d'élimination de ces déchets par valorisation ou par extraction et traitement des matériaux contenus dans ces déchets ;

des indications sur les installations qu'il apparaît nécessaire de créer afin de permettre d'atteindre les objectifs de réduction, à terme de dix ans, des qualités de déchets ultimes ;

les mesures préconisées pour prévenir l'augmentation de la production de déchets ;

les priorités à retenir pour atteindre les objectifs de la loi de juillet 1975.

La réalisation de ces plans nécessite que puissent être identifiées les filières à mettre en place pour une catégorie donnée de déchet, tant sur le plan externe (centres collectifs de traitement) que sur le plan interne (valorisation, technologie propres). A l'heure actuelle, seuls quelques plans ont été établis et adoptés par les assemblées régionales (dont celui de la région Rhône-Alpes).

7.8) Transit, transport et suivi : on doit connaître la destination finale du déchet et ses propriétés

Au plan national, le transport des déchets spéciaux est régi par l'arrêté du 4 janvier 1985 sur le *contrôle des circuits d'élimination des déchets générateurs de nuisances*. L'importation et l'exportation des déchets sont soumises aux dispositions du décret 90-267 du 23 mars 1990 et de l'arrêté de la même date qui établit les documents et formalités nécessaires dans ce cas. Ces différents textes prévoient notamment l'émission de documents (bordereaux de suivi, demande d'autorisation d'importation ou d'exportation) sur lesquels doivent figurer la nature du déchet, ses principales caractéristiques physico-chimiques, son caractère dangereux éventuel ainsi que la filière de destination choisie.

Le caractère dangereux du déchet le place dans le cadre du transport des matières dangereuses réglementé par le RTMD (règlement de transport des matières dangereuses). Ce règlement repose sur une nomenclature de produits dangereux associée à des classes de dangers et des codes de danger. Suivant la nature des produits et leurs propriétés dangereuses, il limite les quantités pouvant être transportées, impose des conditionnements et des types de véhicules ainsi qu'une signalisation particulière. Les déchets posent certains problèmes particuliers vis-à-vis de ce règlement, notamment en ce qui concerne l'identification des produits et des caractéristiques de danger.

Au plan international, le transit des déchets à travers les frontières est réglementé par des textes européens, et des conventions internationales (OCDE et convention de Bâle). Sans entrer dans le détail, ces textes font ressortir la notion de destination finale du déchet. Suivant le mode de traitement envisagé, et l'objectif poursuivi (valorisation ou élimination) les transferts de déchets font l'objet de contraintes plus ou moins restrictives.

8) Nouvelle approche industrielle

Nous avons vu que les producteurs de déchets sont soumis à une pression résultant des nouvelles politiques de gestion des déchets issues de la loi de 1992. Au delà de cet aspect purement réglementaire, de nouvelles tendances voient jour dans l'industrie. Elles font suite à une prise de conscience de l'enjeu que représente l'environnement pour l'entreprise, en termes financiers comme en termes d'image. D'une part il devient maintenant important de pouvoir prouver à ses clients que l'on respecte l'environnement, en particulier si l'on veut exporter, d'autre part, les flux de pollution incontrôlés, les pertes énergétiques et les accidents sont autant d'indicateurs d'une mauvaise gestion industrielle qui doit avoir des répercussions sur la qualité des produits et la maîtrise des coûts.

On assiste donc à l'apparition de nouveaux outils et de nouvelles procédures calqués sur les démarches d'assurance qualité, destinés à garantir une bonne gestion environnementale. Il s'agit, entre autre, des normes ISO 14000, des Eco-Audits et des Eco-Labels. Le principe est toujours celui d'une démarche volontaire de l'entreprise qui met en place une politique de gestion environnementale suivant certaines règles, et en conformité avec la réglementation en vigueur afin de garantir que tout a été fait pour minimiser l'impact d'une activité ou d'un produit.

Dans la plupart de ces méthodes, la gestion des déchets apparaît comme un des points à prendre en compte. La norme Française X30-200 prévoit ainsi (entre autres) un inventaire des facteurs d'impact -parmi lesquels figurent les déchets- l'identification des non-conformités avec la réglementation et l'initiation d'actions correctives.

9) Beaucoup de questions pour peu de réponses

Les précédents chapitres ont fait apparaître certains aspects du problème de la gestion des déchets. Producteurs de déchets et acteurs institutionnels sont confrontés à un même défi : gérer les déchets efficacement dans le but de minimiser les atteintes à l'environnement et de réduire les pertes dans un contexte réglementaire à la fois incitatif et contraignant. Nous avons pu voir que les solutions que l'on peut mettre en oeuvre sont variées, et qu'à de rares exceptions près, il n'existe pas, dans la réglementation, d'indication précise sur les choix qui

doivent être faits. Cependant, les questions que se posent ou peuvent se poser les acteurs industriels ou institutionnels demeurent. Nous allons tenter de les examiner dans ce qui suit. Elles serviront ensuite de base à notre réflexion sur les systèmes d'aide à la décision pour le traitement des déchets spéciaux. Cette analyse requiert différents points de vue : celui des industriels et celui des institutions.

9.1) Le point de vue des industriels

On peut estimer qu'un peu plus de la moitié des déchets industriels spéciaux sont produits par des grandes entreprises du secteur de la chimie, de la sidérurgie, et de la métallurgie extractive [DRIRE-RA 91],[PREDIRA],[MIN.ENV 93]. Le reste provient de P.M.E. et P.M.I. Les premières, structurées en grands groupes, disposent généralement de moyens importants de recherche et développement, de services juridiques compétents et, de plus en plus souvent de services environnement chargés de gérer, entre autres, toutes les questions relatives aux déchets. Les chiffres montrent que la gestion des déchets de ces entreprises s'est considérablement améliorées^[MIN.ENV 93]. La plupart d'entre elles disposent déjà d'importants moyens de traitement interne et certaines proposent même leurs services comme centre collectif de traitement à l'image de Rhône Poulenc. Nous ne nous intéresserons donc pas directement à ce type d'entreprises.

Pour les petites entreprises, le tableau est plus préoccupant. Une étude récente en région Rhône-Alpes a montré que près de 50 % des petits industriels du traitement de surface ne traitaient pas leurs déchets de manière satisfaisante^[Bligny-Morel 95]. Les auteurs du PREDIRA estiment à 50 000 t la quantité en Rhône-Alpes de déchets de type mélange eau-hydrocarbures (issus principalement de petites entreprises de la mécanique) non collectés ou traités de façon impropre par des filières physico-chimiques. Les petites entreprises, parfois confrontées à des difficultés économiques importantes, ne disposent pas, en général des moyens et des compétences techniques spécifiques nécessaires pour faire face à un problème d'environnement. Le CETIM fait ressortir la demande accrue des petites entreprises de son secteur d'activité pour une information à la fois réglementaire et technique dans le domaine du traitement des déchets^[Lieurade 95].

Quels sont les besoins spécifiques des P.M.E. ?

Devant la multitude de textes réglementaires, les petits industriels ont souvent des difficultés à se retrouver. Ils peuvent se poser les questions suivantes :

- Mon activité est-elle classée ?
- Quelles sont les normes de rejet que je dois appliquer ?
- Mon déchet est-il spécial ?
- Suis-je obligé de traiter ?
- Y a-t-il une filière obligatoire ?
- Suis-je responsable ?
- A quels textes me référer ?

Au delà de l'aspect réglementaire, les petites entreprises ont parfois du mal à percevoir l'intérêt ou la nécessité d'une action dans le domaine de l'environnement. Les questions qui ressortent alors sont :

- Que va m'apporter le traitement des déchets produits par l'entreprise ?
- Pourquoi devrais-je traiter ce déchet alors que je ne l'ai jamais fait ?

Une autre difficulté réside souvent dans la détection et la formulation des problèmes. Le producteur de déchet n'a pas une vision très précise des flux que son activité engendre. Il ne sait pas attribuer à ces flux un débit, un nom, une nature et une composition. En conséquence, il ne peut pas fournir une information précise à l'administration chargée de le contrôler ou de le conseiller. Une conséquence fréquente de cette mauvaise maîtrise des flux réside dans les mélanges qui entraînent des surcoûts de traitement importants. Les questions sont alors :

- Comment caractériser mon déchet ?
- Quelle nomenclature utiliser ?
- Quelles analyses effectuer ?
- Quels paramètres prendre en compte ?
- Comment formaliser les résultats ?
- Comment les communiquer à l'administration ?
- Quelles conséquences pour mon organisation interne ?

Une fois ces questions préliminaires résolues, il reste le difficile problème de la recherche de solutions. On peut schématiquement distinguer trois aspects : l'identification des objectifs,

l'identification des solutions techniques et l'étude technique et économique des solutions. Le but est de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les objectifs de traitement envisageables ?
- Quelles sont les solutions techniquement envisageables ?
- Où trouver de l'information sur ces techniques ?
- Quels sont les critères de faisabilité ?
- Quelles sont les solutions techniquement réalistes ?
- Combien cela peut-il coûter ?

Enfin, une fois les solutions techniques réalisables identifiées, il faut effectuer un choix et mettre en place la solution retenue. Cela implique d'avoir identifié les priorités de l'entreprise en termes d'objectifs de traitement, de rentabilité économique. Il faut ensuite effectuer un véritable étude technique qui permettra de mettre en place la solution retenue.

- Quels sont les objectifs de l'entreprise ?
- Quels sont les critères de choix ?
- Qui peut réaliser l'étude ?
- Quel matériel choisir ?
- Quel sera le retour sur investissement ?

9.2) Le point de vue des institutions

Les institutions ont, de leur côté, des besoins particuliers. Elles sont confrontées à une grande diversité de cas de petites entreprises qu'elles doivent contrôler et conseiller. Face à une entreprise qui met en place une nouvelle installation de traitement, la DRIRE doit être à même de juger rapidement si l'installation envisagée peut résoudre les problèmes identifiés. Lors du contrôle d'un chargement, un fonctionnaire des douanes doit pouvoir immédiatement s'assurer que la destination du déchet est bien conforme à ses caractéristiques. L'Ademe doit souvent répondre à des consultations téléphoniques d'industriels qui demandent où faire traiter leur déchet. D'une manière générale, les institutions sont toutes confrontées à :

l'urgence : elles ont souvent peu de temps pour répondre à une question

la diversité des problèmes qui fait qu'un seul spécialiste ne peut pas toujours répondre à toutes les questions posées.

Parmi les questions que peuvent se poser les acteurs institutionnels, on peut mentionner :

De quel déchet s'agit-il ?

Le déchet est-il suffisamment caractérisé ?

L'élimination de ce déchet est-elle légale ?

L'industriel a-t-il réellement examiné toutes les options ?

Le centre vers lequel ce déchet s'achemine est-il habilité à le traiter ?

Faut-il aider cet industriel à mettre en place la solution qu'il a choisie ?

Si ces questions sont un peu différentes, dans leur forme, de celles que se posent les producteurs de déchets, le fond est cependant le même. Nous traiterons donc conjointement les deux points de vue.

10) Conclusions

Cette première partie nous a permis d'introduire le contexte des déchets industriels spéciaux et de mettre en évidence certains points. Les industriels, et en particulier les P.M.I., sont contraints de s'intéresser au traitement de leurs déchets et de chercher pour cela des solutions conformes à la réglementation. Ces solutions doivent être identifiées dans un éventail très large de techniques et de centres de traitement. Les questions qui peuvent se poser autour de ce processus de décision sont nombreuses, et la réglementation s'avère être une source complexe nécessaire mais non suffisante pour y répondre.

Il n'y a certainement pas unicité des réponses à ces questions. Cependant, quelque soit l'approche considérée, il faut établir le lien entre des éléments épars d'information technique, réglementaire et économique.

En faisant la synthèse des questions soulevées au paragraphe 9), nous pouvons dégager les principales préoccupations des producteurs de déchets et de l'administration. Il s'agit de :

l'identification et la caractérisation du déchet ;

la compréhension du contexte réglementaire qui s'y rattache et des obligations qui en découlent ;

l'identification et la sélection de solutions de valorisation et d'élimination ;

l'information technique et économique sur ces solutions.

Pour répondre à ces questions, il faut avoir recours à des raisonnements qui font intervenir une grande variété de concepts et de données, ce qui peut justifier la mise en place de systèmes d'aide à la décision.

Dans ce travail, nous avons cherché à répondre prioritairement au problème de l'**identification de solutions de traitement**. Ceci nous a cependant obligé à nous intéresser à l'identification et la caractérisation des déchets, au contexte réglementaire, aux données techniques et, dans une moindre mesure, économiques du traitement, tant le lien entre ces différents aspects est important.

Nous allons examiner maintenant des sources d'information qui permettent de répondre à certaines de ces questions.

II Outils et sources d'information disponibles pour la gestion des déchets

Le travail de recherche que nous avons mené s'inscrit dans une démarche générale visant à rendre plus accessibles les informations concernant le traitement des déchets. Ce mouvement a été initié à la suite de la loi du 13 juillet 1992 qui a introduit de nouvelles priorités pour le traitement des déchets. La généralisation des études déchets dans les entreprises oblige notamment les industriels à rechercher de nouvelles solutions pour le traitement des déchets et à justifier leurs comportements sur le plan technique, économique et réglementaire. De nombreuses sources d'information ont vu le jour sous la forme de guides ou de catalogues recensant des filières ou des procédés de traitement. D'autres outils permettent une approche réglementaire de la gestion des déchets. Ces documents constituent tous des approches du problème du traitement des déchets.

En plus des ressources documentaires sur le sujet, un certain nombre de systèmes d'aide à la décision ont été développés au cours des dernières années. Utilisant des supports et des méthodes très diverses, ils permettent en général de traiter des aspects très spécifiques de la gestion des déchets. Parmi ceux-ci, un système occupe une place particulière. Il s'agit de DECHAIDE, développé à l'INSA de Lyon par Roberto Soares. Ce logiciel est en effet un premier exemple de système expert d'aide au choix de filières de traitement de déchets industriels.

L'examen de ces différents outils, qu'il s'agisse de guides classiques ou de logiciels va nous permettre de mettre en évidence les lacunes qu'il reste à combler, mais aussi de recenser les sources d'information dont nous disposerons pour construire une méthode d'aide à la décision. Ces documents ou ces systèmes, souvent de nature informatique, reposent sur des modes différents de classification ou de caractérisation des déchets et des filières ou procédés de traitement dont nous pourrions mesurer l'importance.

1) Guides de choix et supports documentaires

Comme nous nous intéressons dans ce travail à la construction d'une méthode d'aide à la décision, il est indispensable de nous intéresser aux supports documentaires qui ont été développés récemment, certains constituant déjà une première approche d'outils d'aide à la décision.

1.1) Les catalogues de procédés de traitement et de technologies propres

Il est utile de préciser que plusieurs de ces outils ont été publiés après le début de notre travail de recherche sous l'impulsion du Ministère de l'environnement, de l'Ademe et des centres techniques.

Nous nous sommes particulièrement intéressés aux guides et catalogues suivants :

- "Procédés de traitement des déchets industriels solides et liquides"^[ADEME 95]
- "Traitements de surface, techniques de réduction de déchets"^[CETIM 95].
- "Guide des technologies propres et des filières de traitement des déchets, industries mécaniques"^[CETIM 95-1].
- "Guide pour l'élimination et la valorisation des déchets industriels"^[Min.ENV 82]
- Les documents des agences de l'eau
- "Les déchets des industries de traitement de surface"^[ANRED 88].
- "Treatment and disposal methods for chemicals"^[UNEP 85]
- "Lamy environnement, les déchets"^[LAMY 95]
- "Comment traiter les déchets et réduire les rejets en milieu industriel "^[DALIAN 95]

Nous proposons en annexe I-3 une analyse résumée de chacun de ces documents, qui se distinguent les uns des autres par les points suivants (cf. tableau I-4):

- le degré d'aide à la décision :

si certaines sources permettent effectivement d'identifier des solutions de traitement, avec plus ou moins de fiabilité, en fonction de la nature du déchet ou de la fonction génératrice de celui-ci, la plupart ne constitue qu'un ensemble d'informations sur les filières ou les procédés de traitement. De plus aucune des sources étudiées ne permet de sélectionner une solution en fonction des caractéristiques analytiques du déchet (teneur en différents éléments).

- le mode d'identification :

toutes les sources étudiées ont recours à des systèmes d'identification différents (nomenclature française des déchets, nomenclatures de produits neufs, classification des fonctions génératrices,...).

- le contexte de traitement :

certain documents concernent les solutions de traitement externe alors que d'autres sont relatifs au traitement interne.

- la nature des solutions de traitement proposées :

il peut s'agir de procédés, de filières, de centres de traitement. Aucun outil n'apporte d'information simultanée suivant ces trois points de vue.

- le degré d'information technique et économique fournie,
- le domaine d'activité concerné.

Titre du document	Degré d'aide à la décision	Mode d'identification	Contexte de traitement	Nature des solutions	Degré d'information technique	Domaine d'activité concerné
"Procédés de traitement des déchets industriels solides et liquides" ^[ADEME 95]	Information	Nomenclature française	Interne	Procédés	Moyen	Toutes activités
"Traitements de surface, techniques de réduction de déchets" ^[CETIM 95]	Information	Fonctions génératrices	Interne	Procédés	Moyen	Traitement de surface
"Guide des technologies propres et des filières de traitement des déchets, industries mécaniques" ^[CETIM 95-1]	Aide à la décision	Nomenclature Française + classification des produits neufs	Interne et externe	Procédés et filières	Bon	Industrie mécanique
"Guide pour l'élimination et la valorisation des déchets industriels" ^[MIN.ENV 82]	Aide à la décision	Classification particulière	Externe	Filières	Faible	Toutes activités
Les documents des agences de l'eau	Aide à la décision	Etat physique et nature chimique principale	Externe	Filières (classification des agences de l'eau)	Faible	Toutes activités
"Les déchets des industries de traitement de surface" ^[ANRED 88]	Aide à la décision	Fonction génératrice + composants particuliers	Interne	Procédés	Moyen	Traitement de surface
"Treatment and disposal methods for chemicals" ^[UNEP 85]	Aide à la décision	Produits chimiques purs	Externe	Techniques générales	Faible	Toutes activités
"Lamy environnement, les déchets" ^[LAMY 95]	Information					Toutes activités
"Comment traiter les déchets et réduire les rejets en milieu industriel" ^[DALIAN 95]	Information					Toutes activités

Tableau I-4 : différences entre les sources documentaires étudiées.

1.2) Les guides réglementaires

Ce sont outils spécifiques d'information sur la réglementation. Nous avons utilisé principalement le **Code pratique des déchets**^[Garcin 93] : il s'agit d'un recueil de textes ayant tous trait aux déchets, organisé par thèmes et accessibles par mots clés. Il présente l'avantage de fournir l'ensemble des textes relatifs au thème des déchets et d'être structuré d'une manière très claire. Il constitue donc une référence dans le domaine.

D'autres ouvrages déjà mentionnés fournissent aussi une information réglementaire, en général recomposée, ce qui a l'avantage de la rendre plus compréhensible mais qui rend plus difficile la référence précise aux textes de loi.

1.3) Bilan des guides et catalogues

Notre recherche bibliographique fait donc apparaître deux catégories d'outils :

- Les outils de documentation : (Lamy Environnement, Guide Dalian) axés sur la description des solutions et sur l'explication du contexte, ils ne permettent pas une prise de décision rapide.

- Les outils d'aide à la décision : en général appliqués à un secteur d'activité particulier, ils permettent d'identifier les déchets et de leur associer des solutions de traitement. Ils peuvent, dans certains cas, être limités quant à l'information sur les solutions de traitement.

Parmi ces derniers documents, nous pouvons distinguer ceux qui sont orientés vers le traitement externe et ceux qui proposent des solutions de traitement interne ou des procédés. La nature de l'information proposée et les modes d'identification des déchets varient beaucoup suivant le point de vue choisi.

Enfin, d'une manière générale, nous avons constaté qu'il n'existe aucun document permettant d'établir facilement le lien entre les différents types d'information - technique, réglementaire et économique - à propos d'un déchet donné, en prenant en compte ses caractéristiques propres. En fait, si les sources documentaires examinées apportent une information intéressante, le lecteur doit, pour pouvoir exploiter cette information, disposer de données sur son déchet ou sur son unité de production et les utiliser de manière appropriée. En général les outils sont peu

explicites sur la méthode à employer pour aboutir de manière fiable à une solution de traitement pour un déchet donné.

2) Systèmes informatiques

Nous allons maintenant nous intéresser aux systèmes informatiques d'aide à la décision. Contrairement aux documents classiques étudiés dans le chapitre précédent, ces outils présentent l'avantage de guider l'utilisateur dans toutes les étapes de sa recherche de solutions. Nous examinerons plus particulièrement deux logiciels dont les objectifs initiaux sont relativement proches des nôtres.

2.1) DECHAIDE : système d'aide à la décision pour l'élimination des déchets industriels spéciaux.

DECHAIDE est un outil informatique développé à l'INSA de Lyon ^[Soares 94], dont l'objectif est de proposer à l'utilisateur le traitement le plus approprié pour son déchet en fonction des caractéristiques de celui-ci. Le but est avant tout de faire prendre conscience à l'utilisateur des différentes possibilités qui s'offrent à lui en terme de traitement et de lui faire réaliser le lien qui peut exister entre les caractéristiques du déchet et les filières de traitement applicables. L'outil propose une ou plusieurs filières au terme d'une session visant à caractériser le déchet le plus complètement possible. Le système ne fournit aucune information sur la législation ou sur la toxicité d'un déchet. Il ne permet pas, non plus de faire le lien avec les centres de traitement existant. Enfin, l'aspect valorisation n'est pas abordé.

DECHAIDE constitue cependant une référence essentielle sur les filières d'élimination des déchets. En effet, pour construire ce système, son auteur a du, avant tout, faire un bilan des filières d'élimination disponibles et identifier pour chacune d'elles, les critères permettant de décider de sa compatibilité avec un déchet donné. Ces critères, utilisés au niveau de l'outil informatique sont aussi explicités dans le rapport écrit. Nous nous sommes donc en partie appuyé sur cette référence pour construire le contenu de notre outil.

Structure et principes de fonctionnement de DECHAIDE

DECHAIDE a été conçu comme un système à base de règles autour du générateur de systèmes experts SHERLOCK. Une session DECHAIDE est constituée par un enchaînement de questions à travers lesquelles l'utilisateur doit caractériser son déchet de manière physico-chimique et analytique. Il est impératif de fournir à DECHAIDE l'ensemble des renseignements demandés sans quoi l'outil ne peut fournir une réponse. Les filières proposées sont les suivantes : enfouissement technique, traitements biologiques, incinération classique, incinération avec épuration des fumées, évapo-incinération, séparation de phases, décyanuration, déchromatation, neutralisation.

Le raisonnement implanté dans DECHAIDE correspond à une évaluation systématique de la capacité des filières de traitement à traiter le déchet soumis suivant un **ordre de préférence préétabli** :

- incinération,
- traitements biologiques,
- traitements physico-chimiques
- enfouissement technique.

La première filière identifiée comme acceptable est alors proposée par l'outil.

Les critères d'acceptation, exprimés sous forme de règles font appel à la composition du déchet et à des paramètres physico-chimiques comme le PCI (pouvoir calorifique inférieur).

Origine des données et hypothèses de travail

Le point de vue adopté dans DECHAIDE consiste à considérer les filières de traitement suivant un angle essentiellement théorique, ce qui renforce la valeur pédagogique de son outil. Il établit ainsi les critères d'acceptation des déchets en fonction des seuils de rejet des différentes filières relevés dans la réglementation nationale, et des taux de transfert des polluants évalués soit en fonction de modèles issus de la littérature, soit en fonction de données statistiques concernant les filières de traitement. DECHAIDE fait implicitement l'hypothèse que l'ensemble des installations de traitement d'un type donné répond à un modèle unique de comportement. Or il existe de nombreux matériels différents qui peuvent être

utilisés pour un même objectif, et dont le comportement ne suit pas nécessairement les mêmes règles.

L'examen de différents arrêtés de classements d'installations a priori similaires montre aussi à quel point les exigences réglementaires locales peuvent varier. Ces variations peuvent provenir de l'utilisation de matériels différents, de conditions de fonctionnement différentes ou d'une sensibilité de l'environnement local plus ou moins importante à certains facteurs d'impact en raison de critères historiques, sociaux ou environnementaux. Pour cette raison, il n'est pas nécessairement possible d'étendre les résultats de DECHAIDE à l'identification de centres collectifs de traitement.

Choix d'un mode de caractérisation des déchets

La deuxième caractéristique importante de DECHAIDE a trait au mode de caractérisation des déchets choisi. En effet, ses auteurs ont opté pour une caractérisation essentiellement physico-chimique, c'est à dire résultant de l'établissement d'une liste de caractéristiques par mesures physiques et analyses chimiques par opposition à une identification fondée sur la provenance ou la nature apparente du déchet. Ce choix a deux conséquences :

- une conséquence positive : le déchet étant parfaitement caractérisé, on peut supposer que l'ensemble des critères d'admission sera pris en compte lors du raisonnement, et, par conséquent, que le résultat final sera plus fiable.

- une conséquence négative : pour répondre aux questions de DECHAIDE, **l'utilisateur doit avoir procédé à une analyse très complète du déchet**. Cette approche interdit l'utilisation de DECHAIDE comme outil de première orientation d'un déchet préalable à l'obtention d'un certificat d'acceptation, ou comme outil de contrôle d'une orientation a posteriori à partir de documents incomplets comme le bordereau de suivi des déchets. Elle ne permet pas non plus de prendre en compte des déchets spécifiques tels que les huiles, les piles ou les emballages pour lesquels la fonction initiale du déchet conditionne son traitement tout autant que ses caractéristiques physico-chimiques.

Les modifications à apporter à DECHAIDE se situent donc à plusieurs niveaux :

a) - Introduction de filières de valorisation

DECHAIDE est actuellement limité aux filières d'élimination des déchets. Dans le contexte actuel résultant de la loi du 13 juillet 1992, il devient indispensable de considérer aussi les possibilités de valorisation des déchets.

b)- Information sur le traitement externe (localisation des filières)

L'outil ne permet pas actuellement d'identifier le centre de traitement susceptible de traiter un déchet. Or ceci constitue une des demandes principales de petits industriels qui n'ont pas les moyens d'investir dans une unité de traitement interne. Nous verrons par la suite que DECHAIDE n'est pas nécessairement adapté à la recherche de centres de traitement, en raison notamment des hypothèses de base du système.

c)- Prise en compte des critères économiques et environnementaux

La sélection de filières de traitement ne peut se faire en couplant uniquement un critère technique à un critère réglementaire. Il faudrait aussi faire intervenir dans le choix de la solution de traitement les critères économiques, auxquels les entreprises sont très sensibles, et les critères environnementaux. Il s'agit alors de comparer l'impact des filières de traitement sur l'environnement.

d)- Prise en compte de déchets spécifiques

Le fait d'identifier les déchets uniquement à partir de leurs caractéristiques physico-chimiques entraîne certaines limitations. En particulier, il devient impossible de discerner les déchets spécifiques tels que les piles, les huiles, les emballages souillés pour lesquels la fonction initiale (lubrifiant, emballage, générateur d'électricité) peut jouer un rôle prépondérant dans le choix des modes de traitement. Ces déchets requièrent en effet un traitement particulier, soit en raison de textes réglementaires spécifiques les concernant, soit parce qu'il est possible d'envisager un réemploi (emballages, huiles, solvants). La prise en compte de ces déchets spécifiques requiert le passage à un autre mode d'identification.

e)- Prise en compte de données fragmentaires

DECHAIDE ne permet pas actuellement une caractérisation du déchet à partir de données fragmentaires. De nombreux producteurs de déchets ne disposent pas nécessairement d'analyses complètes lorsqu'ils entreprennent de chercher une solution de traitement. Très souvent ces analyses complètes sont effectuées par le centre de traitement sélectionné, qui délivre ou non un certificat d'acceptation à l'issue de cette caractérisation. Pour aider le producteur de déchets, il est donc intéressant de pouvoir orienter le déchet à partir d'informations minimales, celles-ci pouvant être complétées par des données analytiques plus précises si elles existent.

2.2) Autres outils appliqués au domaine des déchets

Nous avons pu relever dans la littérature ou sur Internet un certain nombre d'autres outils destinés à améliorer la gestion des déchets industriels spéciaux. Certains de ces outils constituent de véritables systèmes d'aide à la décision pour le traitement. D'autres en revanche ne concernent que des aspects annexes ou très spécifiques. Nous commenterons brièvement ces outils.

Serveur WMTADS^[WMTADS]

Internet constitue depuis peu un nouveau support d'information. Il permet d'accéder notamment à des bases de données ou des pages d'information. Parmi celles-ci nous avons identifié le serveur WMTADS (Waste Management Technology Analysis and Decision Support) du United States Department of Energy qui propose un véritable système d'aide à la décision pour le traitement des déchets spéciaux. Il contient les informations issues du MWIR (Mixed wastes information report). Une interface permet de caractériser le déchet en plusieurs étapes. La caractérisation consiste à identifier d'abord la matrice du déchet dans une liste arborescente puis à identifier les contaminants dans une liste de contaminants. Une fois le déchet caractérisé, l'outil fournit un schéma des opérations de traitement qui doivent être

effectuées ainsi que les flux générés par chaque opération de traitement. Ces étapes sont décrites dans la figure I-6.

La classification des déchets utilisée fait intervenir en premier lieu l'état physique et la nature banale ou spéciale du déchet, puis la nature chimique principale du déchet, et, enfin, le contaminant principal. Les contaminants considérés dans la deuxième étape de caractérisation sont identifiés par leur nom ou leur famille (mercure, métaux toxiques, acides...) ou bien par leurs propriétés (explosifs, inflammables...). Le serveur WMTADS ne permet pas de prendre en compte la teneur effective en un polluant particulier. Il ne permet pas non plus d'identifier le centre de traitement où faire traiter le déchet.

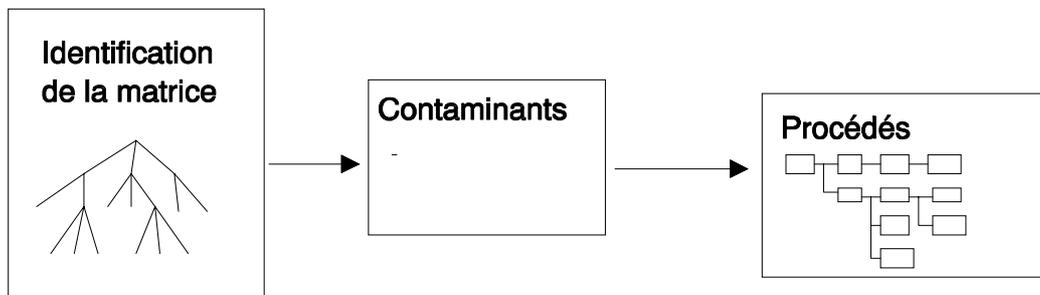


Figure I-6 : structure du serveur WMTADS

autres outils

Plusieurs autres systèmes d'aide à la décision ont vu le jour au cours des années 1980. La production s'est considérablement ralentie à partir de 1990. Parmi les principaux outils, un nombre important est destiné à traiter les problèmes à l'échelle d'une région. Les problèmes traités sont alors relatifs à la localisation d'installations sur des critères environnementaux ou liés aux coûts de transports, au dimensionnement d'installations en fonction du flux de déchets produit.

D'autres systèmes plus anciens permettent d'identifier les risques relatifs à certains déchets en fonction de leur identité. Ces systèmes font essentiellement le lien entre des nomenclatures officielles et des caractéristiques de danger ou, parfois des techniques de traitement.

Enfin, une autre catégorie de systèmes s'intéresse à l'évaluation de la pertinence d'opérations de recyclage en fonction de critères économiques. Ces outils font intervenir des modèles économiques complexes mais négligent l'étape d'identification des technologies applicables à un type de déchet donné.

En dehors de DECHAIDE et du serveur WMTADS, nous n'avons pas identifié d'outil d'aide à la décision à même de répondre au moins partiellement aux besoins identifiés au chapitre I.

2.3) Bases découlant de l'étude des outils existants

L'examen des différents documents et outils disponibles pour la gestion des déchets nous a permis de mettre en évidence plusieurs points importants :

- Il n'existe à notre connaissance aucun outil, permettant de répondre facilement et de manière méthodique aux préoccupations des producteurs de déchets et des institutions en charge du contrôle et du conseil (c.f. chapitre I.10), à savoir :

- identification et la caractérisation du déchet ;
- compréhension du contexte réglementaire qui s'y rattache et des obligations qui en découlent ;
- identification et la sélection de solutions de valorisation et d'élimination ;
- information technique et économique sur ces solutions.

- En revanche, l'information nécessaire à l'orientation des déchets vers des filières de traitement est en grande partie contenue dans les documents étudiés.

- Tous les outils étudiés, quelque soit leur support, sont construits autour d'un système d'identification ou de caractérisation des déchets différent. Suivant le contexte, ce système peut faire intervenir les nomenclatures officielles, les caractéristiques physico-chimiques du déchet, les caractéristiques du procédé générateur du déchet. Il semble que l'un des enjeux du développement d'un outil d'aide à la décision pour le traitement des déchets soit la proposition

d'un système d'identification/caractérisation des déchets compatible avec les pratiques industrielles, les exigences réglementaires et suffisamment souple pour être évolutif et adapté à notre besoin.

- Deux outils peuvent servir de point de départ à notre réflexion : DECHAIDE et le serveur WMTADS. Il s'agit de deux outils informatiques d'aide à la décision qui permettent d'identifier les filières d'élimination pour un déchet donné. DECHAIDE fait appel à une caractérisation physico-chimique poussée du déchet alors que WMTADS repose sur une identification du déchet dans un système arborescent, qui ne permet pas de prendre en compte sa composition exacte. Ces deux outils ne permettent pas d'identifier des solutions de valorisation ni de traiter les aspects réglementaires.

A l'issu du premier chapitre, il était apparu intéressant de développer un système d'aide à la décision. Nous en avons examiné plusieurs dans ce chapitre, qui se sont révélés insuffisants par rapport aux besoins identifiés précédemment. Ceci nous conforte dans notre objectif de mettre au point un tel outil. Dans le chapitre qui suit, nous allons nous intéresser aux supports et aux méthodes qui permettent de construire un système d'aide à la décision.

III Systèmes d'aide à la décision

Le terme "système d'aide à la décision" désigne, suivant le contexte, des notions très diverses. Parmi tous les modèles de décision les plus connus (voire annexe I-4), le modèle S.T.I. fait une place importante au processus cognitif qui permet la description d'un problème, l'identification de son contexte et de ses solutions. L'information y joue un grand rôle. Il présente en particulier l'intérêt de considérer que le décideur ne connaît pas *a priori* les solutions au problème qu'il se pose. Dans le contexte de l'aide au choix de solutions de gestion et de traitement des déchets industriels, dont nous avons évoqué la complexité dans les chapitres précédents, c'est naturellement vers ce type de modèle que nous allons nous tourner, et plus particulièrement vers les outils qui en sont issus : les S.I.A.D., systèmes interactifs d'aide à la décision.

1) Systèmes interactifs d'aide à la décision (S.I.A.D.)

Du modèle S.T.I. de la décision proposé par H. Simon^[Simon 80] est née une catégorie d'outils informatiques que les auteurs francophones nomment des systèmes interactifs d'aide à la décision (S.I.A.D.). La diversité de ces outils et des points de vue de leurs auteurs rend délicate toute tentative de définition précise de ce que sont les S.I.A.D. On peut admettre qu'il s'agit de systèmes destinés à résoudre des problèmes dans le but d'améliorer la prise de décision. D'après P. Lévine et J.C. Pomerol^[Lévine 89], les S.I.A.D. font tous appel plus ou moins directement à la reproduction du raisonnement humain pour résoudre des problèmes dans un contexte de rationalité limitée. La plupart des S.I.A.D. utilisent des données, des modèles de représentation et une stratégie de recherche de solution qui s'inspire de la manière dont un humain utiliserait ces données et ces modèles d'une façon plus ou moins explicite pour aboutir à une solution satisfaisante. Ainsi, les principaux modules composant un S.I.A.D. sont^[Lévine 89] :

Une interface de dialogue qui assure les fonctions de représentation et de manipulation des représentations et permet le contrôle de l'utilisateur.

Une base de données qui assure la fonction de mémoire.

Une base de modèles qui assure les fonctions de traitement.

Suivant la nature du système, ces modules peuvent prendre différentes formes. La base de données peut ainsi constituer un système d'information classique, une base de faits pour un système expert ou une base de cas. La base de modèles peut contenir des modèles mathématiques ou bien des règles de production, ou être en fait représentée par la structure même d'un système d'information et les traitements associés.

La notion de S.I.A.D. est indépendante du support informatique choisi pour le développer. Ainsi, parmi les S.I.A.D. classiques peut on trouver des applications générées à l'aide de tableurs ou de systèmes de gestion de base de données (SGBD), des systèmes experts, des programmes de simulation numérique discrète ou continue.

2) Structure des S.I.A.D.

Bien que ceci ne constitue pas une règle absolue, il est courant de séparer dans un S.I.A.D. les connaissances relatives au domaine concerné par l'outil, données (ex: le produit de solubilité de l'hydroxyde de cuivre) ou modèles (ex: formule donnant la quantité de boue générée en fonction de la concentration en ion métallique), d'une part et les outils informatiques qui assurent leur gestion d'autre part (le programme qui détermine dans quel ordre et sous quelles conditions les données sont utilisées). Dans un système expert on parlera ainsi de base de connaissance et de moteur d'inférence. Cette distinction est parfois moins nette. Ainsi, un S.I.A.D. construit à l'aide d'un S.G.B.D. contient un ensemble de données structurées en tables, des éléments de gestion sous la forme de requêtes et des éléments d'interface sous forme de formulaires ou de masques de saisie. Tous ces éléments sont implantés sur le moteur de la base de données qui permet de les manipuler. La connaissance relative au domaine faisant l'objet du développement du S.I.A.D. est contenue à la fois dans les données, dans leur structure et dans les éléments de gestion : requêtes et masques de saisie. De ce fait, la dichotomie entre connaissance et éléments de gestion de la connaissance n'est pas totalement assurée.

Au niveau de la connaissance, il est fréquent de distinguer la connaissance statique de la connaissance dynamique^{[Ermine 93],[Vogel 88]}. La connaissance statique recouvre l'ensemble des objets et des notions qui constituent le domaine ainsi que leurs instanciations. La connaissance

dynamique est l'ensemble des stratégies qui permettent de résoudre un problème à partir des éléments de connaissance statique.

Le développement d'un S.I.A.D. passe nécessairement par une phase de collecte puis d'organisation de ces différents niveaux de connaissance. Dans le domaine de l'intelligence artificielle on parle souvent de génie cognitif ou d'ingénierie des connaissances. D'autres approches plus classiques font référence au génie logiciel sans identifier particulièrement cette étape d'acquisition des connaissances, même si celle-ci fait nécessairement partie du processus de spécification d'un outil informatique.

Il existe de nombreuses méthodes d'acquisition des connaissances, que nous ne détaillerons pas ici. Elles permettent, en général d'aboutir à un modèle de données représentant la connaissance statique et un modèle de traitement de ces données qui représente la connaissance dynamique.

3) Supports pour la réalisation d'un système d'aide à la décision

Nous avons déjà cité plusieurs supports possibles pour la réalisation de systèmes d'aide à la décision. Un support peut être plus ou moins bien adapté à un objectif ou un type de données. Les critères qui entrent en ligne de compte sont variés. On peut citer la facilité de mise à jour des données, la facilité de développement, l'importance relative des connaissances statiques et dynamiques, le caractère évolutif de la connaissance statique, le nombre de concepts maniés par l'outil.

3.1) Tableurs

Les tableurs sont cités par Lévine et Pomerol^[Lévine 89] comme le support le plus courant pour le développement de S.I.A.D. Ils permettent en effet une implantation rapide de modèles simples de simulation et ne nécessitent pas de connaissances informatiques de haut niveau. Ils contiennent en général des outils de représentation graphique qui facilitent la compréhension des résultats.

En revanche, les tableurs présentent plusieurs inconvénients qui limitent leur utilisation dans des cas plus complexes. Il est difficile d'implanter des éléments de raisonnement sur un tableur. L'interprétation des résultats de simulation doit donc être effectuée par l'utilisateur. Ils sont aussi mal adaptés à des problèmes faisant intervenir des concepts et des données de natures différentes en raison de leur faible capacité à établir des liens entre les données.

3.2) Bases de données

Les bases de données permettent d'archiver des données structurées en tables. Les tables peuvent être liées entre elles par des relations qui rendent compte des relations existant entre les données. A l'aide de requêtes, il est possible d'extraire des données suivant des critères ou d'effectuer des calculs. En enchaînant des requêtes, on peut effectuer des opérations complexes ou reproduire des étapes simples de raisonnement. Il est donc possible d'utiliser les bases de données pour simuler un raisonnement de manière interactive.

L'introduction de données dans une base de données nécessite un degré élevé de modélisation. Ceci constitue un avantage dans la mesure où le développeur du S.I.A.D. est obligé de bien comprendre les entités de la connaissance statique et leurs relations avant d'envisager de développer l'outil. Mais c'est aussi un inconvénient puisque cela rend très difficile l'introduction de nouveaux concepts au sein du modèle. En revanche, le fait de disposer d'un modèle stable et bien identifiable rend la connaissance plus compréhensible pour l'utilisateur et facilite l'introduction de données, qui constituent des instanciations des éléments du modèle.

3.3) Systèmes à base de connaissance

Par systèmes à base de connaissance, on entend les systèmes qui permettent de faire une distinction totale entre la connaissance et les éléments de gestion de cette connaissance. Parmi ces systèmes, il existe plusieurs formalismes que nous n'allons pas détailler. Le plus connu est sans doute celui des systèmes à base de règles, les plus utilisés pour la réalisation de systèmes experts. DECHAIDE est un système à base de règles.

Un système à base de règles est composé de trois entités : les règles, les faits et le moteur d'inférence. Les règles permettent d'exprimer des éléments du raisonnement sous la forme Si Condition Alors Conclusion et Action. Les conditions et les conclusions portent sur les faits contenus dans la base de faits. Par exemple, la règle *si le déchet est solide et minéral et si son comportement à la lixiviation est conforme à la réglementation alors le déchet est admissible en C.E.T. de classe I* vérifie l'existence du fait *le déchet est solide et minéral et si son comportement à la lixiviation est conforme à la réglementation* avant de conclure sur le fait *le déchet est admissible en C.E.T. de classe I*. Le moteur permet d'enchaîner les règles afin d'aboutir à une conclusion qui peut être le résultat du parcours systématique de l'ensemble des règles activées par les faits de la base de faits - il s'agit du chaînage avant - ou la vérification d'un fait - on parle alors de chaînage arrière.

Il est communément admis que les systèmes à base de règles permettent d'introduire la connaissance de manière très souple, et presque indépendante des formalismes choisis. Les règles, reposant sur la structure classique Si...Alors.. peuvent théoriquement être archivées dans un ordre quelconque, le moteur d'inférence identifiant la règle utile à chaque étape du raisonnement. Cependant, la pratique montre que dans le cas de systèmes faisant intervenir de nombreuses règles, il est nécessaire de très bien maîtriser la structure des données pour pouvoir ajouter une règle qui puisse être utilisée de manière appropriée par le moteur d'inférence sans remettre en cause les conclusions du système théoriquement indépendantes de la règle introduite. De plus, le formalisme des règles peut se révéler inadapté dans le cas où un grand nombre de données sont mises en jeu pour un nombre limité de concepts.

3.4) Langages de programmation procéduraux

Une dernière solution consiste à recourir aux langages de programmation classiques. Ceci est possible lorsque la connaissance est bien formalisée et bien structurée. Il s'agit alors souvent d'implanter des modèles mathématiques qui serviront à simuler des situations réelles. Les résultats des simulations servent alors de base au choix d'une solution. La difficulté principale de cette approche réside dans l'imbrication des connaissances et des éléments de gestion de ces connaissances, qui rend difficile leur modification par un non-informaticien.

Dans la suite de ce travail, nous allons présenter deux systèmes d'aide à la décision pour le traitement de déchets industriels spéciaux. Ces outils ont été développés à partir d'un système de gestion de bases de données dans une double optique :

formaliser et fixer les concepts de base et la connaissance de contrôle (les raisonnements),
faciliter l'introduction d'instances représentatives de ces concepts, c'est-à-dire la mise à jour de l'outil.

IV CONCLUSION : Des constats aux objectifs

Dans cette première partie, nous nous sommes attachés à mettre en évidence les besoins en termes d'outils d'aide à la décision pour le traitement de déchets industriels spéciaux. Nous avons pour cela tenté de faire ressortir les motivations des industriels pour chercher des solutions de traitement innovantes. Ces motivations sont principalement :

le constat de l'impact des déchets sur les milieux naturels,

la pression réglementaire issue notamment de la loi du 13 juillet 1992 sur le traitement des déchets spéciaux. Cette loi fixe en particulier des priorités nouvelles qui sont : la réduction à la source, la valorisation.

de nouvelles pratiques industrielles d'action volontaire en faveur de l'environnement à travers les procédures d'éco-audit et de certification environnementale.

Les solutions de traitement sont nombreuses, qu'il s'agisse d'élimination ou de valorisation. Elles font aussi l'objet d'approches très diverses, qui ne facilitent pas le choix des industriels. Suivant le point de vue considéré, on s'intéresse plutôt au centre susceptible de traiter le déchet, au procédé qu'il faut mettre en oeuvre ou à l'objectif de valorisation qu'il faut poursuivre. Les éléments qui permettent de choisir une solution plutôt qu'une autre ne peuvent pas être identifiés dans la réglementation. Ceci nous a amené à définir les objectifs d'un système d'aide à la décision, destiné essentiellement aux P.M.E., capable de gérer les liens existant entre les différents aspects techniques, réglementaires et économiques du traitement des déchets spéciaux. Ce système devrait permettre :

l'identification et la caractérisation du déchet ;

la compréhension du contexte réglementaire qui s'y rattache et des obligations qui en découlent ;

l'identification et la sélection de solutions de valorisation et d'élimination ;

l'information technique et économique sur ces solutions.

L'examen des différents documents et systèmes d'aide à la décision existant nous a permis de vérifier qu'aucun de ces outils ne rempli complètement les objectifs fixés. Nous avons pu mettre en évidence la variété des approches et identifier les outils de référence que sont

DECHAIDE et le serveur américain WMTADS. Tous les documents et logiciels étudiés font ressortir l'importance du mode d'identification et de caractérisation du déchet.

Enfin, nous avons essayé de préciser notre conception des systèmes d'aide à la décision et de faire un bilan des différents supports disponibles pour le développement d'outils d'aide à la décision pour le traitement des déchets.

Dans les deux autres parties de cette thèse, nous allons décrire la démarche qui a conduit au développement de deux systèmes d'aide à la décision pour le traitement de déchets industriels spéciaux. Le premier permet d'orienter les déchets vers des centres collectifs de traitement après identification et caractérisation. Le second, est destiné à proposer des solutions de valorisation ou d'élimination en interne pour les déchets de l'industrie du traitement de surface. Nous avons été amené à séparer les deux démarches en raison du caractère commercial du premier logiciel, qui a été développé pour l'Ademe, et parce que le traitement interne nécessite de prendre en compte des données relatives à l'unité productrice du déchet, ce qui génère un volume considérable d'information.

DEUXIEME PARTIE : aide à la décision pour l'orientation des déchets spéciaux vers des centres collectifs de traitement

I Introduction

Dans la première partie, nous avons introduit le contexte de la gestion des déchets industriels spéciaux et montré l'apport potentiel d'un système d'aide à la décision capable de gérer les liens existant entre les différents aspects techniques, réglementaires et économiques du traitement des déchets. Nous allons décrire dans cette seconde partie la démarche qui a conduit à la réalisation d'un système d'information pour la caractérisation des déchets industriels spéciaux et leur orientation vers de centres collectifs de traitement. Cet outil informatique a été développé pour répondre à un besoin particulier de l'Ademe consistant à identifier rapidement et facilement les centres de traitement susceptibles de traiter un déchet donné et les filières à utiliser en fonction des caractéristiques physico-chimiques du déchet. Cet outil doit aussi fournir des informations sur la réglementation applicable au déchet identifié.

Le but étant d'utiliser ultérieurement cet outil dans les délégations régionales de l'Ademe, il était nécessaire d'adopter un point de vue pragmatique, susceptible de déboucher sur des réponses concrètes et réalistes, plutôt que sur un traitement optimum théorique. Nous verrons les conséquences de ce choix sur les modèles choisis et les structures de l'outil.

Dans les chapitres qui suivent, nous allons essayer de faire ressortir la démarche et les choix qui ont été faits. Nous n'aborderons pas de façon exhaustive le contenu de l'outil, mais nous illustrerons son fonctionnement à partir de quelques exemples, et nous tenterons surtout de mettre en valeur son évolutivité.

II Etapes de réalisation

La réalisation du système d'aide à la décision s'est faite en plusieurs phases :

- étude préalable du contexte et analyse de l'existant ;
- définition des objectifs de l'outil et établissement d'un cahier des charges ;
- acquisition des connaissances en vue d'aboutir à un modèle de raisonnement et à une structure de données : les connaissances de contrôle ;
- choix d'un support informatique ;
- implantation de la structure et des mécanismes de raisonnement ;
- acquisition des connaissances constituant les éléments de raisonnement et de réponse : les connaissances du domaine ;
- implantation des connaissances du domaine ;
- tests et validation du logiciel.

Ces étapes constituent des phases classiques de développement de systèmes à base de connaissance et des systèmes d'information. Nous nous sommes placés d'emblée dans le contexte des systèmes à base de connaissance en raison de la distinction que nous souhaitons faire entre les aspects purement informatiques et les aspects liés au domaine d'application : le traitement des déchets industriels spéciaux. Cette volonté résulte de l'analyse du contexte qui fait apparaître une grande évolutivité technique et réglementaire du domaine des déchets.

Nous avons ainsi distingué deux phases d'acquisition de la connaissance :

- une première phase destinée à identifier les mécanismes du raisonnement et la nature des données qui entrent en jeu, à l'issue de laquelle il a été possible de définir une structure de données et les tâches nécessaires au traitement de ces données,
- une deuxième au cours de laquelle nous avons recueilli et implanté les données qui sont utilisées par le système lors de la description du déchet et l'identification des solutions de traitement.

III Spécification d'un outil d'aide à la décision pour le traitement externe des déchets

Le cahier des charges de notre outil a été défini en collaboration avec l'Ademe.

L'outil doit remplir trois fonctions :

- une fonction d'**aide à la décision**,
- une fonction d'**information**,
- une fonction d'**archivage**.

Il doit être facile à utiliser, à mettre à jour et à faire évoluer.

1) Fonction d'aide à la décision

La fonction d'aide à la décision est répartie en trois phases :

- aide à la formulation du problème

Il s'agit de guider l'utilisateur dans la description de son déchet, en lui proposant une approche progressive et adaptée à ses connaissances.

- identification de solutions de traitement

Une solution de traitement est constituée par un ensemble de filières applicables et un ensemble de centres susceptibles de traiter le déchet

- identification des textes réglementaires applicables

Dans la mesure où ils existent, on doit pouvoir fournir à l'utilisateur les références des textes relatifs au déchet soumis au logiciel.

2) Fonction d'information

La fonction d'information doit accompagner les différentes phases de l'aide à la décision. Il s'agit de fournir à l'utilisateur des renseignements sur les différents éléments de question et de réponse obtenus :

- information liée à la formulation du problème

Cette information est relative aux différents paramètres d'identification. Elle doit permettre à l'utilisateur de comprendre les questions posées à l'utilisateur sans être directement nécessaire au raisonnement.

- informations sur les solutions de traitement

Il s'agit de toute information utile à la compréhension des éléments de réponse fournis par l'outil ainsi que de toute information permettant de lier ces éléments entre eux. Par exemple, ce peut être l'adresse d'un centre, le nom de son propriétaire, l'agence de l'eau qui le conventionne...etc.

- information de nature réglementaire

Ce sont les éléments qui permettent de connaître et de comprendre le contenu des textes référencés.

3) Fonction d'archivage

L'outil doit aussi servir de base de données sur le traitement des déchets industriels spéciaux. Il doit permettre d'archiver, de mettre à jour et d'exploiter les informations relatives aux :

- centres de traitement : adresse, propriétaire, exploitant, tonnages traités au cours des dernières années, conventionnement...
- filières de traitement : descriptif, codes, conventionnement.
- textes réglementaires : titre, date d'émission, date de publication, contenu, modifications..

Si la dernière fonction ne présente pas un caractère innovant, les deux précédentes, en revanche posent des questions quant à la manière de proposer une aide à la décision pertinente et aux informations correspondantes à fournir à un utilisateur.

IV Acquisition des connaissances : nature des raisonnements et des données

Cette première phase d'acquisition des connaissances a pour but de recenser les types de données impliquées dans les différentes fonctions du S.I.A.D. et de mettre à jour les raisonnements. Elle nécessite tout d'abord de spécifier les entrées et les sorties du système d'aide à la décision, c'est-à-dire respectivement les éléments de description des déchets et les éléments de réponse du système (centres de traitement, filières de traitement et textes réglementaires). Ensuite, pour chaque élément de réponse, il s'agit d'identifier les paramètres de choix et le mécanisme permettant d'aboutir à une décision à partir de ces paramètres.

1) Spécification des entrées et sorties

1.1) Entrées

Il s'agit de définir le niveau de connaissance de l'utilisateur et les caractéristiques du problème qu'il souhaite soumettre au système.

L'utilisateur type peut être une personne ayant des connaissances en chimie limitées. Il peut s'agir d'un producteur ou d'un employé d'une administration chargée du contrôle (DRIRE, douane) ou du conseil (Ademe, agences de l'eau). Il souhaite identifier des solutions de traitement externe d'un déchet pour lequel il dispose d'une information variable. Nous pouvons supposer qu'il a vu le déchet ou qu'il dispose d'une description de l'état physique de celui-ci (par le biais du bordereau de suivi, par exemple). La plupart du temps il connaît soit son identité dans la nomenclature Française, soit une identité relative au procédé générateur. Enfin, dans certains cas, des résultats d'analyse sont disponibles.

1.2) Sorties

L'outil propose d'une part les solutions de traitement, et d'autre part les données réglementaires correspondantes.

1.2.1) Filières de traitement

Les solutions de traitement se composent de **filières de traitement** et de **centres de traitement**. Nous avons vu en première partie que la notion de filière pouvait être relativement variable suivant le point de vue que l'on adopte. Elle donne lieu à différentes classifications, que nous pouvons rappeler : classification suivant les objectifs, classification suivant les procédés, classification suivant les types de déchets, classification hybride des agences de l'eau. Dans le contexte du traitement externe, il est important de fournir à l'utilisateur une information qui lui permette de communiquer avec les différents acteurs auxquels il sera confronté (DRIRE, agences de l'eau, centres de traitement, douanes).

La classification des agences de l'eau est de loin la plus utilisée, notamment par les centres de traitement. Connaître la filière dont est justiciable le déchet selon la classification des agences de l'eau permet d'obtenir des informations sur le financement du traitement, puisque cette classification est utilisée pour définir la liste des centres conventionnés. En revanche, dans sa forme actuelle, elle ne prend pas en compte les filières de valorisation.

Les autres classifications nous ont paru moins adaptées à nos besoins, essentiellement parce qu'elles sont soit trop générales (approche par objectif), soit trop spécifiques (approche par procédé).

Nous avons donc choisi d'utiliser la nomenclature des agences de l'eau pour désigner les filières de traitement en la complétant pour les filières de valorisation. La liste des filières introduites dans notre outil à ce jour est donnée dans le tableau II-1.

code filière	intitulé	type traitement
01	Déchromatation	Physico-chimique
02	Décyanuration	Physico-chimique
04	Neutralisation des solutions acides	Physico-chimique
04 bis	Précipitation métallique	Physico-chimique
05	Neutralisation des solutions alcalines	Physico-chimique
06	Régénération de résines échangeuses d'ions	Valorisation
07	Déshydratation mécanique	Physico-chimique
08	Solidification, stabilisation	Physico-chimique
10	Séparation de phase d'émulsions	Physico-chimique
12	Traitement spécifique d'eaux résiduaires	Physico-chimique
201	Incinération des déchets contenant des PCB/PCTou chlorophénols en unité spécialisée	Thermique
203	Décontamination d'huiles souillées par PCB<1%	Physico-chimique
21	Incinération en installation munie d'un dispositif de neutralisation des fumées de déchets halogénés	Thermique
22	Evapo-incinération	Thermique
23	Incinération de déchets liquides à sujétions particulières	Thermique
25	Incinération classique des déchets industriels	Thermique
28	Incinération en cimenteries	Thermique
41	Enfouissement profond des déchets toxiques	Stockage
43	Tri, reconditionnement et traitement des déchets de laboratoire en petit conditionnement (<25 litres)	Divers
44	Produits toxiques divers en petits conditionnements (<100 litres)	Divers
50	Mise en décharge de classe I	Stockage
60	Mise en décharge de classe II	Stockage
DMS	Décontamination de déchets minéraux souillés de matière organique	Physico-chimique
IHU	Incinération d'huile usagée non régénérables	Thermique
PAC	Production d'acide chlorhydrique à partir de déchets chlorés	Valorisation
PAS	Production d'acide sulfurique à partir de déchets organiques soufrés	Valorisation
Pre	Préparation de charges, regroupement en vue de l'incinération	Divers
Rej	Rejet sans traitement	Divers
RHC	Régénération huiles usagées claires	Valorisation
RHU	Régénération d'huiles usagées noires	Valorisation
RMD	Récupération de métal dissout pour valorisation	Valorisation
RSU	Régénération de solvants usagés	Valorisation
TEP	Traitement des emballages pollués	Divers
THg	Traitement spécifique des déchets mercuriels	Physico-chimique
TSS	Traitement des sels solides par mise en solution et détoxication	Physico-chimique
VMC	Valorisation matière en cimenterie	Valorisation
VMM	Valorisation matières minérales et métalliques	Valorisation
VTC	Valorisation thermique en cimenterie	Valorisation

Tableau II-1 : Liste des filières considérées

1.2.2) Centres de traitement

Nous désignerons par centre de traitement, dans la suite de ce rapport, toute installation autorisée au titre de la loi sur les installations classées à traiter des déchets provenant d'autres

entreprises. Par traitement, nous entendons aussi bien élimination que valorisation. Nous avons recensé à ce jour une liste de 129 centres de traitement, qui est fournie en annexe II-1.

1.2.3) Non-correspondance entre les filières de traitement et les centres de traitement

Même s'il est possible de connaître, pour un centre donné, les filières de traitement qu'il propose, il n'est pas possible, en revanche, de déduire de la liste des filières adaptées à un déchet la liste des centres susceptibles de le traiter. Il y a trois raisons à cette non correspondance :

- les centres ne sont pas tous équipés du même matériel. Les contraintes propres à chaque centre peuvent donc varier.
- des différences de sensibilité locales et des différences historiques peuvent entraîner des normes de rejet différentes entre deux centres de traitement.
- enfin, certains centres peuvent être autorisés à traiter un déchet alors même que les filières qu'ils pratiquent sont théoriquement inadaptées. Par exemple, certaines cimenteries sont autorisées à introduire une fraction d'effluents aqueux dans leur clinker.

1.2.4) Références réglementaires

Le troisième élément de réponse du système d'aide à la décision est constitué par les références réglementaires. Il s'agit, de fournir les textes réglementaires auxquels doit se référer un producteur de déchet avant d'entreprendre le traitement de son déchet.

2) Connaissance associée aux filières de traitement

Nous allons maintenant établir le raisonnement aboutissant à la sélection d'une filière de traitement. Pour cela, nous allons d'abord identifier les critères généraux de sélection d'une filière. Dans un deuxième temps, nous étudierons les différentes sources d'information, réglementaires et techniques, qui nous permettront d'établir les critères spécifiques de sélection des filières. De l'expression de ces différents critères nous essayerons de déduire la

structure de données et le raisonnement qu'il faudra implanter dans un système d'aide à la décision pour le traitement externe de déchets industriels spéciaux.

2.1) Critères généraux de sélection

D'une manière générale, une action est caractérisée par son objectif, ses moyens et ses résultats^[IFEN 93]. Elle peut être évaluée par trois critères : sa pertinence, son efficacité et son efficacité (figure II-1). La pertinence représente l'adéquation des moyens par rapport aux objectifs, l'efficacité permet d'évaluer la conformité des résultats par rapport aux objectifs et l'efficacité rend compte des résultats en fonction des moyens.

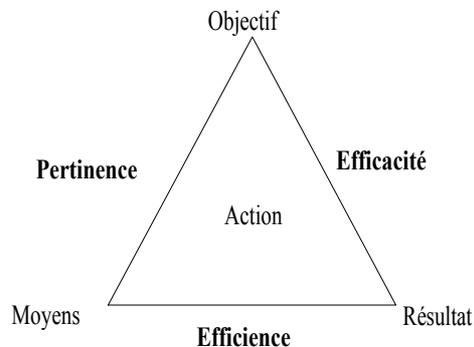


Figure II-1 : Caractérisation et évaluation d'une action ^[IFEN 93]

L'objectif de l'action à laquelle nous nous intéressons est de traiter le déchet. Cet objectif est défini en fonction d'un système de référence constitué habituellement par les seuils de rejet réglementaires. Les moyens correspondent à l'ensemble des opérations de la filière de traitement. Le résultat se compose de trois éléments : un flux de matière valorisée, un déchet ultime et un rejet vers le milieu naturel.

Dans ce contexte, la **pertinence** du traitement dépend de :

- la **compatibilité physico-chimique** du déchet avec la finalité de la filière,
- la **compatibilité réglementaire** du déchet avec la filière,
- la compatibilité du déchet vis-à-vis du **fonctionnement** de la filière.

Son **efficacité** correspond à :

- l'efficacité de la filière pour l'**élimination** ou la rétention d'un polluant contenu dans le déchet,

- l'efficacité de la filière pour la **valorisation** de la fraction valorisable.

Enfin, la mesure de l'efficacité peut être envisagée selon différents points de vue :

- **efficacité économique** : il s'agit d'évaluer les coûts et les gains éventuels que représente la filière,
- **efficacité environnementale** : on peut, en théorie, évaluer les impacts du traitement à travers les rejets mais aussi les consommations de matière ou d'énergie nécessaires pour aboutir au résultat escompté. Tous ces effets peuvent être assimilés à un coût environnemental. C'est alors le rapport entre le résultat et le coût environnemental de la filière qui permet de mesurer son efficacité environnementale.

Nous venons de nommer un certain nombre de notions utiles à l'évaluation d'une filière de traitement, qu'il nous faut maintenant préciser.

2.1.1) Finalité

La notion de finalité englobe à la fois l'opération que la filière est censée effectuer et la cible qu'elle vise dans le déchet. Ainsi, la déshydratation mécanique a pour finalité la séparation (opération) d'une phase aqueuse (cible) d'un déchet boueux ou solide. On pourra considérer qu'un déchet est compatible avec la finalité de la filière lorsqu'il contient la cible visée et lorsque l'opération envisagée a un sens.

C'est essentiellement le descriptif de la filière qui permettra de déterminer la nature des déchets visés et les opérations effectuées. L'annexe II-2 présente la finalité des principales filières proposées par les centres collectifs de traitement français.

2.1.2) Légalité

La réglementation n'impose aucune filière de traitement particulière pour un type de déchet donné. En revanche, elle établit, pour certains types de traitement, des catégories de déchets admissibles ou des déchets interdits, qu'elle définit en fonction de leur identité ou bien de

leurs caractéristiques. C'est à partir de ces considérations que nous pouvons établir la légalité d'un traitement.

2.1.3) Fonctionnement

Une filière est constituée par un ensemble de procédés qui mettent en oeuvre des transformations physiques et des réactions chimiques. La qualité de ces opérations dépend, entre autres, du bon fonctionnement de ces procédés. Celui-ci est lié à la valeur de certains paramètres propres (température, pression, ...) ainsi qu'à certaines caractéristiques du déchet (humidité, teneur en sédiments...) qui peuvent être tout à fait indépendants des propriétés pour lesquelles il est traité. Un déchet peut donc être incompatible avec une filière de traitement parce que l'une de ses caractéristiques est susceptible de provoquer un dysfonctionnement de la filière, sans que cette caractéristique ait nécessairement une importance dans un contexte différent.

Dans l'absolu, les paramètres de fonctionnement et leurs valeurs sont dictés par la nature des opérations réalisées, la nature des déchets à traiter et les contraintes que l'on se donne au niveau du résultat. On peut donc dire que l'on a d'une part des caractéristiques de déchets qui imposent des paramètres de fonctionnement particuliers en vue d'obtenir un résultat satisfaisant, et d'autre part, des conditions de fonctionnement qui peuvent être modifiées en raison des propriétés du déchet, entraînant alors un dysfonctionnement de la filière. Ces deux points de vue entraînent des conséquences différentes au niveau du raisonnement.

Dans le premier cas, il s'agit de déterminer les paramètres de fonctionnement nécessaires pour traiter un déchet dans une filière donnée. Il s'agit alors de paramètres externes à la composition du déchet. Pour certaines filières, la valeur spécifique d'un paramètre de fonctionnement ne peut être obtenue que dans des installations particulières. Ainsi, l'incinération des PCB requiert une température élevée, supérieure à 1200 °C, que seuls certains fours sont à même de produire. Dans ce cas, on peut considérer qu'on est en présence d'une nouvelle filière.

Dans le deuxième cas, il s'agit de vérifier si la nature même du déchet ne va pas remettre en cause le fonctionnement de la filière. Il faut donc identifier les paramètres sensibles et les

modèles ou les règles qui les lient aux résultats du traitement ou des opérations unitaires qui le composent.

2.1.4) Efficacité vis-à-vis d'un polluant

Une filière fonctionnant normalement, c'est à dire transformant de la façon prévue la cible du traitement, peut, par ailleurs être totalement inefficace vis-à-vis d'une autre fraction du déchet. Dans ce cas, il peut être nécessaire de recourir à un traitement complémentaire ou bien de choisir une autre filière si aucun traitement complémentaire ne se révèle adapté.

Pour déterminer l'efficacité d'une filière vis-à-vis des polluants, il est d'abord nécessaire de définir l'ensemble des polluants cibles. Pour chacun de ces polluants, on cherchera ensuite à établir une "fonction de transfert", c'est à dire un modèle liant la concentration du polluant dans le déchet à sa concentration dans le rejet final en fonction des paramètres de fonctionnement. Dans de nombreux cas, il sera impossible d'obtenir une expression mathématique pour la fonction de transfert. En revanche, il est parfois possible de déterminer les valeurs limites au delà desquelles le rejet présente des caractéristiques inacceptables. C'est implicitement le cas lorsque la réglementation fixe des limites à la composition d'un déchet admissible dans une filière de traitement.

2.1.6) Références

Nous avons vu que pour pouvoir déterminer l'efficacité d'une filière ou bien les conditions d'un fonctionnement normal, il est nécessaire de disposer d'un système de référence qui fixe les caractéristiques d'un rejet acceptable. Ce système devrait a priori être déduit de l'impact que le rejet des polluants peut avoir sur l'environnement, par l'intermédiaire de relations dose-effet, par exemple. Cependant, il n'est actuellement pas facile d'obtenir de telles relations pour l'ensemble complexe formé par le milieu naturel et humain. Il n'est pas non plus aisé de déterminer ce que devraient être les caractéristiques normales du milieu en absence de dysfonctionnement et quels sont les dysfonctionnements acceptables.

Partant d'informations partielles portant sur des éléments particuliers du système (rats, poissons, algues), il est possible de déterminer des événements inacceptables et les conditions dans lesquels ils ont lieu. On peut alors en déduire les valeurs limites au delà desquelles un dysfonctionnement important est probable. Ces valeurs sont à mettre en regard des moyens d'analyse et de contrôle dont disposent les entreprises et du contexte local auquel elles sont confrontées. C'est de cette démarche complexe que peuvent être déduites des normes de rejet. Certaines sont retraduites au niveau réglementaire, d'autres non. Nous avons préféré nous en tenir aux valeurs imposées par la loi, plutôt que d'entrer dans un processus délicat qui sortirait du cadre de cette thèse. Nous souhaitons aussi proposer un résultat qui puisse être directement utilisable par les entreprises.

2.1.7) Coût

Du point de vue d'un producteur de déchets, le coût du traitement externe d'un déchet correspond en fait à son prix de revient. Celui-ci est déterminé au terme d'un processus commercial qui fait intervenir beaucoup d'autres paramètres que le coût effectif de traitement.

2.3) Nature et origine de l'information associée aux critères de sélection des filières

Nous avons identifié ci-dessus les critères généraux de sélection des filières de traitement. Si les critères de légalité et le système de référence sont relativement simples à obtenir puisqu'issus de la réglementation. En revanche, pour déterminer la finalité, l'efficacité d'une filière vis à vis d'un polluant, l'influence d'un déchet sur le fonctionnement d'un traitement ou encore les paramètres de fonctionnement à appliquer, il faudra s'appuyer sur des sources d'information très variées de nature technique ou scientifique.

Pour les premiers critères, nous nous intéresserons aux sources réglementaires

- de portée nationale, lois, décrets, arrêtés ministériels, qui peuvent concerner directement les filières de traitement,
- et locale, arrêtés préfectoraux principalement, qui concernent les installations de traitement.

Pour les derniers critères, nous suivrons deux approches :

- une approche descriptive, qui permettra d'identifier les finalités des filières de traitement,

- une approche plus scientifique, qui conduira à différents modèles permettant de prédire le comportement d'une filière, et de lier ainsi les caractéristiques d'un déchet et les paramètres de fonctionnement d'un procédé :
 - ◆ aux propriétés de l'effluent qui sera rejeté en marche normale, ce qui permet d'évaluer l'efficacité de la filière ;
 - ◆ aux conditions de fonctionnement.

Nous examinerons certains de ces modèles. Cependant, la difficulté consistera à évaluer les conditions de validité de ces modèles, qui déterminent leur utilisation pour l'aide à la décision.

2.3) Critères spécifiques de sélection

Dans ce qui précède, nous avons identifié les critères de sélection d'une filière de traitement et les sources d'information qui fournissent les modèles et les données spécifiques permettant d'exprimer ces critères pour chaque filière. Nous allons maintenant examiner certains de ces modèles et de ces données. Cette examen ne sera pas exhaustif, notre but étant d'expliquer la démarche ayant conduit au développement de l'outil, d'identifier la structure de données et les traitements associés.

2.4) Finalité des filières de traitement

La première étape de notre recherche est avant tout descriptive. Il s'agit d'identifier les cibles et les opérations des filières de traitement afin d'en déterminer la finalité mais aussi d'ébaucher un système d'identification des déchets qui permette d'évaluer l'adéquation entre un déchet et la finalité d'une filière. Cette identification des cibles passe par une classification des filières de traitement. Nous présentons en annexe II-2 un descriptif de chacune des filières retenues pour notre outil.

2.4.1) Filières d'élimination

L'objectif des filières d'élimination est d'aboutir à un rejet éco-compatible et à un déchet ultime destiné au stockage. La pollution visée par l'élimination est de deux natures :

- minérale,

- organique.

Ces deux types de pollution entraînent deux stratégies de base dont les variantes techniques donnent naissance aux différentes filières de traitement :

- la pollution de nature organique peut être oxydée pour donner lieu à un rejet éco-compatible de gaz carbonique et d'eau,
- la pollution de nature minérale doit être concentrée et fixée sous forme d'un déchet ultime.

Ces deux stratégies font appel à des procédés différents suivant l'état initial des polluants et de la matrice du déchet :

- matrice organique,
- matrice minérale solide,
- matrice minérale liquide,
- polluant constituant la matrice du déchet,
- polluant présent en faible quantité.

2.4.3) Filières de valorisation

Les filières de valorisation sont variées (voire annexe II-2). On peut distinguer les régénérations qui visent à obtenir un produit ayant les mêmes caractéristiques que le produit neuf, les valorisation matière, qui visent à obtenir une matière première à partir d'un déchet complexe ou à utiliser le déchet comme matière première, et la valorisation énergétique.

Pour certaines filières de valorisation, ce sont les caractéristiques physico-chimiques du déchet, notamment la présence d'un composant particulier, qui détermine si le déchet est valorisable.

Pour d'autres filières, principalement les filières de régénération, c'est la fonction initiale du déchet qui est déterminante, car c'est elle que l'on cherche à rétablir.

2.4.4) Classification des déchets

Dans le chapitre précédent, nous avons montré qu'il existe une correspondance entre des catégories de déchets et des filières de traitement. Un examen des catégories cibles nous permet de distinguer deux types d'approches :

- d'une part les filières traditionnelles, thermiques, physico-chimiques et stockage ou certaines filières de valorisation, qui concernent des déchets en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques principales : état physique, nature chimique de la matrice, principaux polluants ;
- d'autre part les filières spécifiques ou certaines filières de valorisation qui s'appliquent à des déchets particuliers issus de procédés spécifiques ou ayant une fonction particulière tels que les huiles, les piles, les solvants ou les résines.

En première approximation, l'identification d'un déchet en fonction de critères simples permet donc d'établir une liste de filières envisageables en tenant compte du seul critère de finalité du traitement. Pour améliorer la fiabilité du résultat, il est alors indispensable de faire intervenir les autres critères : légalité, efficacité vis à vis des polluants, compatibilité avec le fonctionnement.

De cette première approche, nous pouvons extraire une structure de données représentative de la correspondance entre déchets et filières, comme illustré par la figure II-2.

- Nous avons d'une part une liste de déchets structurée en grandes catégories représentatives des principaux états physico-chimiques. Cette liste de déchets comprend par ailleurs des sous catégories correspondant à des déchets spécifiques.
- De l'autre côté, nous disposons d'une liste de filières. La connaissance permettant d'exprimer la possibilité de traiter un déchet par une filière donnée est exprimée par un lien qui existe entre les éléments de ces deux listes, qui résulte de l'identification de la cible de chaque filière.

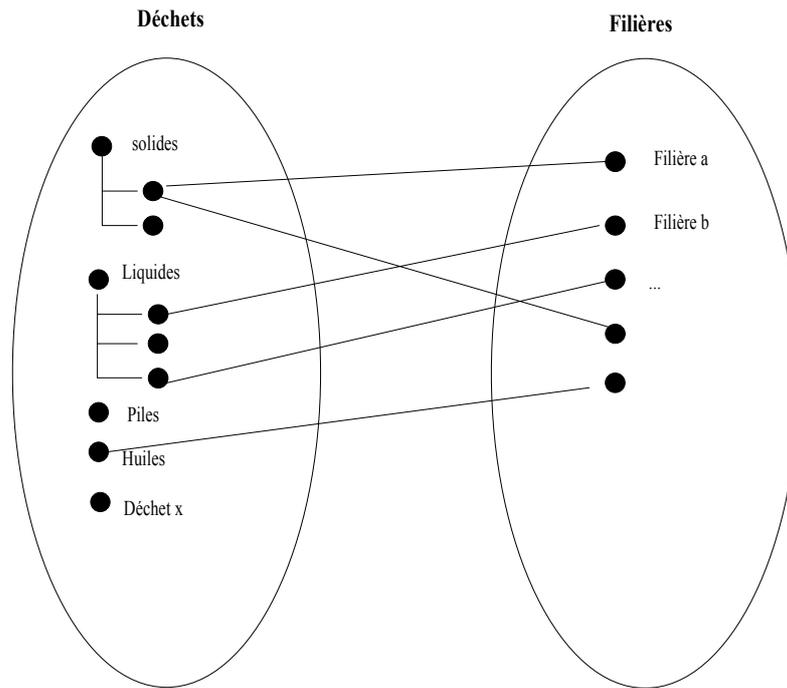


Figure II-2 : Liens entre catégories de déchets et filières de traitement représentatifs de la finalité des filières

2.5) Approche réglementaire

Nous allons maintenant examiner les différentes sources réglementaires dont nous disposons. Celles-ci vont nous fournir en premier lieu le système de référence qui permet de décider de la qualité d'un traitement : les normes de rejet. Ensuite, ce sont les critères de légalité d'un traitement que nous établirons. Enfin, quelques paramètres de fonctionnement font l'objet de prescription particulières.

2.5.1) Sources réglementaires nationales

Comme nous l'avons écrit plus haut, la réglementation fournit principalement des valeurs de référence, normes de rejet ou seuils d'admission de certains types de déchets.

a) Normes de rejet

Les rejets des installations classées étaient, jusque très récemment, régis par l'arrêté du 1er mars 1993*. Les installations de traitement de déchets sont cependant exclues de son champ

* Ce texte a été annulé en conseil d'Etat. Cependant, il continue à être utilisé comme référence par l'administration pour fixer les exigences imposées aux industriels par le biais des arrêtés d'exploitation.

d'application. Elles font l'objet de contraintes spécifiques au plan national ou au plan local à travers les arrêtés de classement. Nous avons recensé en annexe II-3 les normes de rejet relatives aux filières de traitement ainsi que les exigences de l'arrêté du 1er mars 1993, qui nous permettront d'établir les critères qui permettent de justifier un traitement et, ensuite de compléter la liste des paramètres à prendre en compte dans l'analyse de l'efficacité d'une filière.

b) Nature et caractéristiques des déchets admissibles

En plus des normes de rejet, les sources réglementaires fixent certaines caractéristiques des déchets admissibles dans les unités de traitement. La filière enfouissement technique fait l'objet de prescriptions très précises au niveau national alors que pour les autres filières seuls quelques paramètres sont visés. Enfin, des textes réglementent l'élimination de déchets spécifiques. Nous avons analysé ces différents textes afin d'en tirer les relations entre la nature des déchets et leurs caractéristiques. Le détail de cette analyse est présenté en annexe II-4.

c) Paramètres de fonctionnement

Les rejets d'une filière de traitement sont conditionnés par les caractéristiques du déchet traité au regard de la capacité intrinsèque de la filière à traiter les polluants qui le constituent. Ils dépendent aussi des conditions de fonctionnement de la filière qui peuvent être déterminées par la nature du déchet ou par des paramètres de fonctionnement indépendants tels que la température ou le degré d'agitation. La plupart de ces paramètres de fonctionnement sont fixés localement en fonction du matériel utilisé.

d) Conclusions

Les informations que l'on peut extraire de la réglementation nationale sont résumées dans le tableau II-2. Il s'agit de normes de rejet imposées aux filières de traitement, de natures de déchets admissibles, de critères d'exclusion portant sur la composition de ces déchets, et, dans une moindre mesure de paramètres de fonctionnement des différentes filières.

	Paramètres de fonctionnement	Normes de rejet	Déchets admissibles	
			Nature	Caractéristiques
CET		Oui	Oui	Oui
Incinération	Température	Oui	Non	Chlore, PCB, métaux lourds
Filières physico-chimiques		Non	Non	Non
Valorisation externe		Non	Non	Non

Tableau II-2 : Renseignements disponibles dans réglementation nationale

Les exigences de la réglementation nationale ne couvrent que partiellement l'ensemble des filières et des déchets. Pour établir la légalité d'un traitement, on pourra parfois faire appel à la réglementation locale, plus détaillée. Nous verrons cependant plus loin que la généralisation des exigences issues des arrêtés de classement est délicate en raison de grandes disparités entre les installations de traitement.

Une sélection plus fine des filières de traitement passe par une évaluation de leur efficacité en fonction des normes de rejet définies par la réglementation, et par la prédiction de l'effet du déchet sur le fonctionnement des procédés mis en oeuvre. Pour cela, nous devons avoir recours à des modèles liant les caractéristiques du déchet traité aux caractéristiques des rejets. Ces modèles ne sont pas fournis par la réglementation et doivent faire l'objet d'une approche technique.

L'exploitation des consignes réglementaires relatives aux déchets admissibles dans différentes filières de traitement fait apparaître une relation entre :

- des catégories de déchets,
- des critères portant sur des paramètres analytiques,
- des filières de traitement.

Les catégories de déchets mises en avant par la réglementation sont en général définies par la fonction génératrice du déchet (ex : résidus de l'incinération, résidus de la métallurgie), son identité exprimée dans un vocabulaire spécifique à l'activité dont il est issu (scories, sables de fonderies) ou encore sa fonction initiale (accumulateurs usés, solvants) et non ses caractéristiques physiques ou chimiques. Cependant, pour la majeure partie de ces déchets, il

est possible d'établir leur appartenance à des catégories plus générales définies en fonction des propriétés de base du déchet (solides, liquides, organiques, minéraux...).

Comme les exigences légales portant sur les déchets varient en fonction de leur identité, il est nécessaire de connaître celle-ci pour pouvoir évaluer la légalité d'un traitement. Par exemple, les contraintes portant sur les lixiviats issus de résidus d'épuration des fumées d'incinération et celles portant sur les lixiviats de résidus d'épuration des effluents industriels ne sont pas équivalentes, malgré le caractère similaire (d'un point de vue physico-chimique) de ces deux types de déchets.

La figure II-3 illustre ce triple lien qui existe entre des catégories de déchets, des filières de traitement et des critères d'acceptation. Dans la mesure où il est possible d'établir l'appartenance des déchets concernés par la réglementation aux catégories issues de l'identification de la finalité des filières, la structure que nous obtenons à l'issue de cette approche réglementaire constitue une extension de celle à laquelle nous avons abouti au 2.4.4.

2.5.2) Sources réglementaires locales

Nous avons identifié les contraintes réglementaires pesant sur les filières de traitement au niveau national. Ces contraintes ne concernent pas l'ensemble des filières et ne prennent pas en compte l'ensemble des critères de sélection des filières. Les arrêtés de classement des centres proposant les différentes filières de traitement fixent par ailleurs des contraintes locales qui portent sur les caractéristiques des rejets, les paramètres de fonctionnement et les déchets admissibles. Il devrait être possible d'utiliser ces valeurs locales pour établir, à l'échelle nationale, les contraintes minimales et maximales auxquelles sont soumises les filières de traitement et les caractéristiques des déchets au delà desquelles aucun traitement ne sera possible. Il faudra cependant garder à l'esprit :

- que ces valeurs ont un caractère temporaire, les arrêtés de classement étant révisés périodiquement ;
- qu'elles résultent généralement d'une position pragmatique, qui tient compte de l'état de l'environnement local, des performances et de l'histoire de l'installation ;
- qu'il est extrêmement difficile de comparer les installations entre elles tant la nature des traitements et les procédés employés peuvent différer.

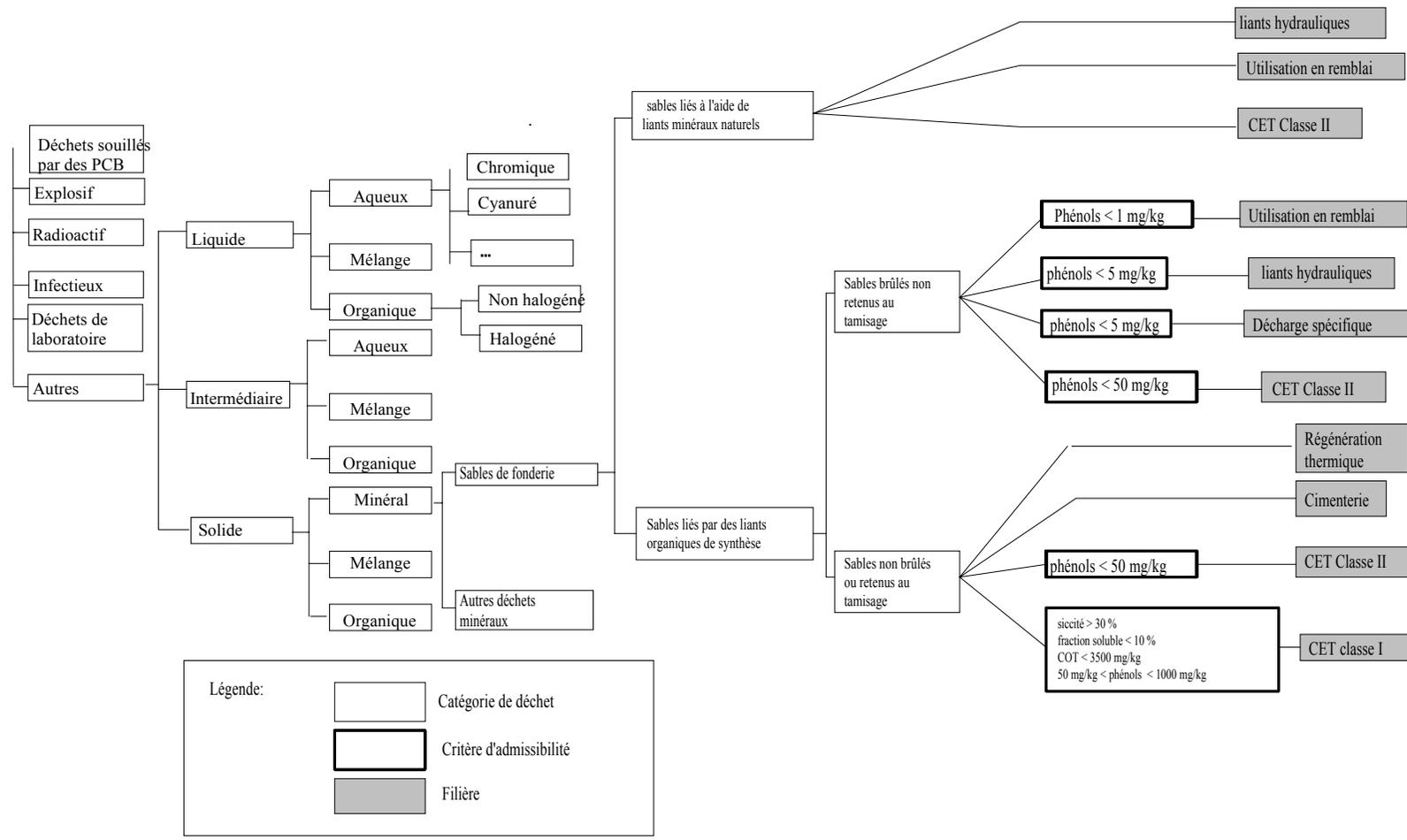


Figure II-3 : Association entre catégories de déchets et filières de traitement résultant de l'approche réglementaire, exemple des sables de fonderie.

On distinguera les contraintes qui portent sur les rejets et celles qui visent les caractéristiques des déchets.

Les contraintes portant sur les rejets des installations ont tendances à s'uniformiser et à devenir globalement plus exigeantes. Les disparités qui existent actuellement devraient donc s'estomper au profit d'une norme unique reprenant pour l'essentiel les exigences de l'arrêté du 1er mars 1993 sur les rejets des installations classées. Seuls subsisteront dans le futur des écarts dus à une plus grande sévérité locale en raison d'un milieu naturel particulier ou de flux spécifiques importants.

Les critères d'admission des déchets relatifs à leur nature ou à leurs caractéristiques découlent directement des critères généraux que nous avons identifiés : finalité, efficacité, fonctionnement. Chaque installation disposant d'un matériel spécifique, il n'est pas vraiment possible d'établir une règle générale quant à l'évolution des caractéristiques des déchets admissibles. Nous devrions cependant pouvoir établir un instantané qui rende compte des valeurs extrêmes que peuvent prendre certains paramètres pour une filière donnée.

a) Normes de rejet

Nous n'avons pas pu effectuer un recensement systématique des normes de rejet imposées aux centres de traitement. L'étude de l'association RECORD^[RECORD 94] sur la métrologie appliquée aux déchets fournit quelques exemples, que nous avons rassemblé en annexe II-5. Ils permettent d'identifier les paramètres associés aux différentes filières de traitement et les ordres de grandeur des seuils correspondant. On pourra cependant constater les disparités qui existent au niveau des valeurs, parfois même au sein d'une même unité de traitement. Ces disparités devraient s'estomper dans les années à venir avec le renouvellement des arrêtés de classement et l'application de nouveaux textes comme l'arrêté du 10 octobre 1996 sur l'incinération des déchets industriels spéciaux.

b) Caractéristiques des déchets

En ce qui concerne les caractéristiques des déchets, nous avons pu accéder aux arrêtés de classement de nombreux centres de traitement. Ceci nous a permis de recenser les différents paramètres pris en compte au plan local et les valeurs limites d'acceptation des déchets. On trouvera en annexe II-6 des tableaux permettant de comparer les contraintes portant sur différents centres proposant une filière donnée (les centres ne sont pas identifiés nommément).

Filières physico-chimiques

L'objectif des filières physico-chimiques en phase aqueuse (déchromatation, décyanuration, neutralisation) est l'élimination d'une pollution essentiellement minérale par oxydoréduction et précipitation. Les principales restrictions à l'accès à ces filières de traitement concernent donc la teneur en matière organique des déchets exprimée à travers le COT, la DCO, ou des polluants plus spécifiques comme les phénols ou les organohalogénés. Dans l'ensemble, les centres adoptent tous des critères et des valeurs très différentes, ce qui rend toute approche commune impossible.

Ce constat est d'ailleurs valable pour l'ensemble des filières physico-chimiques. Seule la teneur en PCB est systématiquement mentionnée. Pour la séparation de phases, le chlore apparaît comme un paramètre pris en compte par de nombreux centres. A deux exceptions près, la teneur en chlore est limitée à 2%.

Incinération

Pour les filières thermiques (201, 21, 22, 23, 25, 28), on trouve aussi d'importantes disparités. Le chlore et les métaux lourds font cependant l'objet de contraintes systématiques pour les filières incinération classique, incinération en cimenterie et évapo-incinération. Les filières 23 (incinération des déchets à sujétions particulières) et 21 (incinération en installation munie d'un dispositif d'épuration des fumées) sont pratiquées par certains centres qui ne sont soumis à aucune contrainte sur la composition des déchets entrants.

Filière	Chlore	Métaux lourds
---------	--------	---------------

22 évapo-incinération	2% (sauf pour 2 centres autorisant 7% et 20%)	
25 Incinération classique	2%	
28 Incinération en cimenterie	4%	5%

Tableau II-3 : critères d'admission des déchets en centres d'incinération en fonction des filières proposées

L'étude des arrêtés de classement des centres de traitement fait ressortir la difficulté qu'il y a à utiliser les contraintes réglementaires locales pour établir les contraintes générales qui pèsent sur les filières de traitement. A l'heure actuelle, de nombreuses installations sont encore soumises à des arrêtés de classement assez anciens, et donc peu exigeants. Avec le renouvellement de ces arrêtés, on devrait assister dans les prochaines années à une uniformisation des exigences, de plus en plus d'arrêtés prenant en compte les mêmes paramètres imposés par l'arrêté du 10 octobre 1996. Il sera alors plus facile d'établir une carte des contraintes réglementaires pour chaque filière. Il est donc nécessaire de prévoir dès maintenant dans le système que nous développons les mécanismes qui permettront de modifier ces contraintes.

2.6) Modèles théoriques

Au delà des exigences réglementaires concernant la nature et les caractéristiques des déchets, nous devons aussi identifier les modèles à fondement physico-chimiques qui permettent de lier les caractéristiques des déchets à celles des rejets pour une filière donnée. Nous proposons en annexe II-7 deux exemples détaillés concernant l'incinération et la régénération de solvants.

Dans le cas de l'**incinération**, l'utilisation de modèles liant les caractéristiques du déchet au PCI (pouvoir calorifique inférieur) puis le PCI au volume de fumée généré par la combustion, associés à des données expérimentales donnant le taux de transfert de certains polluants dans les cendres et dans les fumées, permet théoriquement de calculer les compositions des fumées rejetées. En comparant cette composition aux seuils réglementaires de rejet, il est alors possible d'aboutir à une décision de traitement du déchet par l'un des procédés d'incinération.

Dans le cas de la **régénération des solvants**, une approche théorique permet d'établir des distinctions entre les différents procédés de régénération et d'identifier les critères d'orientation d'un déchet vers l'un ou l'autre des procédés. Ces critères sont de nature qualitative ou quantitative. Ils débouchent d'une part sur une classification des déchets contenant des solvants et susceptibles d'être l'objet d'une valorisation :

- déchets solides
 - minéraux souillés de solvants
- déchets liquides
 - organiques
 - solvants souillés ou mélanges de solvants ne contenant pas de matière polymérisable
 - solvants souillés ou mélanges de solvants contenant de la matière polymérisable
 - mélange
 - déchets aqueux contenant des solvants organiques miscibles
 - déchets aqueux contenant des solvants organiques non miscibles
- déchets intermédiaires
 - boue minérale souillée de solvants halogénés
 - déchet organique visqueux contenant des solvants (boue de peinture,...)

d'autre part sur des critères portant sur les paramètres suivants :

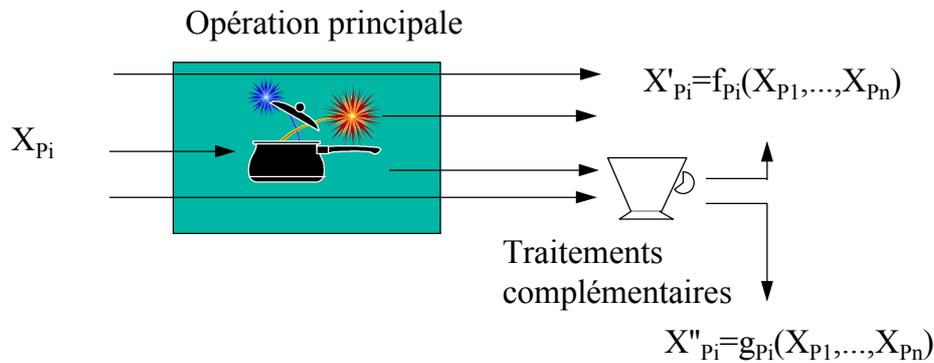
- point d'auto-inflammation
- point d'éclair
- tension de vapeur
- viscosité

Enfin, la nature même des solvants contenu dans le déchet a une incidence sur la possibilité de les régénérer. En effet, les caractéristiques physiques des solvants (existence d'un azéotrope, écart de points d'ébullition) déterminent les caractéristiques limites du produit régénéré et sa valeur marchande.

A travers ces exemples, nous pouvons mettre en évidence différentes formes d'utilisation d'information à caractère scientifique dans le but d'identifier des filières de traitement de déchets industriels. Elles débouchent sur trois types de données :

- des **critères de classification** des déchets à partir desquels il est possible de définir de nouvelles catégories de déchets susceptibles d'être traités par telle ou telle filière,

- des **critères d'acceptation** de déchets dans des filières de traitement portant sur les **conditions de fonctionnement** de ces filières,
- des **critères d'acceptation** liés à l'**efficacité** de la filière vis à vis d'un polluant,
- des **conditions de fonctionnement nécessaires** au bon traitement d'un déchet donné.



$X_{Pi}, X'_{Pi}, X''_{Pi}$ = fractions massiques de polluant i
 f_{Pi} et g_{Pi} = fonctions de transfert
 N_{Pi}, M_{Pi} = normes de rejet

Figure II-4 : Flux de matière au sein d'une filière de traitement

La figure II-4 représente les différents flux de matière à travers une filière de traitement. Chaque flux peut être caractérisé, entre autres, par les différentes concentrations de polluants qu'il contient. L'utilisation de l'information issue des modèles permettant de simuler le fonctionnement d'une filière, conduit à l'élaboration de fonctions de transfert de pollution qui permettent d'exprimer les quantités de pollution rejetée en sortie d'un traitement. C'est le couplage de ces fonctions de transfert avec les normes de rejet qui permet de définir les critères d'acceptation relatifs à l'efficacité d'une filière.

On aboutit ainsi, pour la filière j , à l'ensemble de critères d'admission portant sur les caractéristiques des rejets:

$$x'_p < M_{p,j} \quad \text{où } x'_p = f_{p,j}(x_1, \dots, x_n, T, P, \dots) \text{ pour } p=1 \text{ à } n$$

Ceux-ci peuvent théoriquement être exprimés en fonction des caractéristiques initiales du déchet sous la forme :

$$x_p < s_{p,j} \quad \text{où } s_{p,j} = f_{p,j}^{-1}(M_{1,j}, \dots, M_{n,j}, T, P) \text{ pour } p=1 \text{ à } n$$

où les x_i et les x'_i sont des concentrations de polluants mesurées respectivement sur le déchet et sur les rejets, les $f_{p,j}$ les fonctions de transfert pour la filière j et le polluant p , les $M_{p,j}$ le seuil

imposé par la norme pour le rejet du polluant p par la filière j . Les $s_{p,j}$ sont donc des seuils portant sur la composition initiale du déchet en polluant p pour la filière j .

A travers cet essai de formalisation, il est aussi possible d'établir les valeurs limites de paramètres caractéristiques du déchet ou de la filière au delà desquelles un dysfonctionnement du traitement apparaît. On aboutit alors aux critères d'acceptation de déchets liés au fonctionnement et aux conditions de fonctionnement nécessaires au bon traitement d'un déchet. Dans la mesure où un producteur de déchet n'a pas de moyen d'action sur les paramètres de fonctionnement d'une filière de traitement externe, l'information sur les conditions de traitement nécessaires à mettre en oeuvre demeure rarement exploitable dans le cadre de notre système d'aide à la décision, sauf lorsqu'elle est associée à un changement de filière. C'est par exemple le cas pour la température d'incinération nécessaire à la destruction des PCB.

Il existe de nombreux modèles théoriques permettant de simuler un traitement ou d'en prédire les effets. Nombre de ces modèles sont cependant soumis à des conditions de validité assez restrictives pour les raisons suivantes :

- les paramètres du modèle ne sont pas connus de manière suffisamment fiable pour tous les types d'installations, le modèle résultant souvent de l'exploitation de données provenant d'un centre de traitement unique ou d'une unité pilote, voire d'expériences de laboratoire,
- ils ne tiennent souvent pas compte des phénomènes de synergie qui peuvent exister au sein du déchet en raison de la présence simultanée de différents composants.

Il en résulte deux types d'utilisation possible :

- l'élimination ou la conservation d'une filière candidate en fonction des résultats du modèle lorsque celui-ci est valable dans un domaine suffisamment large,
- la génération de remarques attirant l'attention de l'utilisateur sur les risques relatifs au traitement de son déchet lorsque le domaine de validité du modèle est plus restreint.

Enfin, dans de nombreux centres, le déchet introduit effectivement dans la chaîne de traitement peut être sensiblement différent de celui confié par le producteur en raison de mélanges ou de préparations de charges. C'est très probablement cette pratique qui rendra

l'utilisation de résultats de modèles délicate dans le cadre du choix d'une filière de traitement externe.

3) Connaissance associée aux centres de traitement

Nous avons examiné les différents types d'information relatifs aux filières de traitement. Ceci nous a permis de proposer une première structure de données permettant d'associer la nature et les caractéristiques d'un déchet à une ou plusieurs filières de traitement. Nous allons maintenant étudier les informations disponibles sur les centres de traitement. Nous verrons dans quelle mesure ces informations sont compatibles avec la structure de données déjà ébauchée suite à notre réflexion sur les filières, et comment celle-ci peut être adaptée pour permettre une bonne prise en compte des spécificités des centres de traitement.

3.1) Origine des données

Le document principal sur lequel on peut s'appuyer pour déterminer la traitabilité d'un déchet dans un centre de traitement est son arrêté de classement. Il recense l'ensemble des prescriptions relatives à l'aménagement et l'exploitation de l'installation. A ce titre, chaque arrêté d'un centre de traitement de déchet contient une rubrique déchets admissibles et une rubrique rejets. La première précise la nature et les caractéristiques des déchets qui peuvent être traités par le centre. La deuxième fixe les normes de rejet.

3.2) Identification des déchets

Tous les arrêtés de classement des centres de traitement font d'abord référence à la nature des déchets admissibles avant d'en définir plus précisément les caractéristiques. Deux systèmes sont utilisés pour exprimer cette nature :

- la nomenclature Française. En général, seuls les codes C, représentatifs de la nature du déchet sont utilisés.
- une description du déchet prenant principalement en compte son état physique et sa nature chimique de base ou encore le procédé générateur du déchet.

Le degré de précision dans la définition des déchets admissibles varie grandement d'un centre à l'autre, certains centres se contentant de définitions du type : "tout déchet liquide non halogéné". Dans les cas les plus extrêmes, il est nécessaire d'interpréter la définition des

déchets au regard des filières proposées par le centre pour identifier précisément les déchets concernés.

3.3) Critères d'admission

En plus de la nature des déchets, l'arrêté de classement impose généralement des critères d'admission qui portent sur la composition du déchet. Ces critères peuvent s'appliquer à l'ensemble des déchets ou varier suivant leur nature. Ils sont généralement exprimés en termes de concentrations limites de certains polluants dans le déchet. Le tableau II-4 donne une liste des paramètres pris en compte dans les critères d'acceptation. Le plus souvent, seuls quelques uns de ces paramètres font l'objet d'une prescription, ce qui explique la difficulté à utiliser ces seuils afin d'établir des règles générales pour les filières de traitement concernées.

Déchets aqueux ou phase aqueuse de déchets multiphasés	Déchets organiques ou phase organique d'un déchet multiphasé	Déchet minéral solide
[As]	Alcalins	As sur lixiviat
[CN-]	As	Cd sur lixiviat
[COT]	Autres halogènes	CN sur lixiviat
[Cr total]	Chlore	COT sur lixiviat
[Cr ^{VI}]	Halogènes (Cl + autres)	Cr total sur lixiviat
[Cu]	Hg	Cr ^{VI} sur lixiviat
[DCO]	métaux lourds	DCO sur lixiviat
[F]	Pb	Fraction soluble
[Mn]	PCI	Hg sur lixiviat
[Ni]	pH	Ni sur lixiviat
[organohalogénés]	Point d'éclair	Pb sur lixiviat
[Pb]	Proportion de la phase liquide	pH sur lixiviat
[Phénols]	Résidus de la combustion	phénols sur lixiviat
[Sn]	Sédiments	Zn sur lixiviat
[Soufre]	Soufre	Siccité
[Zn]	Température de ramollissement	
	Zn	
	Cd	
	Cr	

Tableau II-4 : Paramètres pris en compte dans les critères d'acceptation des déchets en centres de traitement

3.4) Structure de données

Pour chaque centre de traitement, on dispose d'une liste de déchets admissibles complétée par un ensemble de critères d'admission. Pour identifier les centres susceptibles de traiter un déchet, il suffit donc a priori d'identifier ce déchet dans les listes de déchets admissibles, ce qui permet de sélectionner une série de centres susceptibles de traiter le déchet, puis de vérifier que ses caractéristiques ne sont pas incompatibles avec les critères d'admission des centres considérés.

L'identification du déchet dans les listes des déchets admissibles pose cependant un problème dans la mesure où les centres utilisent soit la nomenclature française soit des désignations qui leurs sont propres, fondées essentiellement sur la nature physico-chimique du déchet. Il faut donc soit repérer le déchet dans chacun des systèmes d'identification utilisés par les centres, soit connaître les correspondances entre ces différents systèmes. Cette dernière option revient en pratique à établir un lien entre la nomenclature française et une classification des déchets fondée sur leurs principales caractéristiques physico-chimiques et leurs fonctions génératrices.

On retrouve donc, pour les centres de traitement, une structure de données assez similaire à celle que nous avons obtenue pour les filières de traitement, à savoir une relation entre :

- des systèmes d'identification des déchets,
- des critères d'acceptation,
- des centres de traitements.

A condition de parvenir à un système d'identification commun, il devrait être possible d'exprimer la connaissance relative aux filières de traitement et celle relative aux centres de traitement à travers une même structure de données.

4) Connaissance associée aux textes réglementaires

L'accès aux textes réglementaires procède d'un principe un peu différent de la sélection de solutions de traitement. En effet, nombreux sont les textes qui ne sont pas directement liés à un type de déchet ou un mode de traitement. Il s'agit par exemple des textes généraux comme

la loi du 15 juillet 1975. En plus des textes à portée générale, les textes réglementaires peuvent concerner :

- une filière de traitement,
- une catégorie de déchets,
- une procédure,
- les installations classées dans leur ensemble,...

Nous pouvons donc envisager deux modes d'accès aux textes réglementaires :

- par mots clé, pour les textes à portée générale,
- en fonction de la nature des déchets et de leurs caractéristiques, pour les textes concernant des déchets particuliers ou des filières de traitement, que nous savons associer à des catégories de déchets.

Cette dernière approche implique une relation entre le système d'identification des déchets et les textes réglementaires, étendue éventuellement aux paramètres de caractérisation par l'intermédiaire de seuils.

En plus des textes purement réglementaires, nous nous sommes aussi intéressés aux normes (AFNOR, ISO), notamment aux normes d'analyse qui existent pour les différents paramètres de caractérisation des déchets. Il existe un lien direct entre les références des normes et l'intitulé des paramètres, qui est d'une autre nature que le lien mis en évidence au paragraphe précédent, qui concerne la valeur des caractéristiques du déchet.

5) Proposition d'un système d'identification des déchets

Au cours des chapitres précédents, nous avons montré que la connaissance relative aux solutions de traitement, filières ou centres, pouvait toujours être exprimée sous forme d'une relation entre :

- un système d'identification des déchets,
- des critères d'acceptation faisant intervenir les caractéristiques du déchet,
- les solutions de traitement proprement dites.

Il existe plusieurs systèmes d'identification, qui résultent d'approches différentes : technique, réglementaire, pragmatique. Certains d'entre eux ont une vocation universelle, comme les nomenclatures officielles. D'autres au contraire correspondent à un jargon local de centres de traitement ou d'entreprises génératrices.

Dans un système d'aide à la décision, il n'est pas envisageable de conserver une multitude de systèmes d'identification, qui se traduiraient par des difficultés d'utilisation et de mise à jour. Nous devons donc tenter d'unifier les différents systèmes que nous avons identifiés pour converger vers une expression plus générale de la diversité des cas rencontrés.

Dans la pratique, les nomenclatures officielles jouent un rôle particulier dans la mesure où elles servent de support à toutes les déclarations administratives. Elles peuvent dans certains cas constituer la seule information disponible sur le déchet. Il convient donc de les intégrer au sein de l'outil. Cependant, la nomenclature française des déchets et le catalogue européen sont des systèmes relativement figés, puisque soumis à l'approbation d'instances gouvernementales en cas d'évolution. Nombreuses sont les rubriques de ces deux systèmes qui ne permettent pas de déduire les caractéristiques physiques ou chimiques du déchet, auxquelles il est par conséquent difficile d'associer une filière de traitement. Nous ne pouvons donc pas utiliser les nomenclatures officielles pour choisir directement une filière de traitement des déchets.

Nous avons donc opté pour un système mixte comprenant d'une part les nomenclatures officielles permettant d'exprimer l'information dans une forme réglementaire, et d'autre part un système unifié permettant de classer les déchets de façon pertinente au regard des solutions de traitement.

Au paragraphe 2.4.4. nous avons mis en évidence les critères de classification des déchets issus de l'examen des finalités des filières de traitement. Il s'agit d'abord des **caractéristiques physico-chimiques** de base du déchet : état physique, nature chimique de la matrice, principaux polluants ; ensuite du **procédé générateur** du déchet ou de sa **fonction initiale**, pour certaines filières spécifiques.

Ces deux points de vue suggèrent une structure arborescente pour l'identification des déchets, seule susceptible d'exprimer à la fois la nature physico-chimique du déchet et ses autres caractéristiques.

Nous avons donc entrepris de développer une telle structure en respectant les principes suivants :

- Les classes de déchets doivent, autant que possible, présenter un caractère pertinent au regard de la sélection des solutions de traitement, ou bien permettre le lien avec la nomenclature française.
- Un premier niveau de l'arborescence permet de distinguer les déchets d'une telle nature qu'ils nécessitent un traitement particulier indépendamment de leur état physique ou de la nature chimique de leur matrice. Ainsi, les déchets contenant du PCB sont-ils traités de manière unique par un centre unique en France, qu'ils soient liquides, solides ou pâteux, de nature organique (comme une huile isolante) ou minérale (comme une terre souillée). La majorité des déchets spéciaux est regroupée sous une rubrique "autres déchets spéciaux".
- Les niveaux suivants permettent de classer les déchets en fonction de leur état physique, de la nature chimique de la matrice principale, puis des principaux polluants présents.
- Les catégories de déchets représentatives d'un procédé générateur ou d'une fonction initiale sont introduites au niveau le plus significatif. Un même procédé pouvant parfois générer des déchets ayant des propriétés différentes, une même désignation peut se retrouver en plusieurs points de l'arborescence.

Un extrait de la classification obtenue est présenté en figure II-5. Il faut souligner qu'elle n'est ni unique, ni définitive.

Un système d'identification arborescent présente plusieurs avantages.

- Il permet d'introduire facilement de nouvelles catégories de déchets ou d'affiner des catégories existantes, en fonction notamment d'évolutions dans les filières de traitement.
- Il permet aussi de gérer le degré de connaissance d'un utilisateur. Celui-ci est guidé dans la description de son déchet. En se dotant de règles de généralisation, on parvient à restreindre rapidement le nombre de solutions de traitement envisageables pour un déchet, même lorsque l'on ne dispose que d'une description très partielle de celui-ci.

Deuxième partie : Traitement en centres collectifs

Déchets contenant des PCB				
Déchets de laboratoire				
autres déchets spéciaux	Liquides	Aqueux	Solutions chromiques	
			Solution cyanurée	
			Solution acide sans CrVI	
			Solution alcaline sans cyanure	
			Eaux résiduaires à forte charge organique	
			Boues minérales liquides	
			Solutions neutres contenant des métaux en solution	
			Autre solution saline	
		Organique	Solvants	Solvant halogéné
				Solvant non halogéné
			Huiles usagées	Huiles noires
				Huiles claires
			Autres déchets halogénés ou contenant métaux lourds, soufre...	Halogénés
				Soufrés
				Chargés en métaux lourds
				Chargé en polluants divers
			Autres déchets non halogénés sans métaux lourds	
		Mélange aqueux-organique	Mélange eau-hydrocarbures séparable (émulsion)	Halogéné
				Non halogéné
			Mélange eau-hydrocarbures non séparable	Halogéné
				Non halogéné
			Autres déchets liquides en mélange	Non halogéné
			Boues	Halogéné
		Boue minérale liquide	Carbonate de calcium résiduaire	
Intermédiaires	Minéral		Boues d'hydroxydes métalliques	
			Boue contenant des métaux en solution dans la phase aqueuse	Boue chromique
				Acide non chromique
				Cyanurée
				Alcaline non cyanurée non chromique
			Boues métalliques de travail des métaux	
			Carbonate de calcium	
			Sulfate de calcium résiduaire	
			Autre boue minérale (non métallique)	Avec hydrocarbures
				Sans hydrocarbures
		Organique ou souillé		Halogéné

Solides	de matière organique	Non halogéné	
		Organique contenant des métaux lourds	
		Boue minérale souillée d'hydrocarbures	
		Boues biologiques	
	Déchets minéraux peu solubles	Déchets organiques Halogéné ou chargés en matière organique	Non halogéné
			Fortement chargés en métaux lourds ou polluants divers
	Sels et réactifs solides ou déchets minéraux fortement solubles		
	Emballages et matériels souillés		
	Piles et accumulateurs	Piles au mercure	
		Autres piles et accumulateurs	
Déchets métalliques			

Figure II-5 : Extrait de la classification des déchets mise en place dans notre système d'aide à la décision.

6) Nature des liens entre les rubriques de la classification des déchets, les critères d'admission et les solutions de traitement

Une fois mise en place la classification des déchets, il s'agit d'établir les liens permettant d'aboutir à une solution de traitement à partir de la description d'un déchet. A chaque noeud de l'arborescence on peut associer un ensemble de solutions de traitement et de critères d'acceptation, qui peuvent être spécifiques aux propriétés des déchets correspondants.

Un noeud de l'arborescence est représentatif de l'ensemble des propriétés qui le précèdent, les propriétés qui suivent forment des sous-classes de la catégorie qu'il représente. Une filière généraliste pouvant traiter tous les déchets d'une catégorie peut être liée à un noeud en amont alors qu'une filière très spécialisée sera liée à un noeud aval.

La gestion des identités de déchets incomplètes peut donner lieu à deux stratégies :

- une stratégie *prudente* qui consiste à ne proposer à l'utilisateur que les solutions de traitement dont on est sûr,
- une stratégie *tolérante* qui consiste à proposer toutes les solutions envisageables dont on n'a pas prouvé qu'elles étaient incompatibles avec le déchet.

Chacune de ces options offre des avantages et des inconvénients. La deuxième parce qu'elle peut conduire à des erreurs, la première parce qu'elle est susceptible de limiter les réponses à quelques filières et quelques centres généralistes déjà bien connus des producteurs de déchets. En accord avec l'Ademe, nous avons préféré opter pour la stratégie tolérante, préférant inciter les producteurs à s'informer auprès de centres de traitement pouvant leur proposer des solutions innovantes.

La figure II-6 montre comment est constituée la liste de centres candidats à partir d'une identification incomplète du déchet. La constitution de cette liste de centres permet aussi de constituer une liste de critères d'acceptation dont est déduite la liste des paramètres que l'utilisateur doit mesurer sur le déchet. Si l'utilisateur est capable de fournir les renseignements demandés, la liste des centres sera affinée en fonction des critères d'acceptation. Autrement, la réponse du système correspondra à la liste initiale de centres candidats. Ce processus est expliqué dans la figure II-7.

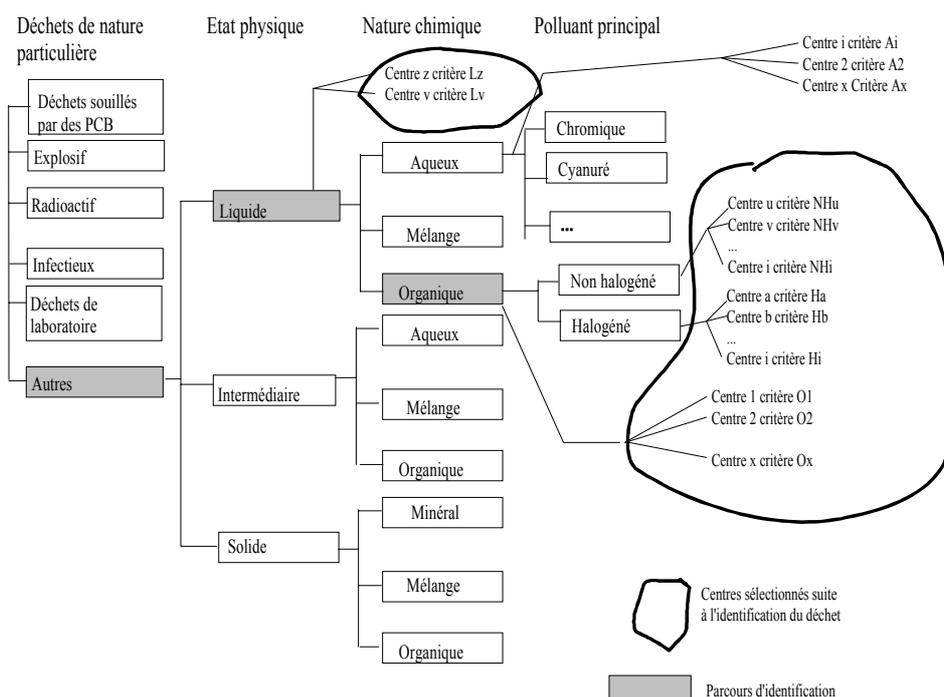


Figure II-6 : Sélection de la liste de centres susceptibles de traiter le déchet après une identification incomplète

En plus des critères d'admission (ou d'exclusion) des déchets, qui permettent d'éliminer des filières qui ne sont pas compatibles avec le déchet caractérisé, nous avons mis en place une deuxième catégorie de critères qui permettent de proposer une solution de traitement non

candidate lorsqu'un paramètre prend une valeur inattendue pour le type de déchet identifié. Le fonctionnement de ces critères est plus complexe.

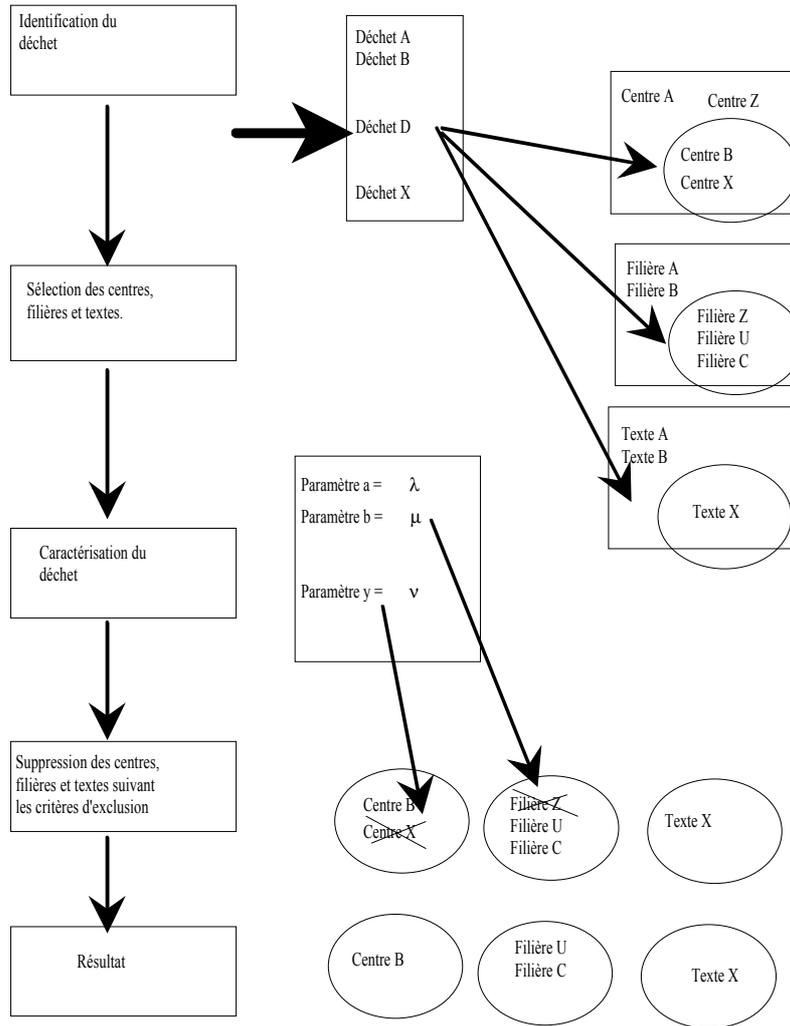


Figure II-7 : Constitution de la liste de solutions candidates et élimination des solutions incompatibles en fonction des critères d'acceptation

V Structure de l'outil

Nous avons mis en évidence dans les chapitres précédents les différents éléments de connaissance mis en jeu dans l'identification de solutions de traitement externe pour un déchet industriel. Nous allons maintenant expliquer comment ces éléments de connaissance ont été utilisés pour réaliser un système d'aide à la décision.

1) Choix d'un support informatique

Les connaissances qui permettent de déduire une solution de traitement pour un déchet sont essentiellement constituées d'un système d'identification dans lequel on peut identifier la nature du déchet auquel sont associées des solutions de traitement et des critères d'acceptation portant sur les caractéristiques analytiques du déchet. Ceci peut être représenté par un ensemble d'entités d'une base de données relationnelle. Les liens entre ces différentes entités expriment la connaissance relative aux solutions de traitement. Un système de gestion de base de données relationnelles est donc un support adapté à la réalisation de notre système d'aide à la décision. Il est naturellement conçu pour pouvoir prendre en charge les tâches d'archivage des données. Il permet aussi de gérer les tâches plus spécifiques d'aide à la décision.

Nous avons choisi d'utiliser le SGBD Microsoft Access 2.0, compatible avec les logiciels utilisés par l'Ademe.

2) Structure de données

Au cours des chapitres précédents, nous avons fait apparaître différentes entités participant à l'identification de solutions de traitement externe sont les filières, les centres de traitement, les textes réglementaires, les systèmes d'identification des déchets, les paramètres de caractérisation des déchets, les fonctions caractéristiques et les seuils.

La connaissance permettant d'aboutir à l'identification de solutions de traitement est constituée par les valeurs de ces différentes entités mais aussi par les relations qui existent entre elles. La structure de données va permettre d'exprimer ces relations. A travers cette structure, nous allons aussi mettre en place les moyens qui nous permettront de faire évoluer l'outil en permanence en y intégrant des connaissances nouvelles. Dans ce qui suit nous utiliserons le

formalisme de modélisation des systèmes d'information MERISE dans lequel les entités sont représentées par des rectangles et les relations par des ovales^[MATHERON 94].

2.3) Filières

La première entité que nous allons décrire est un des éléments de solution recherchés par le système lors d'une session d'aide à la décision. Il s'agit des filières de traitement dont les attributs sont le code, qui correspond à la classification des agences de l'eau et de l'intitulé de la filière, le type de traitement (physico-chimique, thermique, valorisation) et un champ de commentaire, qui permet d'introduire un descriptif détaillé de la filière et des remarques diverses.

L'entité filière intervient dans de nombreuses relations que nous expliciterons à mesure que les autres entités impliquées interviendront.

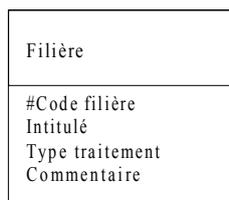


Figure II-8 : Entité filière.

2.4) Centres de traitement

Les centres de traitement constituent le deuxième élément de réponse du système. Des informations complémentaires leurs sont attachées telles que le nom et l'adresse du propriétaire ou de l'exploitant.

Deux relations ont une importance plus particulière :

- les filières proposées par le centre ,
- les catégories de déchets admissibles telles que définies dans l'arrêté de classement.

Ces informations ne sont pas suffisantes pour l'orientation des déchets car elles ne font pas intervenir les critères d'acceptation des déchets et les rubriques de la nomenclature française sont souvent trop imprécises pour distinguer un déchet avec exactitude. Cependant, elles participent à la constitution des liens qui permettront une orientation des déchets.

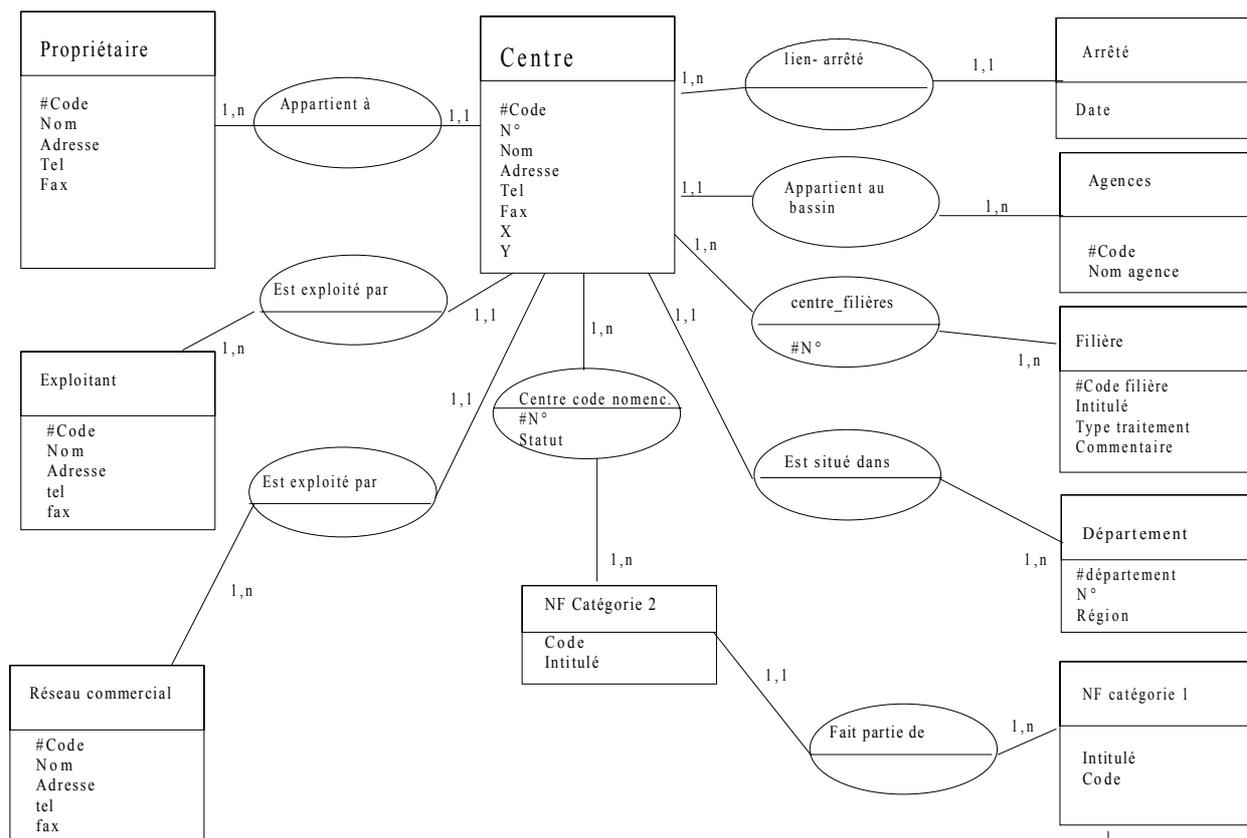


Figure II-9 : Entité centre de traitement et ses relations avec d'autres entités du modèle* .

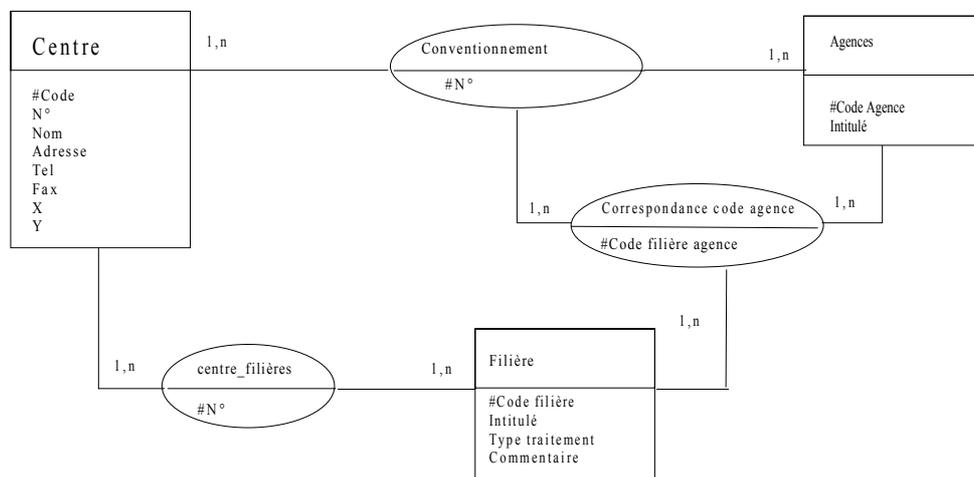


Figure II-10 : Relations de conventionnement

* Les numéros (0,1 1,1 , 0,n ou 1,n) représentent la cardinalité de la relation entre deux entités d'une base de données, c'est-à-dire le nombre de relations du même type pouvant faire intervenir une même instance d'une entité donnée. Le symbole n correspond à un nombre illimité.

Le "conventionnement", qui indique si un centre donné est conventionné par une agence de l'eau pour pratiquer une filière donnée est une autre information importante à intégrer. En effet, un industriel faisant traiter un déchet dans un centre de traitement suivant une filière conventionnée est susceptible de recevoir des aides financières de la part de l'agence de l'eau dont il dépend.

2.5) Textes réglementaires

Les textes réglementaires constituent un élément de réponse du système. Chaque texte est identifié par un certain nombre d'attributs : son titre, sa date de publication, etc...

Les textes pouvant se modifier les uns les autres, nous avons prévu la relation correspondante.

Enfin, chaque texte est caractérisé par un ensemble de mots clé.

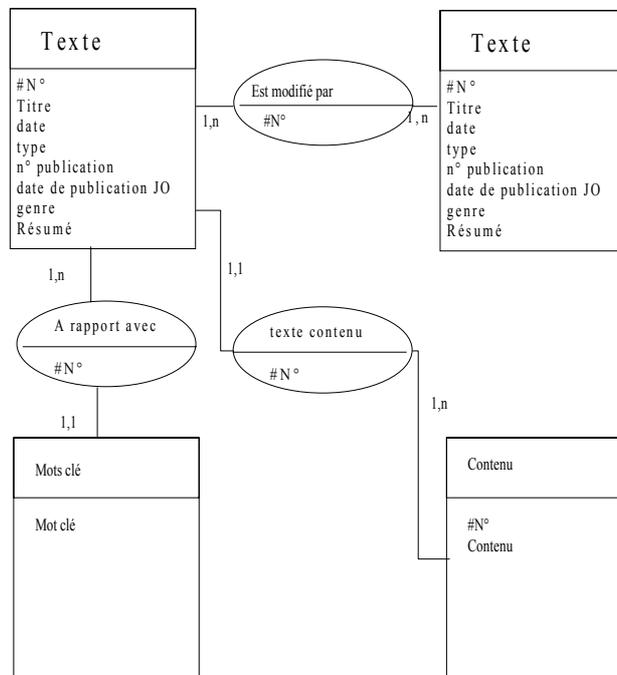


Figure II-11 : Entités et relations en rapport avec les textes réglementaires

2.1) Systèmes d'identification

Nous avons mis en évidence deux modes principaux d'identification :

- une identification réglementaire fondée sur la nomenclature française des déchets, principalement utilisée par certains centres de traitement pour désigner les déchets admissibles,
- une classification des déchets reposant sur leurs principales caractéristiques, déduite de la classification des filières de traitement en fonction de leur finalité, dans laquelle on peut

replacer certaines désignations de déchets issues d'arrêtés de classement de centres de traitement.

Nous avons vu que la nomenclature française était peu adaptée à l'identification de solution de traitement en raison notamment de l'imprécision de certaines rubriques. En revanche, dans la mesure où certains centres ne proposent qu'une liste de déchets admissibles extraite de la nomenclature, nous avons jugé essentiel de conserver ce mode d'identification des déchets. Il a donc été nécessaire d'établir un lien entre les deux systèmes.

La classification des déchets structurée sous forme d'une arborescence est présentée en annexe II-8 dans sa version complète. Nous l'avons implantée sous forme d'une table dans laquelle chaque enregistrement représente un noeud de la classification.

La nomenclature française est structurée en deux tables représentant un premier niveau de regroupement et les rubriques individuelles.

La figure II-12 présente la structure de données correspondant aux deux systèmes d'identification.

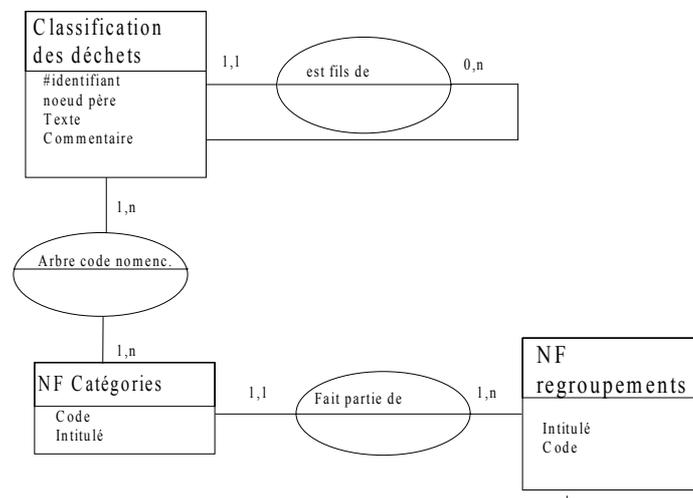


Figure II-12 : Relations entre la classification des déchets et les deux niveaux de la nomenclature française.

2.2) Paramètres de caractérisation

Les paramètres de caractérisation des déchets sont issus des critères d'admission dans les centres de traitement et de l'exploitation des modèles physico-chimiques des filières de traitement. Nous avons distingué deux types de paramètres :

- les paramètres numériques issus de mesures physiques ou d'analyses chimiques (figure II-13),
- les paramètres symboliques qui résultent plus d'une observation directe du déchet et ne sont pas quantifiables numériquement (figure II-14).

La liste des paramètres à mesurer pour un déchet donné dépend de la nature du déchet et des filières envisagées. Nous avons donc créé une entité que nous appellerons ici *Analyse*, qui permet de regrouper tous les paramètres en ensembles cohérents auxquels il faudra faire appel suivant les cas.

Par ailleurs, certains paramètres peuvent être calculés, comme il a été expliqué au chapitre III, paragraphe 2.6.6. Pour ces paramètres, nous avons prévu la possibilité d'associer une équation faisant intervenir les autres paramètres de l'entité.

Enfin, pour certains paramètres, il existe des normes de mesures dont nous avons archivé les références dans la base de textes réglementaires et normatifs.

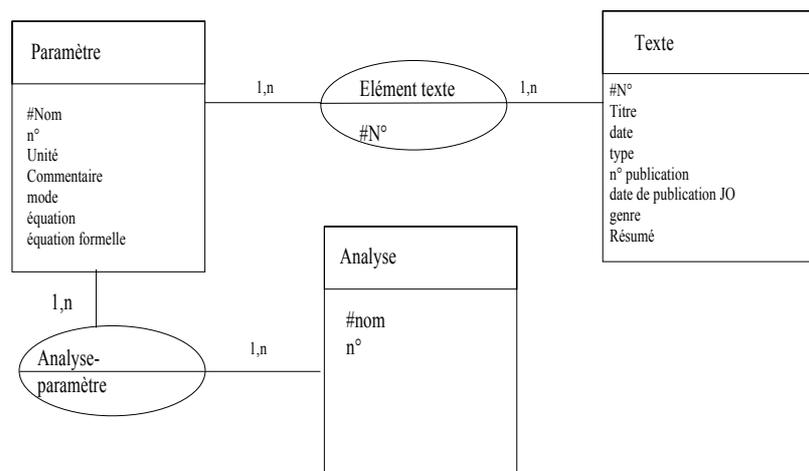


Figure II-13: paramètres numériques

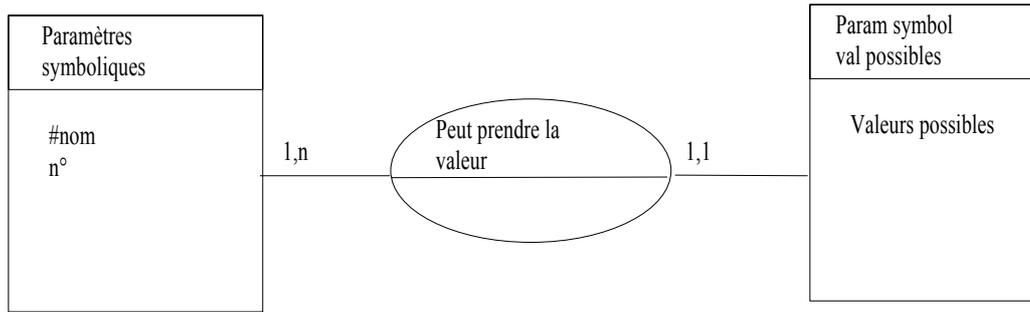


Figure II-14 : Paramètres symboliques

2.7) Seuils

Les paramètres de caractérisation des déchets sont associés à des seuils numériques pour former des critères numériques d'acceptation dans les centres de traitement ou les filières de traitement. De la même manière, les paramètres symboliques sont associés à des valeurs acceptables pour former des critères symboliques.

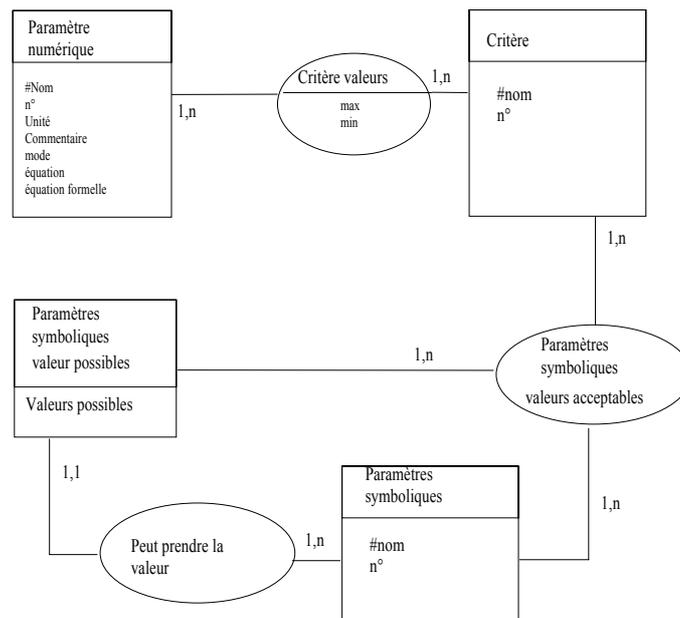


Figure II-15 : Relations entre les critères, les paramètres et les seuils ou les valeurs acceptables.

2.8) Association entre les catégories de déchets et les solutions de traitement

Le coeur du système d'aide à la décision que nous avons développé repose sur l'association entre des catégories de déchets, des solutions de traitement et des critères d'acceptation. Ces liens sont établis à l'origine par le concepteur du système. Dans un formalisme plus familier de base de règles, on pourrait exprimer ces liens par des règles du type :

"Si le déchet est de type D et que le critère C est respecté alors il peut être traité par la filière F"

Ces relations constituent donc la base de connaissance du système.

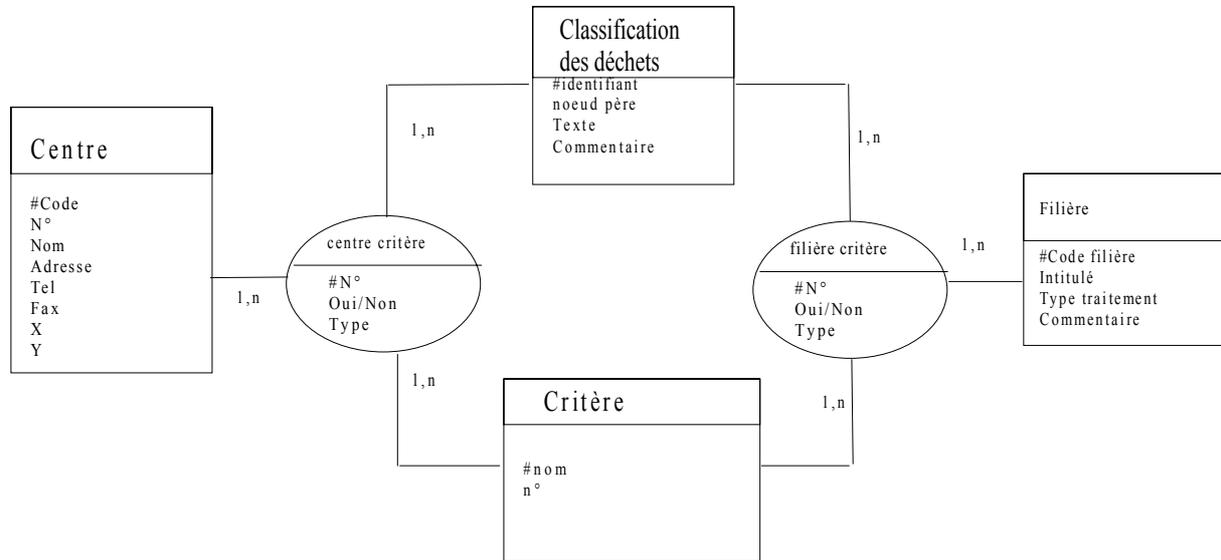


Figure II-16 : Relation entre les types de déchets, les critères d'admission et les solutions de traitement (centres et filières)

Le même type de liens existe entre des textes réglementaires et des remarques sur les solutions de traitement.

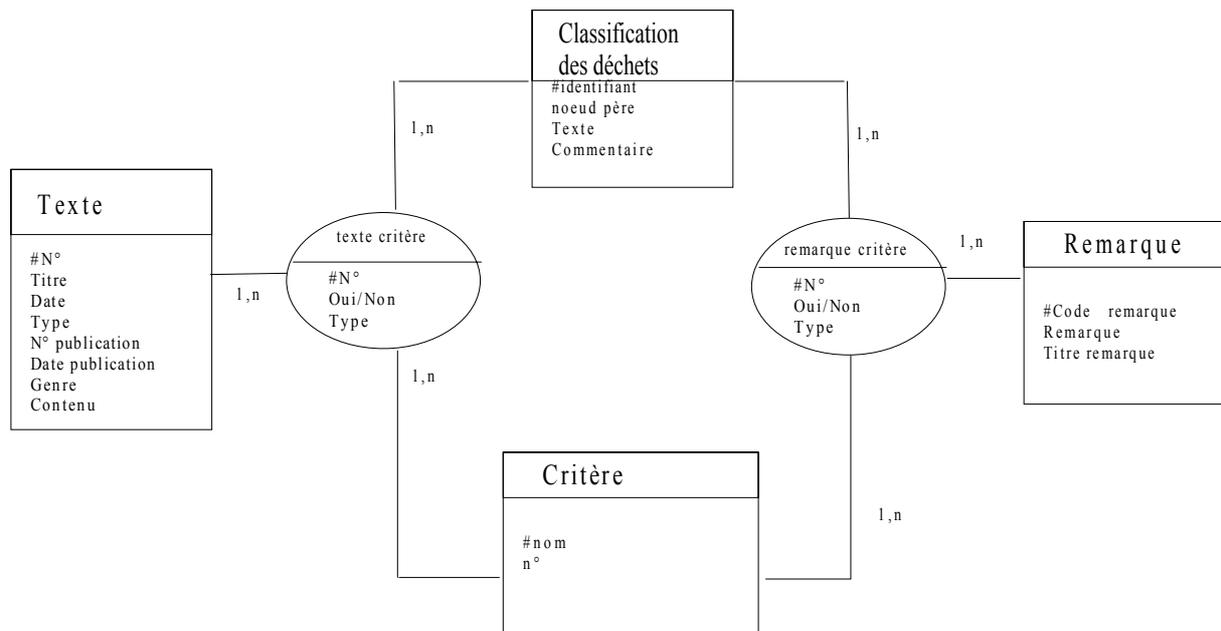


Figure II-17 : Relation entre les types de déchets, les critères d'admission et les éléments de réponse (textes et remarques)

3) Principe de fonctionnement du système d'aide à la décision

Nous avons décrit brièvement la structure de données de notre outil. Nous allons maintenant expliquer comment il fonctionne, c'est à dire de quelle manière, à partir de la description d'un déchet le logiciel aboutit à une conclusion.

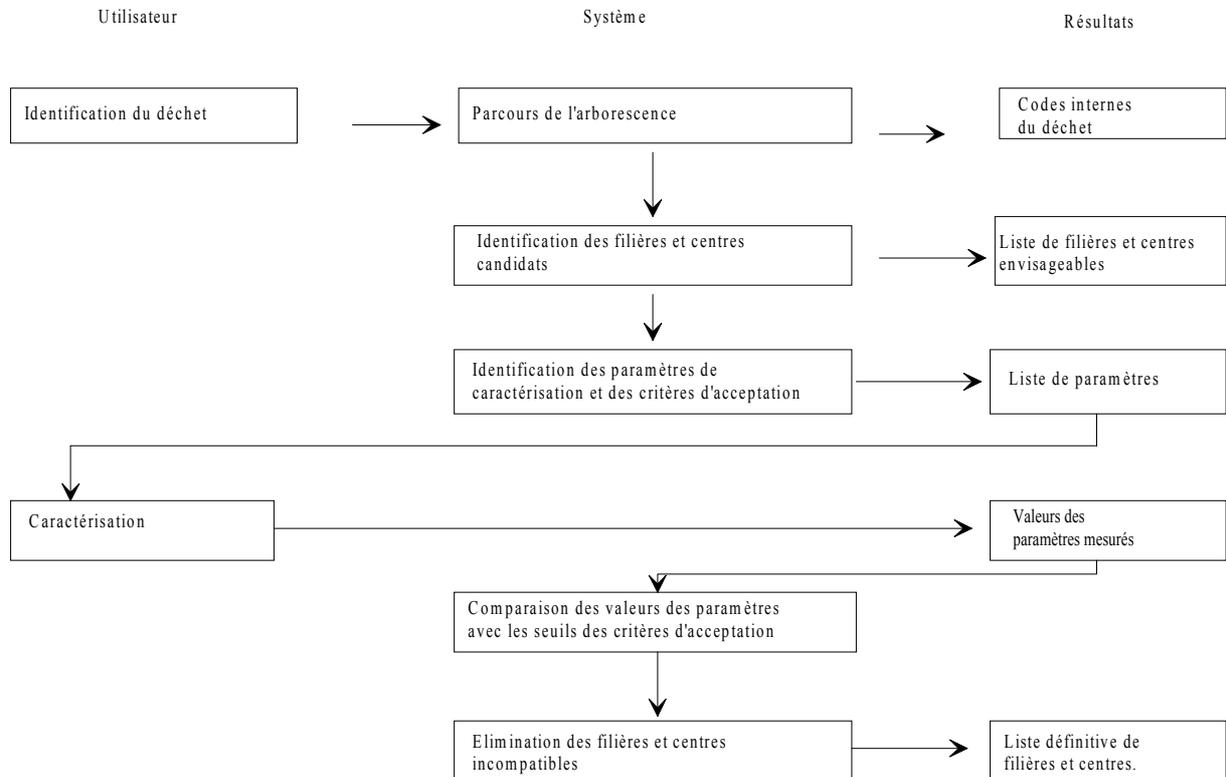
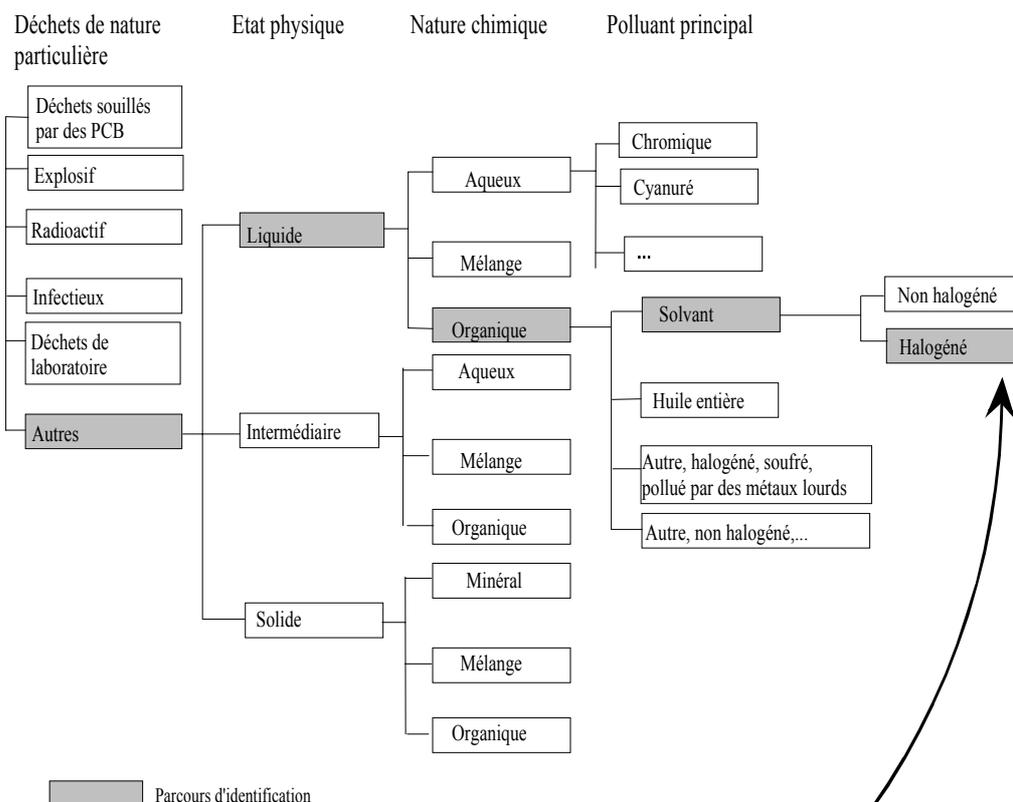


Figure II-18 : Déroulement schématisé d'une session d'aide à la décision

3.1) Identification du déchet

Pour l'utilisateur, une session d'aide à la décision se déroule en deux étapes : une étape d'identification du déchet, puis une étape de caractérisation. L'identification peut être menée de deux manières : soit en utilisant la classification des déchets proposée dans l'outil, soit en ayant recours à la nomenclature française des déchets. La figure II-19 illustre ces deux approches. Certaines catégories de la nomenclature française des déchets sont très peu explicites. Dans ce cas, il sera nécessaire de compléter cette première approche en précisant l'identité du déchet dans la classification.

Classification arborescente des déchets



Nomenclature française des déchets

- C 105 Liquides, bains et boues chromiques acides.
- C 106 Liquides, bains et boues chromiques non acides.
- C 107 Liquides, bains et boues cyanurés.
- C 108 Autres liquides, bains et boues contenant des métaux non précipités
- C 121 Solvants halogénés.
- C 122 Solvants non halogénés.
- C 123 Déchets aqueux souillés de solvants et halogénés.
- C 124 Déchets aqueux souillés de solvants et non halogénés.
- C 125 Culots non aqueux halogénés de régénération de solvants.
- C 126 Culots non aqueux non halogénés de régénération de solvants.
- C...

Figure II-19 : Correspondance entre la classification arborescente des déchets et la nomenclature française, exemple des solvants halogénés.

3.2) Sélection des filières candidates

A l'issue du parcours nécessaire à l'identification du déchet dans la classification arborescente, le système aboutit à quatre listes : filières, centres, remarques et textes. Il s'agit des solutions de traitement candidates.

3.3) Elimination des solutions incompatibles

Parmi ces solutions, certaines sont liées à des critères d'acceptation. Le système extrait donc la liste des paramètres de caractérisation pertinents, qu'il propose à l'utilisateur. Celui-ci fournit les différentes valeurs de ces paramètres, dans la mesure de ses connaissances. Le logiciel élimine alors les solutions incompatibles avec les valeurs entrées. Au cas où l'utilisateur ne connaît pas les valeurs des paramètres demandées, aucune solution n'est éliminée.

3.4) Proposition des solutions

A l'issue de ces étapes, les solutions de traitement sont proposées sous forme de listes de centres, de filières et de textes auxquelles viennent s'ajouter des commentaires sur les solutions proposées. L'utilisateur peut obtenir des informations complémentaires sur chaque solution sélectionnée, principe de fonctionnement, conventionnement, etc...

4) Implantation des connaissances et stratégie d'évolution

Nous avons, dans ce qui précède, essayé de faire ressortir les entités qui sont impliquées dans le choix d'une filière de traitement de déchets industriels. Ceci a abouti à un outil, qui se présente sous la forme d'une structure de données et de procédures de traitement de ces données. La qualité des résultats de cet outil est certes liée à sa structure, mais elle dépend tout autant, sinon plus, de la qualité des informations que l'on y introduit.

Les exemples de filières de traitement et de centres de traitement proposés permettent de comprendre la nature des informations mises en jeu. Dans la pratique, nous avons introduit :

- cent quarante centres de traitement,
- quarante en une filières de traitement,

ce qui se traduit par 1400 liens entre des centres, des catégories de déchets et des critères d'acceptation et 243 liens du même type pour les filières de traitement.

Cette information ne constitue pas un ensemble figé. Elle doit servir de base au développement d'un système toujours plus complet et plus précis dans ses recommandations.

Pour introduire les premiers éléments de connaissance, nous avons suivi une méthode qui doit servir de guide pour l'évolution du système.

4.1) Ajout ou suppression d'une filière de traitement

L'évolution des recherches en matière de traitement des déchets, et particulièrement en matière de valorisation, fait que l'on devrait voir apparaître de nouvelles filières de traitement externe dans les années qui viennent. C'est par exemple le cas pour les boues d'hydroxydes. La société TREDI poursuit actuellement des études pour mettre au point un procédé économique de valorisation de ce type de déchet^[Lachevre 95]. Ces recherches ont déjà abouti à la valorisation de boues d'hydroxydes à forte teneur en fer sous forme de ferrites magnétiques.

Chaque nouvelle filière devra pouvoir s'insérer dans la structure existante sans remettre en cause les données déjà acquises. L'intégration d'une nouvelle filière devra s'opérer selon les étapes suivantes :

4.1.1) Identification des déchets cibles de la filière

Il s'agit d'identifier tous les déchets de l'arborescence susceptibles d'être traités par la filière considérée. Cette recherche est facilitée par le caractère progressif de l'identification des déchets (état physique puis la nature chimique de la matrice du déchet).

Il y a alors deux possibilités :

- les déchets cibles correspondent déjà à des niveaux de la classification arborescente des déchets. Il suffit alors de créer les liens entre les déchets et la nouvelle filière.
- un déchet cible ne correspond pas à une catégorie de déchets déjà identifiée. Il faut alors créer la sous-classe correspondante. Pour cela, on identifiera les caractéristiques de base du déchet dans l'arborescence, jusqu'à atteindre un niveau dans lequel il devient impossible d'identifier le déchet. C'est là que l'on créera la nouvelle sous-classe, en vérifiant sa cohérence avec les autres catégories du même niveau.

L'identification des déchets cibles passe par la réponse aux questions suivantes :

- Quels sont les états physiques du déchet admissible dans la filière considérée ?
- Quelle est la nature chimique des produits visés par la filière considérée ?
- Quels sont les polluants spécifiques du type de déchets considérés qui peuvent ou ne peuvent pas être retenus ou détruits par la filière ? Il faudra, pour répondre à cette question

prendre en compte les traitements complémentaires qui sont normalement associés au traitement principal dans la filière considérée. Lorsque différents types de traitements complémentaires sont utilisés et entraînent des différences notables sur la nature des déchets traités, on aura intérêt à créer de nouvelles filières pour les distinguer, comme c'est le cas pour les différentes filières d'incinération.

4.1.2) Identification des critères d'admission

Pour chaque catégorie de déchets identifiée précédemment, on établira les critères d'admission ou d'exclusion de la filière. Ces critères doivent être exprimés sous la forme d'inégalités entre des paramètres ou des fonctions de paramètres mesurables sur le déchet et des seuils maximum et minimum à valeurs fixes.

Ces critères d'admission font éventuellement intervenir des paramètres qui n'étaient pas pris en compte jusqu'alors par le système, et qu'il faut ajouter.

Pour établir ces critères d'admission, on tiendra compte :

- de la réglementation, qui pourra imposer des compositions spécifiques pour certaines catégories de déchets,
- des modèles physico-chimiques, qui fourniront éventuellement des fonctions de transfert de pollution à comparer avec les normes de rejet prévues par la loi. L'utilisation de ces modèles, impose d'examiner les domaines de validité des formules que l'on utilisera et quant à leur représentativité pour une pratique industrielle. En particulier, on devra estimer les probabilités de mélanges au niveau du centre de traitement et la possibilité de recourir à des traitements complémentaires courants mais non pris en compte dans les modèles.

4.1.3) Création du lien entre la filière de traitement et les déchets cibles

Chaque lien fait intervenir le code de la filière, celui du déchet concerné et celui du critère d'admission. Nous avons établi plusieurs catégories de liens :

liens par défaut : la filière est proposée par défaut lorsque le déchet identifié lui correspond et lorsqu'aucun paramètre de caractérisation n'a pu être mesuré ou lorsque tous les paramètres mesurés sont conformes avec le critère d'admission.

liens par ajout : la filière n'est proposée que dans la mesure où des paramètres de caractérisation ont été fournis au système et où tous ces paramètres sont conformes aux critères d'admission;

liens par supplément : ce type de lien permet d'ajouter des critères d'admission sans nécessairement entraîner la proposition de la filière.

4.2) Ajout ou suppression d'un centre de traitement

Les modalités d'ajout d'un centre de traitement sont similaires à celles décrites plus haut pour une filière de traitement. Seules varient les sources d'information qui vont fournir l'identité des déchets traitables par le centre et les critères d'admission. On les trouvera principalement dans l'arrêté préfectoral de classement du centre.

Pour la définition des déchets admissibles par le centre, on distingue les centres qui utilisent la nomenclature française des déchets de ceux qui ont plutôt recours à un système propre d'identification.

- Pour les premiers on établit d'abord un lien entre le centre et les rubriques de la nomenclature. Celles-ci étant par ailleurs reliées à l'arborescence d'identification des déchets, il ne restera plus qu'à valider les liens proposés par le système, en fonction de considérations de bon sens. On élimine notamment les liens entre les centres et les catégories de déchets trop imprécises telles que la rubrique C 321 (loupés et chutes de fabrication non pris en compte dans les rubriques précédentes) ou C284 (résidus de décantation, filtration, centrifugation) auxquelles il est impossible d'associer des caractéristiques précises comme l'état physique ou la nature chimique.
- Pour les autres centres, il faut identifier dans la classification arborescente les déchets mentionnés dans l'arrêté de classement, en procédant comme pour les filières de traitement en cas de déchet inexistant.

Les critères d'admission sont aussi fournis par l'arrêté de classement. On prendra garde au fait que certains arrêtés précisent des compositions limites de déchets admissibles en entrée de

procédé et non de centre, ce qui signifie que des mélanges sont autorisés avant traitement pour amener les déchets aux normes.

4.3) Répercussion des modifications de la classification des déchets

Chaque ajout ou modification de la classification des déchets implique de reconsidérer les liens déchet-centre ou déchet-filière déjà existant. En cas d'ajout d'une nouvelle catégorie, il faut vérifier que les solutions proposées en amont de la modification sont bien compatibles avec le déchet ajouté. Il faut aussi établir des liens avec les filières et les centres proposés au même niveau qui sont susceptibles de concerner le déchet ajouté.

5) Validation et perspectives

Un système d'aide à la décision ne présente un intérêt que s'il est utilisé. Il doit pour cela être suffisamment fiable et évolutif. La fiabilité passe par une évaluation et une validation de la structure, des fonctionnalités du système et de son contenu. Cette évaluation doit aussi permettre de juger les capacités d'évolution du système. On peut distinguer trois niveaux dans l'évaluation :

- le niveau du concepteur,
- le niveau de l'utilisateur,
- le niveau de l'expert.

La prise en compte de ces trois points de vue est nécessaire pour établir une procédure de validation rigoureuse en étroite collaboration avec l'Ademe. Les quelques éléments de réflexion qui suivent résultent uniquement de l'utilisation de l'outil en tant que concepteur, tant sur le plan des données que de la structure.

L'introduction de la connaissance, en tant que dernière étape de développement de l'outil d'aide à la décision, a permis de tester et de valider les capacités de l'outil en termes de structure et de fonctionnalités dédiées à la construction. Nous avons aussi pu vérifier que la structure arborescente et les critères d'admission étaient adaptés à l'information que nous avons à introduire. Cette structure permet aussi une mise à jour facile de la connaissance à condition que l'on respecte les règles que nous avons énoncé dans les paragraphes précédents.

Sur le plan du contenu, il convient de distinguer les deux aspects suivants : base de données et système d'aide à la décision. Pour la base de données, on devra vérifier la complétude de l'information et son exactitude. C'est une procédure assez longue qui implique de vérifier la conformité du contenu des tables de la base avec les sources d'information disponibles, mais aussi, parfois de remettre en question ces sources d'information elles-mêmes. C'est essentiellement à l'utilisation que les erreurs dues à l'inexactitude des sources d'information apparaîtront.

L'évaluation de la fiabilité du système dans sa fonction d'aide à la décision est plus délicate dans la mesure où elle doit faire intervenir des experts du traitement des déchets. Le nombre de filières (40) et de centres considérés (140) rend la tâche difficile et implique la participation de spécialistes de différents types de traitement. Cette évaluation débouchera très probablement sur une évolution de la connaissance contenue dans l'outil :

- modification de l'arborescence de classification des déchets,
- ajout de nouveaux paramètres de caractérisation et de nouveaux critères d'exclusion.

La capacité du système à intégrer ces modifications en fait un outil de capitalisation des connaissances, ce qui est, à notre avis, tout aussi important que sa fonction d'aide à la décision. Sa réalisation a par ailleurs fait apparaître des lacunes dans les connaissances relatives au traitement des déchets en ce qui concerne notamment les fonctions de transfert et les seuils de rejet.

5.1) Fonction de transfert

Nous n'avons pas été en mesure de fournir une fonction de transfert de la pollution pour de nombreux polluants et pour de nombreuses filières de traitement. Sans cette fonction de transfert, la décision ne peut porter que sur l'identité du déchet, ce qui en limite la fiabilité. Cette lacune est due en partie à l'absence de données et de modèles fiables pour de nombreux procédés de traitement. Il y a donc un important travail bibliographique, théorique et expérimental à réaliser pour compléter le travail de conception de cet outil.

5.2) Approche environnementale

Une fois la fonction de transfert connue, il faut disposer d'un système de référence pour pouvoir évaluer l'efficacité d'un traitement. Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé les normes de rejet réglementaires. Même si l'élaboration de ces normes se fait au regard d'études toxicologiques et éco-toxicologiques, elles ne permettent pas explicitement de faire le lien avec la notion d'impact. Il n'est donc pas possible de classer les filières entre elles en fonction de leur effet sur l'environnement et d'être sûr que l'effet global d'un traitement est positif. De même, il n'est pas possible de tenir compte du milieu dans lequel a lieu le traitement, qui peut être plus ou moins sensible à certains facteurs d'impact. Des progrès devraient être enregistrés dans ces deux domaines grâce aux méthodes d'analyse des cycles de vie^[ROUSSEAU 93] et aux recherches sur l'écocompatibilité des déchets^[Mayeux 96]. Dans cet esprit, il serait intéressant de coupler cet outil à une base de données sur le danger et la toxicité des produits.

5.3) Extension des connaissances

Le fait d'avoir employé un support de type base de données permet d'envisager facilement toutes sortes d'extensions, parmi lesquelles on peut citer :

- la valorisation des déchets banals,
- l'identification de procédés de traitement internes ou de technologies propres.

Cette dernière proposition, appliquée au domaine du traitement de surface, fait l'objet de la troisième partie de ce mémoire.

5.4) Perspectives informatiques

Sur le plan de l'informatique, le prolongement de cet outil peut aussi fournir des perspectives intéressantes. En effet, l'approche consistant à représenter la connaissance par des liens entre un système d'identification, des critères d'exclusion et des solutions constitue un intermédiaire entre une base de données classique et un système à base de règles. Il peut trouver des applications dans certains autres cas d'aide à la décision appliqués à l'environnement ou non.

L'outil que nous avons obtenu est plus facile à gérer qu'un système à base de règles, notamment pour la mise à jour. Il présente cependant certaines lacunes :

- Il est nécessaire d'exprimer l'information dans le formalisme choisi, ce qui n'est pas toujours possible. Pour remédier à cet inconvénient, nous avons développé une maquette d'outil intégrant un petit moteur d'inférence, qui, sans remettre en question la structure initiale permet d'introduire des éléments de raisonnement à base de règles. Il serait intéressant de poursuivre dans cette voie, en gardant à l'esprit qu'en rendant l'outil plus complexe, on risque de le rendre plus difficile à utiliser et à mettre à jour.
- L'introduction de nouvelles données nécessite une approche méthodique et un travail de vérification de la cohérence, qui n'a pas été encore complètement formalisés, faisant appel, par exemple, aux techniques d'apprentissage automatique.

V Exemple d'utilisation du système d'aide à la décision pour le traitement externe des déchets.

A travers cet exemple, nous allons montrer le principe de fonctionnement de notre outil dans sa fonction d'aide à la décision, qui ne représente qu'une partie des possibilités du système, qui constitue par ailleurs un support d'information et d'archivage de données sur les solutions de traitement et sur la réglementation.

Le déchet choisi pour cet exemple ne présente pas a priori de difficultés particulières de traitement. Il s'agit d'un déchet de synthèse liquide organique que l'on peut supposer faiblement chloré ($Cl < 2\%$) et peu chargé en métaux lourds. Nous verrons cependant comment, en modifiant certaines des caractéristiques du déchet, on aboutit à des solutions de traitement assez différentes les unes des autres.

1) Identification du déchet.

La première étape d'une session d'aide à la décision consiste à identifier le déchet. On dispose pour cela de deux possibilités :

- l'utilisation des nomenclatures officielles (figure II-20),
- le recours au système d'identification du système, qui repose sur une classification arborescente des déchets fondée essentiellement sur des critères physico-chimiques (figure II-21).

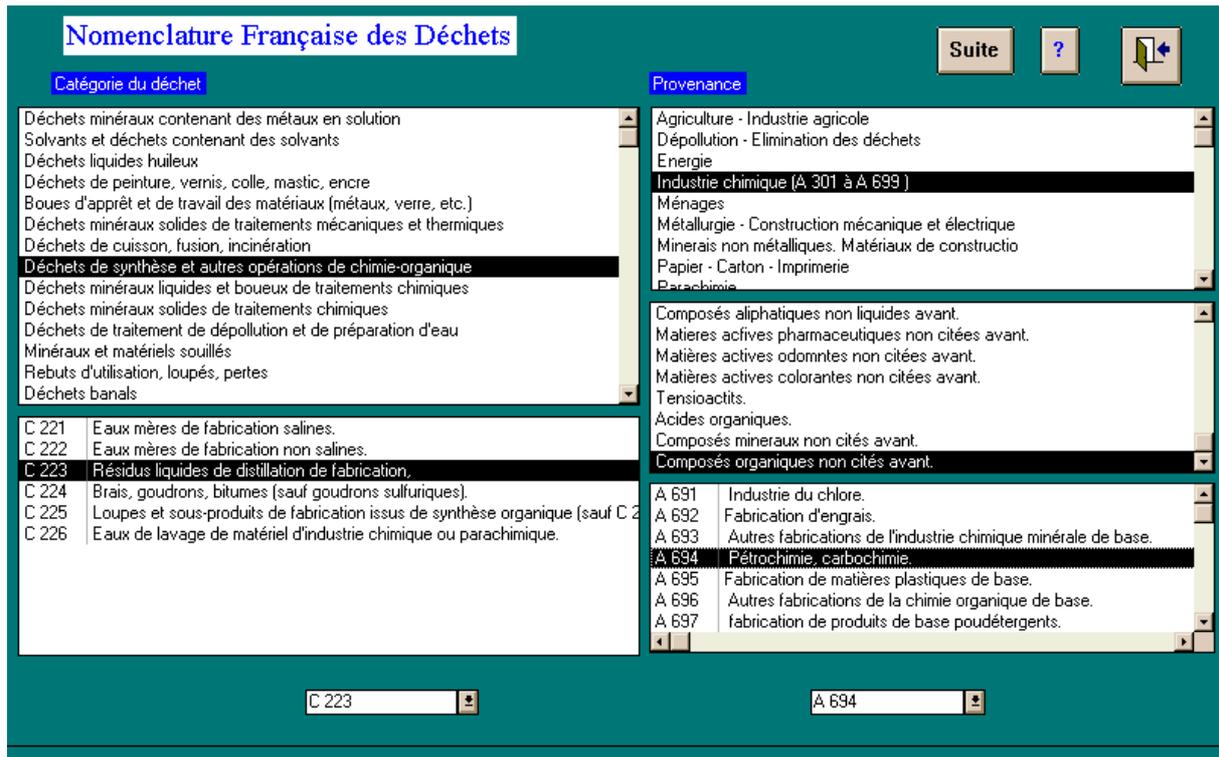


Figure II-20 : Identification du déchet au moyen de la nomenclature française des déchets.

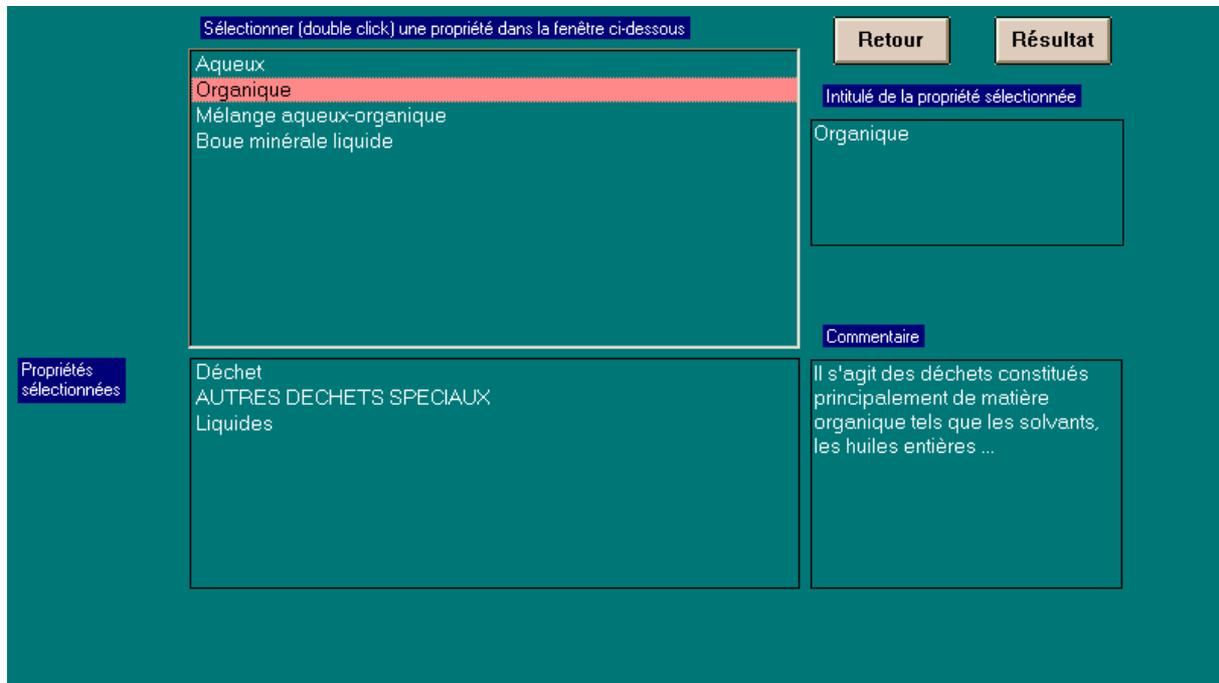


Figure II-21 : Identification des déchets au moyen de la classification arborescente.

La plupart du temps, l'identification du déchet par la nomenclature française ne fournit pas assez d'information au système. L'utilisateur doit compléter cette première étape en précisant les caractéristiques du déchet dans la classification arborescente.

L'étape d'identification aboutit à une identité constituée en pratique par une liste de caractéristiques. Pour notre déchet, il s'agit de :

- liquide
- organique
- non halogéné, sans métaux lourds

En pratique, nous avons encore la possibilité de préciser s'il s'agit d'un culot de distillation de solvants ou bien d'un autre type de déchet. Comme l'outil a été conçu pour l'identification imprécise, nous pouvons choisir de ne pas identifier d'avantage le déchet.

2) Caractérisation

A partir de cette identité de déchet, l'outil effectue une première sélection de solutions de traitement. En pratique, la nature du déchet l'oriente logiquement vers des solutions d'incinération. Comme nous avons précisé que celui-ci était non halogéné, il s'agit d'incinération classique ou en cimenterie.

Aux solutions de traitement sélectionnées sont associés des critères numériques portant sur différentes caractéristiques du déchet. Ces critères fournissent une liste de paramètres que l'utilisateur doit renseigner (figure II-22) . Dans ce cas, il s'agit de la teneur en chlore et en métaux lourds (pour vérifier que le déchet est bien susceptible d'être traité par incinération classique), du PCI (pour évaluer les possibilités de valorisation thermique et calculer les taux de transfert de pollution), de la teneur en PCB, de la teneur en soufre et en halogènes différents du chlore (F, Br et I).

Paramètres mesurés					Résultat	?
critère	élément	valeur	unité	Trier		
	PCB	PCB/PCT		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Alcalins		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	As		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Autres halogènes		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Cd	12	mg/kg	<input type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Chlore		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Cr		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Hg		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	métaux lourds		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Pb	800	mg/kg	<input type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	PCI	5200	th/t	<input type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Point d'éclair		°C	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Résidus de la combustion		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Sédiments		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
∅	Phase organique liquide	Soufre	1	%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	
	Phase organique liquide	Zn		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue	

Figure II-22 : Introduction des données numériques concernant le déchet.

L'introduction d'information à ce niveau est facultative. Si elle n'a pas lieu, l'outil propose les solutions qu'il avait sélectionné initialement. Dans le cas contraire, les données introduites par l'utilisateur sont mises en oeuvre pour éliminer les solutions incompatibles avec le déchet caractérisé ou ajouter des solutions qui n'avaient pas été retenues initialement en raison de l'identité du déchet. Dans ce dernier cas, il s'agit de compenser une identification défectueuse.

Ces données peuvent être utilisées brutes par le système (c'est le cas de la teneur en chlore) ou faire l'objet d'un calcul. Ainsi, les teneurs en métaux lourds et le PCI sont exploitées pour fournir la teneur en métal qui serait effectivement rejeté en cas d'incinération. La valeur obtenue est ensuite comparée au seuil réglementaire (fixé ici à 5 mg/Nm^3 , ce qui correspond au maximum autorisé selon les seuils de rejet dont nous disposons actuellement). Les rejets doivent respecter la condition suivante (c.f. IV.2.6.1) :

$$Seuil_M \geq \frac{\eta(1 - \tau)}{V_f} \cdot X_M$$

En pratique nous exprimons cette condition pour chaque filière de la manière suivante :

$$\frac{X_M}{V_f} < \frac{Seuil_M}{\eta(1 - \tau)}$$

Le membre de gauche ne dépend que du déchet (PCI et teneur en métaux lourds), il est calculé à chaque session, alors que le membre de droite dépend uniquement du type d'installation et du métal considéré. C'est donc une constante fixée pour chaque filière et pour chaque métal au niveau du critère d'acceptation correspondant.

critère	élément	valeur	unité	Trier
Phase organique liquide	Alcalins		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	As		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Autres halogènes		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Cd	12,00	mg/kg	<input type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Cd/vf	1,67	mg/Nm3	<input type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Chlore		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	contribution Hg et Pb			<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Cr		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Halogènes (Cl + autres)		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Hg		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Hg/vf		mg/Nm3	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	métaux lourds		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Pb	800,00	mg/kg	<input type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Pb/vf	111,42	mg/Nm3	<input type="radio"/> Valeur inconnue
PCB	PCB/PCT		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	PCI	5 200,00	th/t	<input type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Point d'éclair		°C	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Résidus de la combustion		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	S/vf	0,14	mg/Nm3	<input type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Sédiments		%	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	somme métaux		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Soufre	1,00	%	<input type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Volume de fumée liquide	7,18	Nm3	<input type="radio"/> Valeur inconnue
Phase organique liquide	Zn		mg/kg	<input checked="" type="radio"/> Valeur inconnue

Figure II-23: Résultats des calculs effectués par l'outil (volume de fumée V_f , M/V_f)

L'étape suivante permet de préciser certaines données qualitatives comme le mode de conditionnement ou la provenance. Ces paramètres interviennent souvent dans l'acceptation définitive d'un déchet dans un centre de traitement.

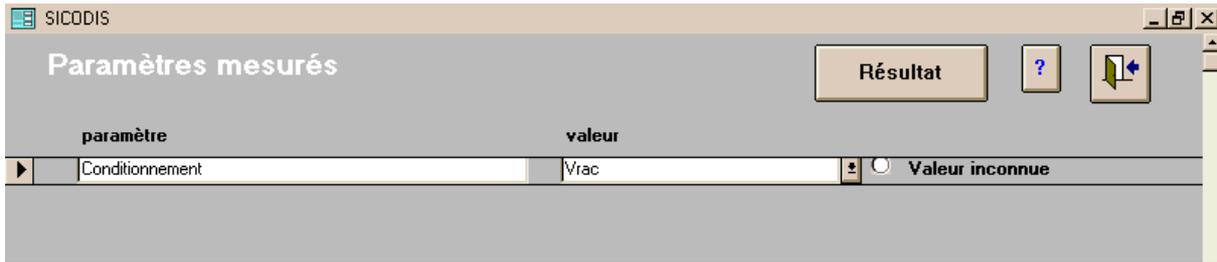


Figure II-23 : Renseignements supplémentaires

3) Résultat

A l'issue des étapes d'identification et de caractérisation (cette dernière est facultative), le résultat est proposé à l'utilisateur dans un formulaire (figure II-24) sous forme :

- d'une liste de centres susceptibles de traiter le déchet,
- d'une liste de filières conseillées.

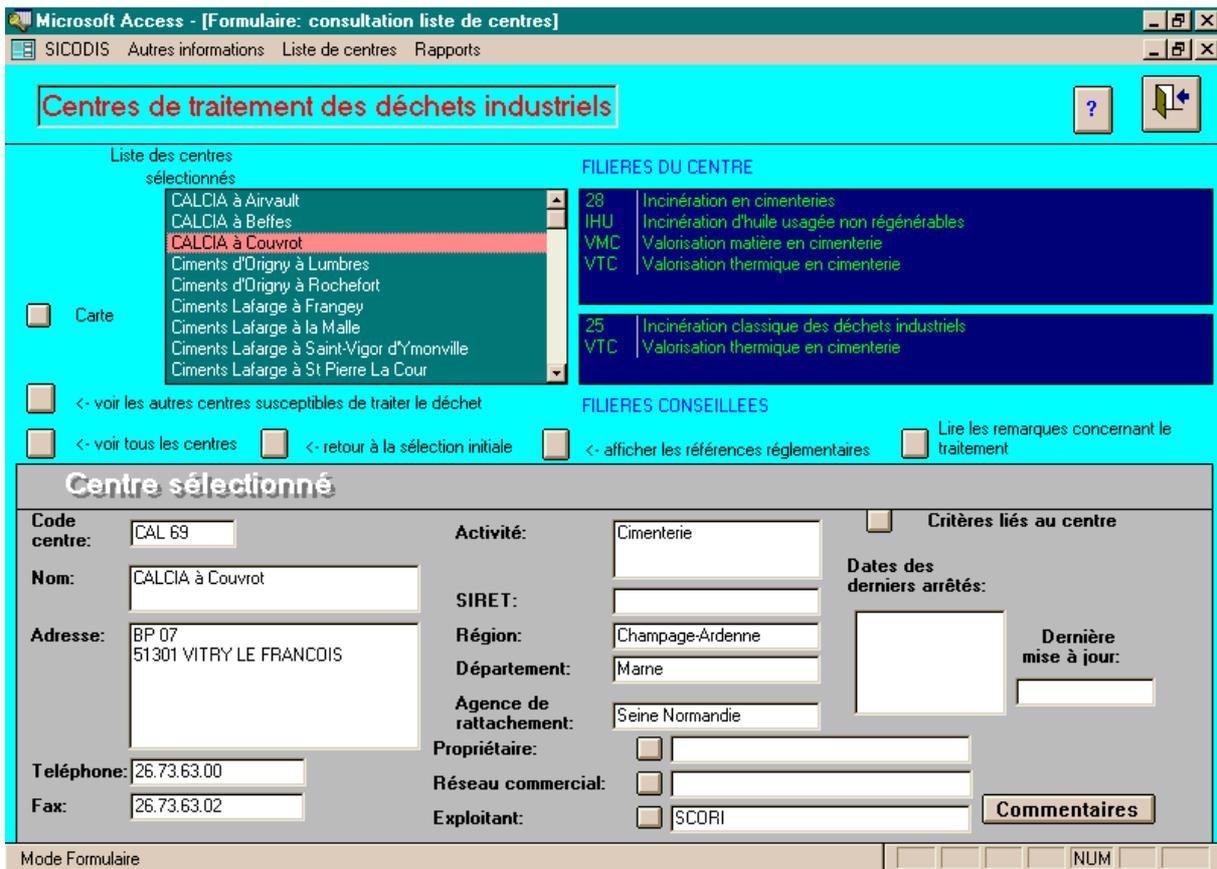


Figure II-24 : écran de résultat à l'issue d'une session

En cliquant sur les éléments de la liste de centres conseillés, l'utilisateur obtient des informations de base : adresse, téléphone, filières proposées, et des explications sur les filières

conseillées. Enfin, l'outil fournit aussi une carte de l'implantation des centres disponibles (figure II-25).

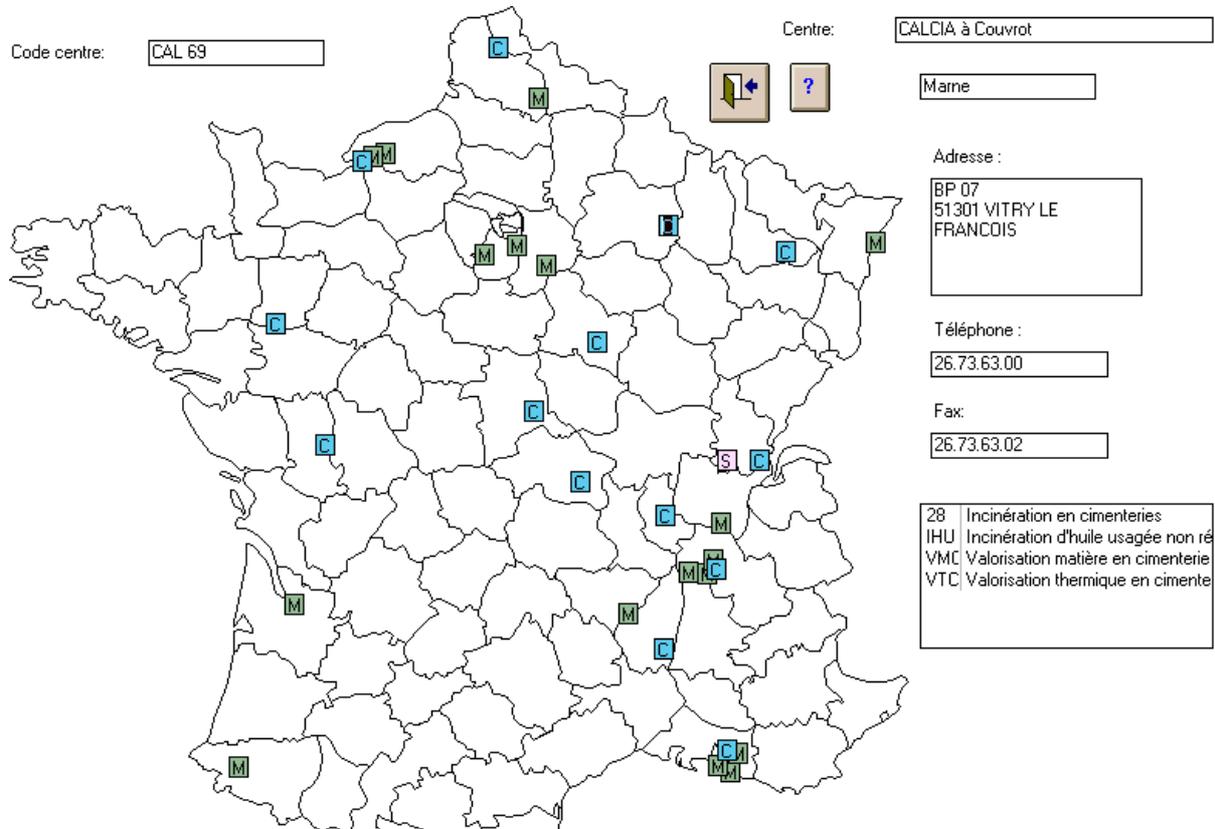


Figure II-25 : Carte des centres de traitement sélectionnés

4) Influence des données quantitatives sur le résultat

Si l'utilisateur modifie les caractéristiques du déchet dans l'étape de caractérisation, il obtient un nouveau résultat (figure II-26). Par exemple, les filières et centres obtenus ci-dessous correspondent au passage du chlore à 3% pour le déchet précédent. Ceci conduit au remplacement de l'incinération simple par l'incinération en installation disposant d'un système d'épuration des fumées. Le traitement du déchet en cimenterie reste possible dans certaines de ces installations qui acceptent des déchets contenant jusqu'à 5% de chlore. Les autres cimenteries ont été supprimées de la liste des centres par le système. Cette modification de la teneur en chlore a aussi pour effet de déclencher un avertissement puisqu'elle est en contradiction avec l'identité initiale du déchet.

Centres de traitement des déchets industriels

Liste des centres sélectionnés

- CALCIA à Couvrot
- Ciments Vicat à Xeuilley**
- GEREP
- Rhône Poulenc Pont de claix (TERIS)
- SARP Industries Limay
- SEDIBEX à Sandouville
- SIAP
- SOBEGI
- SOLAMAT-MEREX Fos

Carte

<- voir les autres centres susceptibles de traiter le déchet

<- voir tous les centres

<- retour à la sélection initiale

<- afficher les références réglementaires

Lire les remarques concernant le traitement

FILIÈRES DU CENTRE

- 28 Incinération en cimenteries
- IHU Incinération d'huile usagée non régénérables
- VTC Valorisation thermique en cimenterie

FILIÈRES CONSEILLÉES

- 21 Incinération en installation munie d'un dispositif de neutralisation des fumées de
- VTC Valorisation thermique en cimenterie

Centre sélectionné

Code centre: Cim 68

Nom: Ciments Vicat à Xeuilley

Adresse: 54990 Xeuilley

Téléphone: 83.47.03.86

Fax: 83.47.10.18

Activité: Cimenterie

SIRET:

Région: Lorraine

Département: Meurthe-et-Moselle

Agence de rattachement: Rhin Meuse

Propriétaire: Ciments Vicat

Réseau commercial:

Exploitant: SCORI

Critères liés au centre

Dates des derniers arrêtés:

Dernière mise à jour:

Mode Formulaire

Figure II-26 : résultat modifié après passage du chlore à 3%

5) Mise à jour

Dans son état actuel, l'outil présente déjà un intérêt en tant que base de données sur les centres et les filières de traitement. Sur le plan de l'aide à la décision, il fournit des résultats intéressants, même si certaines catégories de déchets requièrent des opérations de validation complémentaires. L'intérêt de ce système réside aussi dans sa capacité d'évolution ; il est doté d'interfaces permettant l'introduction ou la modification d'information. Son contenu initial, construit à partir des arrêtés de classement et de quelques données techniques, pourra être enrichi à mesure que des études permettront d'obtenir des connaissances plus précises sur certains centres de traitement ou sur certaines filières. Ceci est évidemment important pour les traitements classiques mais d'avantage encore pour les nouvelles filières de valorisation qui sont en train d'apparaître actuellement. La figure II-27 montre l'interface qui permet d'établir le lien entre une catégorie de déchets (ici des piles au mercure) et des centres de traitement.

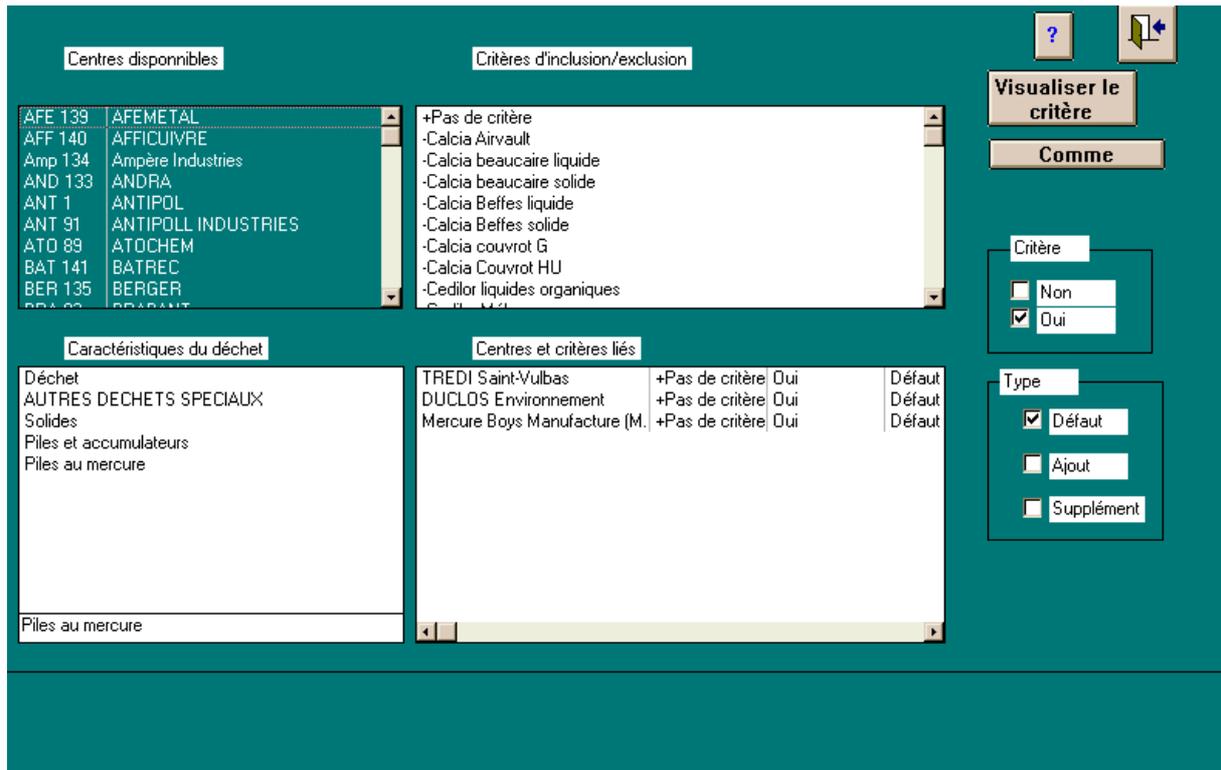


Figure II-27 : écran de modification des liens entre catégories de déchets et centres de traitement.

The screenshot shows a window titled 'critères valeurs' for 'Lafarge Frangey so'. It contains a table with the following data:

critère numérique	élément	min	max	Unité
-Lafarge Frangey solide	Autres halogènes	0	1	%
-Lafarge Frangey solide	Cd	0	1000	mg/kg
-Lafarge Frangey solide	Chlore	0	2	%
-Lafarge Frangey solide	Hg	0	1000	mg/kg
-Lafarge Frangey solide	métaux lourds	0	10000	mg/kg
-Lafarge Frangey solide	Pb	0	1000	mg/kg
-Lafarge Frangey solide	Résidus de la combustion	0	5	%
-Lafarge Frangey solide	Soufre	0	5	%
-Lafarge Frangey solide	Température de ramollissement	150		°C
*				

At the bottom, there are navigation controls showing 'Enr:1 sur 9'.

Figure II-28 : exemple de critère d'acceptation (ici pour la cimenterie Lafarge à Frangey)

VI Synthèse des structures et des fonctions du système

Dans cette deuxième partie, nous avons décrit le processus de développement d'un système d'aide à la décision pour le traitement externe de déchets industriels spéciaux. Ce système, développé en partenariat avec l'Ademe, permet d'identifier des filières de traitement et des centres de traitement pour un déchet. Il fournit aussi des informations générales sur les filières, les centres et la réglementation.

La formalisation des connaissances qui conduisent à l'identification d'une solution de traitement nécessite, d'abord, de définir les critères génériques de sélection d'une filière de traitement :

- compatibilité physico-chimique du déchet avec la finalité de la filière,
- compatibilité réglementaire du déchet avec la filière,
- influence du déchet sur le fonctionnement de la filière,
- efficacité de la filière vis à vis d'un polluant contenu dans le déchet,

Ces critères doivent être mis en relation avec le système de référence permettant d'évaluer le résultat du traitement, en l'occurrence les normes de rejet.

Il faut intégrer ensuite les différentes sources d'information sur les filières de traitement comme le descriptif de la filière et de ses objectifs, la réglementation, ou les modèles théoriques.

Nous avons montré que la connaissance extraite de ces différents documents pouvait s'exprimer sous la forme de liens entre :

- des catégories de déchets,
- des critères faisant intervenir des paramètres de caractérisation des déchets et des valeurs seuils,
- des filières de traitement.

Le même formalisme peut être utilisé pour exprimer les connaissances concernant les centres de traitement, à partir des informations contenues dans les arrêtés de classement, qui

constituent la référence principale pour déterminer la nature et les caractéristiques des déchets admissibles.

La classification arborescente des déchets adaptée au mode de représentation de la connaissance fait intervenir :

- l'état physique du déchet,
- sa nature chimique,
- ses principaux contaminants.

Elle est complétée à certains niveaux par des informations relatives à la fonction initiale du déchet ou au procédé qui l'a généré.

L'identification du déchet par l'utilisateur dans l'arborescence d'identification permet d'aboutir à une désignation à partir de laquelle le système sélectionne un ensemble de solutions candidates et de critères d'acceptation. Le système propose alors à l'utilisateur une liste de paramètres, qui peuvent être évalués si les données sont disponibles. En fonction des seuils concernant les critères d'acceptation, le système élimine alors les filières incompatibles avec le déchet.

La structure arborescente permet en de compléter les connaissances du système en de nouvelles sous-classes de déchets si de nouvelles filières de traitement apparaissent, tout en respectant la cohérence des informations qu'il contient déjà.

TROISIEME PARTIE : Aide à la décision pour le traitement interne des déchets industriels spéciaux : application à l'industrie des traitements de surface.

I Introduction

La deuxième partie de ce mémoire était consacrée à la description de la démarche menant à l'élaboration d'un système d'information pour l'orientation des déchets industriels spéciaux vers des centres collectifs de traitement. Nous avons proposé la structure d'un outil, qui, à condition d'être maintenu à jour peut répondre au problème posé par le traitement externe des déchets industriels spéciaux. Cependant, pour tenir compte de l'ensemble des possibilités de traitement, il est indispensable de tenir compte des solutions qui peuvent être mises en place au sein même du site producteur du déchet.

Les systèmes d'aide à la décision constituent là aussi un moyen de réponse à ce problème malgré la différence d'approche entre le traitement des déchets en externe et en interne. Envisager le cas du traitement interne nécessite une approche sectorielle permettant de prendre en compte le procédé générateur du déchet. Elle est appliquée au domaine du traitement de surfaces.

Le bilan des différents procédés de traitement envisageables en interne conduit à dégager les critères spécifiques à prendre en compte pour le choix d'une filière d'élimination ou de valorisation. Deux approches sont envisageables pour la construction d'un système d'aide à la décision. La première est fondée sur l'utilisation de cas réels pour l'identification de solutions envisageables, la seconde fait appel à des raisonnements faisant intervenir les objectifs du process et à la nature des effluents pour identifier les procédés en fonction de leur finalité et de critères de fonctionnement et d'efficacité.

II Généralités sur le traitement interne

Le traitement interne nécessite une approche différente du traitement externe et génère des fonctions particulières du système d'aide à la décision.

1) Notion de traitement interne

Par traitement interne, nous entendons toute opération de détoxification ou de valorisation réalisée au sein de l'installation industrielle qui produit le déchet. Cette installation est éventuellement constituée de plusieurs unités fonctionnelles qui échangent des flux de matière ou d'énergie. En généralisant la notion de déchet nous pouvons considérer comme déchet tout flux de matière non désirée sortant de l'installation. Nous considérerons alors comme traitement interne toute opération destinée à modifier la nature de ce flux de matière afin de permettre :

- un rejet éco-compatible vers le milieu extérieur, et un stockage de la partie ultime du déchet,
- une utilisation dans une autre installation industrielle,
- ou bien un retour dans l'une des unités fonctionnelles.

La figure III-1 illustre les différents résultats possibles pour un traitement interne.

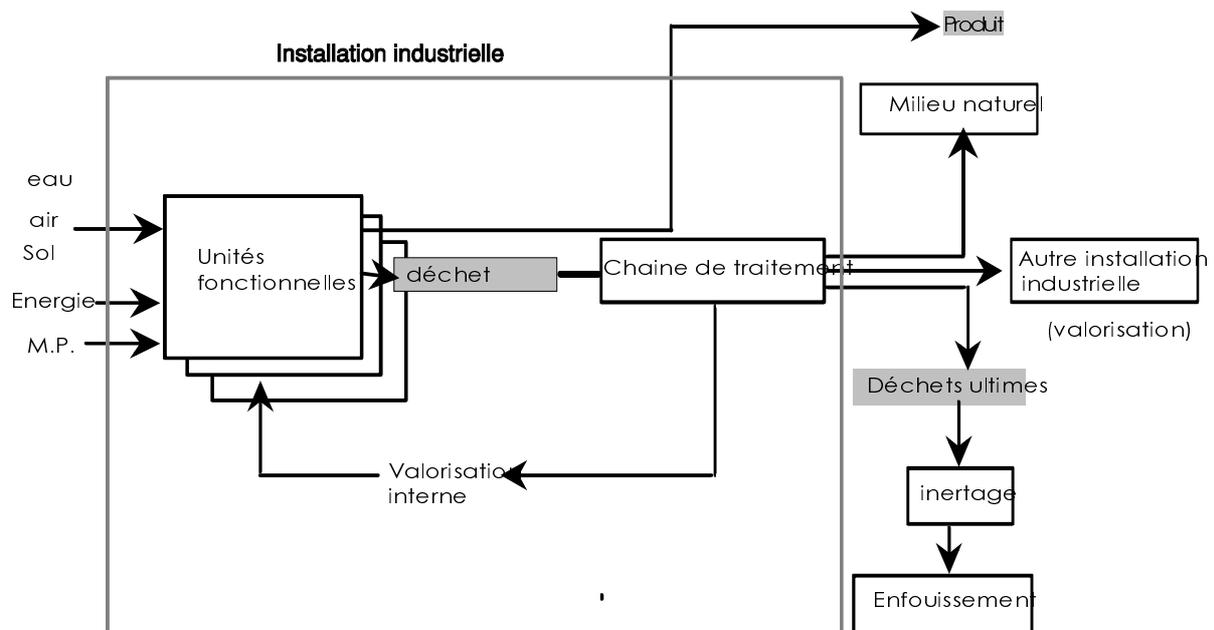


Figure III-1 : Flux de matière au sein d'une unité de production faisant apparaître le traitement interne et les différentes destinations des produits qu'il génère.

Parmi les formes de traitement énumérées ci-dessus, deux conduisent à "exporter" tout ou partie du déchet vers le milieu extérieur, qu'il s'agisse du milieu naturel ou d'un marché de matériaux ou de produits. Les critères qui déterminent si ce transfert vers l'extérieur est possible sont :

- les seuils réglementaires de rejet,
- les normes d'acceptation des déchets ultimes en centre d'enfouissement,
- l'existence d'un débouché pour les produits valorisés,
- le cahier des charges des repreneurs des produits valorisés.

La troisième option consiste à réutiliser le flux traité au sein même de l'installation industrielle productrice, soit dans l'unité fonctionnelle dont il est issu, soit dans une autre unité fonctionnelle. Il faut alors que le flux traité :

- retrouve une fonction dans l'une des unités en tant que matière première, catalyseur, énergie,..
- corresponde au cahier des charges de la fonction qu'il va remplir.

Ces différents critères, une fois explicités, conduisent à définir les objectifs du traitement à effectuer. Ce traitement peut alors être réalisé au moyen de procédés ayant chacun des contraintes propres. Celles-ci constituent alors un facteur limitant quant à la possibilité de mettre en oeuvre le traitement envisagé pour le déchet concerné.

Aux considérations techniques, il faut ensuite ajouter des considérations économiques relatives

- au coût du traitement,
- aux gains réalisables lors de la réutilisation du flux de déchet traité.

La difficulté associée au choix d'une solution de traitement interne est donc relative aussi bien au choix des procédés de traitement qu'à l'identification préalable des objectifs du traitement. On constate déjà sur ce point une différence fondamentale avec le traitement externe des déchets pour lequel l'existence de la filière constituait en soi une garantie de débouché.

Il ne s'agit plus de s'intéresser à une filière déjà constituée mais à un ensemble de procédés que l'on doit mettre en oeuvre pour traiter le déchet afin d'aboutir à un objectif donné. Le nombre de procédés existant (l'Ademe en compte 70 dans son catalogue des procédés de traitement des déchets industriels) accroît la complexité du problème.

2) Motivations pour un traitement interne

Les motivations d'un industriel pour avoir recours à un traitement interne plutôt qu'à un centre collectif sont variées. On peut citer :

- les coûts de traitement élevés en centres collectifs,
- les coûts de transport,
- les problèmes de stockage,
- les possibilités de valorisation en interne associée à des gains,
- l'absence éventuelle d'une filière de valorisation externe,
- le coût ou le gain éventuellement limité en valorisation externe,
- ...

D'autre part, à travers les études déchets, les industriels sont incités à diminuer leurs flux de déchets vers l'extérieur. Comme la valorisation externe ne réduit pas le flux de déchet issu de l'entreprise, elle est considérée de niveau 1*. Les nombreuses techniques de valorisation en interne se traduisent au contraire par une réduction des flux sortant de l'entreprise. Elles sont donc assimilées au niveau 0 (réduction à la source), qui est considéré comme prioritaire.

En revanche, le traitement en interne peut présenter des inconvénients non négligeables :

- maîtrise technique difficile,
- investissements importants,
- durée d'amortissement longue,
- embauche nécessaire d'un personnel qualifié et coûteux pour un poste *a priori* non productif,
- nécessité d'effectuer une étude technique longue et coûteuse,

* Voir paragraphe 7.3 du chapitre I de la première partie sur les études déchets.

- prise de risque.

3) Connaissance associée à la valorisation interne

Pour pouvoir envisager la réutilisation d'un flux de déchet traité, il faut :

- que le flux puisse répondre à une fonction dans l'unité de production considérée,
- qu'il soit compatible avec cette fonction,
- que sa valorisation ait un intérêt économique.

Il est donc impératif de disposer d'informations très complètes sur l'unité de production. Ces informations concernent l'ensemble des fonctions de production qui sont mises en oeuvre, leurs caractéristiques, leur cahier des charges. Elles peuvent aussi concerner l'état financier de l'entreprise ou les coûts associés aux différents flux de matière dans et hors de l'entreprise.

Dans la pratique industrielle, il est fréquent que les flux de déchets ne soient pas bien identifiés, bien pris en compte ou bien gérés. On observe souvent des mélanges qui rendent le traitement et *a fortiori* la valorisation difficile. Le traitement des déchets impose donc une étude des flux à tous les niveaux de l'entreprise.

Un flux peut être caractérisé par :

- son origine,
- sa destination,
- ses caractéristiques physico-chimiques,
- sa fonction.

Les caractéristiques physico-chimiques d'un flux de déchet doivent être évaluées en fonction des seuils de rejet imposées par la réglementation. Dans la mesure où une fonction de production pourra être destinataire de ce flux après traitement, il faut également pouvoir en évaluer la composition par rapport au cahier des charges de cette fonction.

4) Objectifs d'un système d'aide à la décision pour le traitement interne

Le choix d'un procédé de traitement en interne est le résultat d'un processus complexe qui fait intervenir des connaissances internes à l'entreprise, des connaissances externes concernant les procédés de traitement et les normes de rejet.

Un système d'aide à la décision n'a pas pour objectif de remplacer une étude technique approfondie dans la phase de mise en place d'une solution. En revanche, il peut permettre une identification des solutions réalisables et apporter des éléments de décision techniques ou économiques. Il doit aussi permettre d'identifier les flux et leurs caractéristiques, ainsi que de situer le problème en relation avec le contexte réglementaire. Pour aborder le traitement de déchet en interne, nous avons vu qu'il était nécessaire de disposer d'informations sur l'installation génératrice du déchet. Un système d'aide à la décision doit faciliter l'acquisition et l'interprétation de ces informations et mettre en relation les différents éléments dont on dispose afin d'aboutir à l'identification de solutions de traitement applicables.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de support de décision dans ce domaine. Nous avons donc entrepris le développement d'un tel outil, notre but n'étant pas alors d'aboutir à un système opérationnel mais plutôt de mettre en évidence les concepts généraux et les raisonnements indispensables pour sa conception. Nous nous sommes limités à un domaine d'application particulier en raison du nombre important de données qui entrent en jeu : l'industrie du traitement de surface.

III Exemple du traitement de surface et approche méthodologique du traitement interne

1) Choix du secteur d'application

Pour concevoir un système d'aide à la décision appliqué au traitement interne des déchets, destiné à mettre en évidence les raisonnements et la structure des données qui entrent en jeu, il nous fallait disposer d'un domaine d'application représentatif du milieu des PMI, susceptible de générer des déchets spéciaux en quantités relativement importantes et susceptible d'avoir recours au traitement interne. Dans cette optique, nous avons choisi de nous intéresser aux déchets de l'industrie du traitement de surface, et, plus particulièrement, le traitement par voie chimique ou électrolytique des surfaces métalliques.

Les raisons qui ont guidé notre choix sont les suivantes :

- Enjeu : ces déchets représentent une contribution importante à la pollution du milieu aquatique en France (estimée de 30 à 45 % suivant les auteurs ^{[Breuil 92],[ANRED 88]}). D'autre part, les industriels du traitement de surface, souvent façonniers n'ont pas les moyens d'entreprendre à titre individuel des études importantes pour le traitement de leurs effluents, ce qui renforce l'intérêt de disposer d'un système d'aide à la décision dans ce domaine.
- Existence des données : de nombreuses études ont été entreprises pour mettre au point des procédés de valorisation des effluents de traitement de surface. Il existe une information abondante, qui reste dispersée et peu structurée. Un de nos objectifs est donc synthétiser sans la simplifier la connaissance des procédés de traitement et de valorisation des effluents de traitement de surface, qui font souvent appel à des technologies bien connues, utilisées dans un contexte nouveau.

2) Fonctions de traitement de surface et type de déchets générés.

Le traitement de surface a pour objet la modification de l'aspect et des propriétés des surfaces des pièces. On distingue cinq types de traitements de surface :

- les traitements par voie aqueuse,
- les revêtements métalliques au métal fondu,
- les traitements thermiques,
- les traitements mécaniques,
- la peinture.

Nous nous sommes intéressés uniquement aux déchets résultant du traitement par voie aqueuse. Ces déchets sont issus de plusieurs catégories de fonctions :

- dépôts métalliques : on distingue les dépôts électrolytiques et les dépôts chimiques. Les réactifs utilisés sont des solutions acides contenant généralement des métaux sous forme ionique ou des solutions alcalines contenant souvent des complexes métalliques cyanurés.
- modification de surface : ce sont les opérations destinées à modifier l'état physique ou chimique de la surface sans apport supplémentaire de métal, en général afin de faciliter un traitement ultérieur. Par exemple, la phosphatation est destinée à faciliter l'application de peinture.
- démétallisation : il s'agit des opérations destinée à retirer une couche métallique par voie chimique.
- prétraitements et inter-traitements : on trouve, parmi les prétraitements, le décapage, le dégraissage, et d'autres traitements destinés à rendre la pièce compatible avec l'un des traitements énumérés plus haut.

Une fonction est classiquement identifiée par son objectif et par la nature des réactifs mis en oeuvre (voir annexe III-1). Ce sont ces réactifs usés ainsi que les produits résultant des réactions mises en oeuvre au cours du traitement de surface qui constituent les déchets auxquels nous nous intéressons. Il s'agit de solutions aqueuses contenant les principaux polluants suivants :

- acides et bases,
- métaux en solution,

- matière organique,
- cyanures,
- nitrite, phosphate, fluorure.

Ces déchets peuvent être classés en fonction des réactifs qu'ils contiennent et en référence aux rubriques de la nomenclature française. Le tableau III-1 présente une classification extraite d'un document de l'ANRED^[ANRED 88], qui prend en compte le caractère acide ou basique et la présence de polluants spécifiques tels que le chrome hexavalent, le cadmium, le cyanure, le fluor, les nitrites, les phosphates.

numéro de la famille	nom	Code nomenclature
1	Liquides-bains-boues acides non chromiques non cadmiés	C101
2	Liquides-bains-boues acides non chromiques, non cadmiés, fluorés	C101
3	Liquides-bains-boues acides non chromiques, non cadmiés, nitrités	C101
4	Liquides-bains-boues acides non chromiques, non cadmiés, phosphatés	C101
5	Liquides-bains-boues alcalins non chromiques, non cyanurés, non cadmiés, non dégraissants, non nitrites	C102
6	Liquides-bains-boues alcalins, non chromiques, non cyanurés, non cadmiés, non dégraissants, nitrités	C102
7	Liquides-bains-boues alcalins, non chromiques, non cyanurés, non cadmiés, dégraissant, non nitrités, non phosphatés	C102
8	Liquides-bains-boues alcalins, non chromiques, non cyanurés, non cadmiés, dégraissants, nitrités	C102
9	Liquides-bains-boues alcalins non chromiques, non cyanurés, non cadmiés, dégraissants, phosphatés	C102
10	Liquides-bains-boues cadmiés cyanurés	C103
11	Liquides-bains-boues cadmiés, non cyanurés, non chromiques, non fluorés, non phosphatés	C104
12	Liquides-bains-boues cadmiés, non cyanurés, chromiques	C104
13	Liquides-bains-boues cadmiés, non cyanurés, fluorés	C104
14	Liquides-bains-boues cadmiés, non cyanurés, phosphatés	C104
15	Liquides-bains-boues acides, chromiques, non cadmiés, non fluorés	C105
16	Liquides-bains-boues acides, chromiques, non cadmiés, fluorés	C105
17	Liquides-bains-boues alcalins, chromiques, non cadmiés	C106
18	Liquides-bains-boues cyanurés non cadmiés non dégraissants	C107
19	Liquides-bains-boues cyanurés, non cadmiés, dégraissants non phosphatés	C107
20	Liquides-bains-boues cyanurés, non cadmiés, dégraissants, phosphatés	C107
25	Boues d'hydroxydes métalliques deshydratés	C281
26	Boues d'hydroxydes métalliques non deshydratées	C282
27	Résines échangeuses d'ions saturées ni en chrome 6 ni en cyanures ni en cadmium	C285
28	Résines échangeuses d'ions saturées en chrome 6	C285
29	Résines échangeuses d'ions saturées en cyanures	C285
30	Résines échangeuses d'ions saturées en cadmium	C285
31	Liquides-bains-boues Acides, non chromiques, non cadmiés, Fluorés, Phosphatés	C101
32	Liquides-bains-boues acides non chromiques, non cadmiés, nitrités, phosphatés	C101

Tableau III-1: familles de déchets générés par le traitement de surfaces

3) Structure d'un atelier de traitement de surface par voie aqueuse

La nature des déchets générés au sein d'un atelier de traitement de surface et les solutions de valorisation que l'on peut y mettre en place résultent de la structure même de l'atelier et des phénomènes particuliers qui s'y produisent (dilution, entraînement, consommation de réactifs, contamination). Il est donc important de comprendre comment est agencé un atelier et quelles sont les types de bains que l'on peut y rencontrer.

Un atelier de traitement de surface est constitué, le plus souvent d'un enchaînement de fonctions (figure III-2). Chaque fonction est elle-même constituée par un enchaînement de bains. Une pièce passe successivement dans chaque bain, dans lequel elle subit soit un traitement soit un rinçage. Le traitement a pour objet de modifier la surface de la pièce. Le rinçage est destiné à stopper la réaction et à amener la concentration en réactifs à la surface de la pièce à un niveau acceptable du point de vue des traitements suivants et de la sécurité des personnes qui auront à manipuler la pièce.

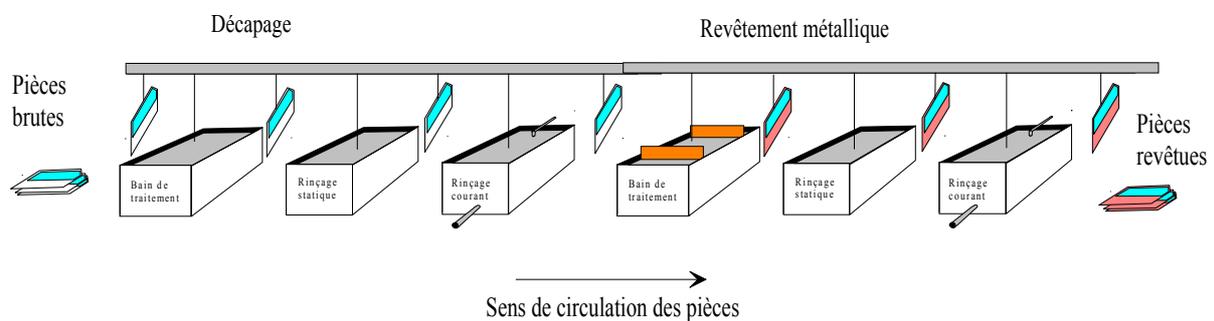


Figure III-2 : structure classique d'un atelier de traitement de surface

On distingue couramment deux types de rinçage par immersion :

- les rinçages statiques, qui sont réalisés dans une eau renouvelée de manière discontinue en fonction de sa teneur en réactifs, ils produisent généralement un déchet concentré,
- les rinçages courants, qui font intervenir un flux continu d'eau à plus ou moins fort débit et qui se traduisent par un effluent dilué.

Il existe des variantes de bains statiques comme les bains de rinçage "éco", qui permettent d'économiser l'eau de rinçage et le réactif mis en oeuvre dans le bain de traitement. Les bains

de rinçage cascade constituent un type de rinçage courant économique, puisque le même flux sert en même temps à un rinçage grossier et un rinçage poussé.

Le rinçage peut aussi être effectué par aspersion. La pièce est alors placée sous un jet ou un spray d'eau pour être rincée directement. Ce mode de rinçage est plus difficile à maîtriser et à modéliser, nous ne l'avons donc pas considéré.

Les bains de rinçage se chargent en polluants par entraînement d'une fraction du bain précédent sur la pièce traitée. Ce phénomène d'entraînement se traduit aussi par une baisse de niveau dans le bain de traitement, qu'il faut compléter régulièrement. Cette baisse de niveau est aussi provoquée par évaporation en cas de bains chauds. La figure III-3 représente le bilan matière d'un bain de la chaîne de traitement. On peut y voir un flux continu de pollution constitué par les surverses des bains de traitement et des bains de rinçage statiques, et le flux continu d'un rinçage courant. On doit aussi considérer les flux discontinus générés par le renouvellement des bains de traitement et de rinçage statique.

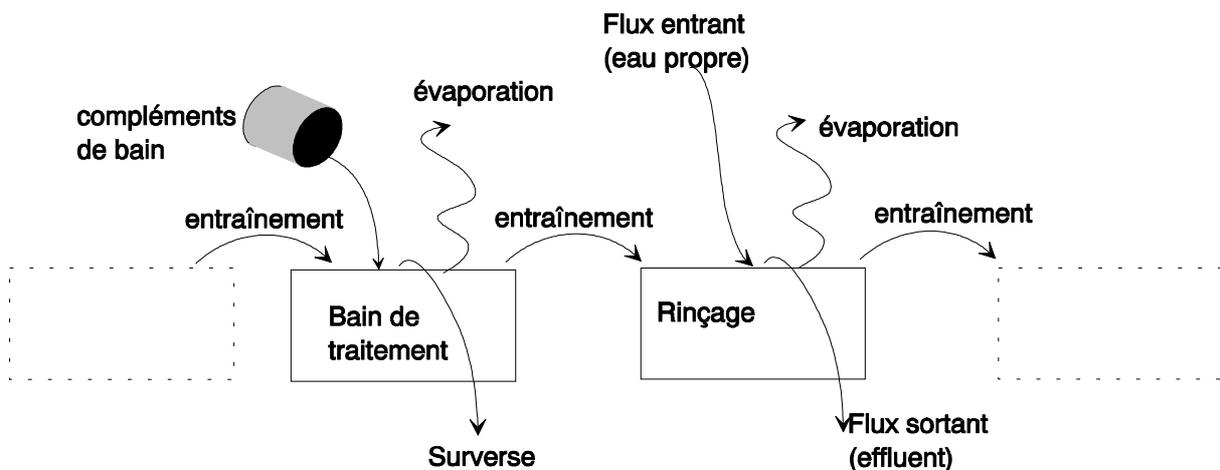


Figure III-3 : flux de matière au sein d'une chaîne de traitement de surfaces

4) Contexte réglementaire

Dans le système réglementaire français, les rejets du traitement de surface relèvent de deux catégories suivant leur destination finale. Lorsqu'il s'agit de bains concentrés pouvant faire l'objet d'un traitement par bâchée ou en centre collectif de traitement de déchets, ils sont considérés comme des déchets. Lorsqu'il s'agit de bains peu chargés susceptibles d'être rejetés dans l'environnement après un traitement en continu, ils seront plutôt considérés comme des effluents. Dans le cas qui nous concerne, nous devons considérer les deux

contextes, d'autant plus que le traitement en continu des effluents est générateur de déchets solides. Deux textes principaux vont dicter la recherche d'une solution de traitement :

- la loi du 15 juillet 1975 modifiée par la loi du 13 juillet 1992 sur le traitement des déchets,
- l'arrêté ministériel du 26 septembre 1985 sur les rejets des ateliers de traitement de surfaces.

Nous avons déjà largement commenté la loi de 1975 dans la première partie. Nous allons donc simplement nous intéresser à l'arrêté de 1985.

Arrêté ministériel du 26 septembre 1985 sur les rejets des ateliers de traitement de surface

Ce texte régit les rejets aqueux des ateliers de traitement de surface en direction du milieu naturel (rivières ou réseau urbain). Il définit donc les seuils de concentration des différents polluants présents dans les rejets. Le tableau III-2 présente les limites de rejet exigées par l'arrêté du 26 septembre 1985. Ces exigences peuvent éventuellement être renforcées localement par un arrêté préfectoral. En plus des contraintes portant sur des éléments individuels, le rejet total en métaux (Zn + Cu + Ni + Al + Fe + Cr + Cd + Pb + Sn) ne doit pas dépasser 15 mg/l.

Elément	Min.	Max.	Unité
pH	6,5	9	pH
[CN-]		0,1	mg/l
[Hydrocarbures]		5	mg/l
[DCO]		150	mg/l
[Sn]		2	mg/l
[CrVI]		0,1	mg/l
[MES]		30	mg/l
[P]		10	mg/l
[Nitrites]		1	mg/l
[Cu]		2	mg/l
[Zn]		5	mg/l
[Fe]		5	mg/l
[Ni]		5	mg/l
[Al]		5	mg/l
[F]		15	mg/l
[Cr III]		3	mg/l
[Cd]		0,2	mg/l
[Pb]		1	mg/l

Tableau III-2 : seuils de rejet autorisés par l'arrêté du 26 septembre 1985

Le cadmium fait l'objet d'une limitation en termes de concentration dans les rejets mais aussi de flux spécifiques puisque les rejets de cadmium ne peuvent pas dépasser 0,3 gramme de cadmium par kilogramme de cadmium utilisé.

L'arrêté de 1985 définit par ailleurs un débit d'effluents maximum de 8 litres par mètre carré de surface traitée pour chaque fonction de rinçage.

En parallèle aux recommandations sur les rejets aqueux, l'arrêté du 26 septembre 1985 définit aussi des règles d'auto-surveillance, d'aménagement et d'exploitation. Il impose aussi des limites relatives à la pollution atmosphérique.

5) Procédés de traitement en vue d'un rejet éco-compatible

Les traitements en vue d'un rejet éco-compatible des effluents de traitement de surfaces sont des traitements physico-chimiques classiques. Ils ont pour objectif :

- de transformer certains polluants en produits moins nocifs,
- d'en séparer d'autres qui seront alors orientés vers un traitement complémentaires ou stockés lorsqu'ils sont à l'état solide.

Les principales opérations d'un traitement de détoxification sont donc (figure III-4) :

- l'oxydoréduction,
- la précipitation,
- la mise à pH,
- la floculation,
- les séparations mécaniques (désuilage, décantation, filtration).

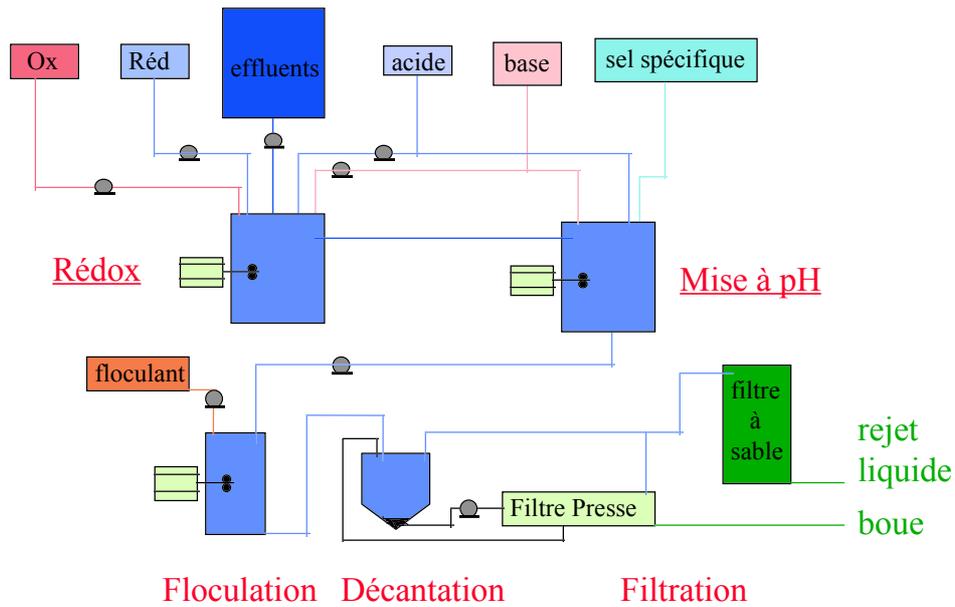


Figure III-4 : exemple de station de traitement d'effluents nécessitant une opération d'oxydoréduction avant rejet

Oxydation

L'oxydation a pour but de transformer toute matière oxydable en un composé plus stable, donc moins nocif. Les produits concernés sont typiquement :

- les cyanures,
- les nitrites,
- la matière organique.

Les réactifs les plus courants sont :

- l'eau de Javel,
- l'acide de Caro,
- l'ozone,
- l'eau oxygénée,
- le chrome hexavalent est aussi parfois utilisé.

Oxydation

L'oxydation permet de supprimer une partie de la pollution. Elle permet aussi de réduire l'activité d'espèces modifiant la solubilité des métaux comme les complexants ou les chélatants.

Réduction

La réduction concerne principalement le chrome hexavalent, qui ne précipite pas dans cet état d'oxydation. On le fait donc passer à l'état d'oxydation III (Cr^{3+}). On utilise généralement du bisulfite de sodium (hydrogénosulfite de sodium, NaHSO_3).

Précipitation

Le but de la précipitation est d'extraire un polluant en solution en le faisant précipiter sous forme d'une espèce solide. La précipitation concerne :

- tous les métaux,
- les phosphates,
- les fluorures.

Les réactifs utilisés le plus souvent sont, par ordre d'importance :

- les bases fortes, on a alors précipitation des métaux sous forme d'hydroxydes métalliques,
- les sulfures,
- les carbonates.

Neutralisation

La neutralisation a pour but d'amener le pH de la solution à une valeur compatible avec un rejet, c'est-à-dire entre 6,5 et 9. On utilise, suivant le pH de départ, un acide ou une base forte. Lors de la neutralisation d'une solution acide, les métaux précipitent sous forme d'hydroxyde. On effectue donc souvent la neutralisation et la précipitation au cours de la même opération. Ceci n'est cependant pas possible lorsque les métaux sont sous forme complexée ou lorsque la solution contient des métaux précipitant à pH élevé comme le cadmium. Dans ce cas, une neutralisation complémentaire suit toujours l'étape de précipitation.

Floculation

La floculation est destinée à faciliter la séparation des matières en suspension, qui peuvent provenir de l'effluent initial ou être le résultat de la précipitation. On peut utiliser un floculant comme le sulfate d'aluminium ou de fer.

Séparation physique

Les procédés de séparation physique sont variés. Il s'agit principalement de :

- filtration,
- dégraissage.

Ils concernent les matières en suspension ainsi que les graisses et huiles non miscibles. Parmi les matières en suspension, on trouve notamment les métaux précipités, que l'on filtre à l'issue de l'étape de précipitation. On utilise généralement un filtre presse pour aboutir à une boue d'hydroxyde.

6) Avantages et inconvénients de la détoxification classique des effluents

La détoxification classique des effluents présente certains inconvénients et certains avantages.

Parmi les avantages, on peut citer :

- la simplicité des procédés employés,
- la capacité d'adaptation du procédé, puisqu'il suffit de changer la nature des réactifs et leur quantité lorsque l'on change la nature de l'effluent.

Parmi les inconvénients, on peut distinguer les inconvénients à caractère économique et ceux à caractère environnemental.

Du point de vue économique, la détoxification simple représente :

- une perte de matière première,
- une consommation de réactifs et d'énergie,
- un coût d'élimination des résidus (boues d'hydroxydes, par exemple),
- une solution souvent incomplète.

Sur le plan environnemental, on peut citer :

- la difficulté de traiter certains types de bains (complexes, forte teneur en composés organiques..),
- le risque lié à un dysfonctionnement du procédé de traitement lorsqu'il constitue le seul rempart contre une pollution externe,

- le "coût environnemental" global des pertes de matière et des consommations de réactifs, même si les outils pour quantifier ce coût ne sont pas encore très fiables.

7) Motivations pour l'implantation d'un procédé de valorisation

La valorisation est un moyen de palier certains inconvénients de la détoxification seule. Du point de vue économique, elle permet *a priori* de limiter les pertes de matière, les consommations de réactifs et d'énergie et les coûts d'élimination des déchets solides. Ces gains sont cependant à mettre en relation avec le coût de la valorisation elle-même :

- investissement,
- fonctionnement (énergie et réactifs).

Dans certains cas, la valorisation ne permet pas d'aboutir à un rejet acceptable. Il faut alors la compléter par une détoxification, qui représente donc toujours un coût important, même si les frais liés au fonctionnement (réactifs et énergie) sont réduits en raison de la plus faible charge de pollution traitée. D'autre part, les procédés de valorisation sont souvent générateurs de déchets secondaires (correspondant à la partie non valorisée) dont l'élimination représente une charge.

Du point de vue environnemental, on réduit *a priori* le "coût" des pertes de matière. Il faudrait cependant pouvoir évaluer l'ensemble des impacts relatifs à un procédé pour apprécier cet effet de manière quantitative. Dans le cas où la valorisation est entreprise en amont d'une détoxification classique, elle permet de réduire la charge de polluants à traiter. Le risque dû à un dysfonctionnement de l'une ou l'autre des installations est ainsi réduit. Lorsqu'elle est entreprise seule, ce risque demeure inchangé. Enfin, certains procédés de valorisation se révèlent aussi efficace pour réduire une pollution résistante aux traitements classiques.

La mise en place d'un procédé de valorisation au sein d'une chaîne de traitement de surface s'accompagne aussi, souvent, d'une optimisation des flux et des pratiques de surveillance des bains, qui se traduisent généralement par une amélioration de la qualité.

On constate finalement que la mise en place d'un procédé de valorisation présente *a priori* des avantages sur une détoxification seule, mais que ceux-ci sont cependant soumis à une analyse économique poussée.

8) Stratégies de valorisation des déchets et effluents du traitement de surface

Nous avons vu au chapitre I que les objectifs d'un traitement interne pouvaient être :

- un rejet éco-compatible vers le milieu extérieur, et un stockage de la partie ultime du déchet,
- une utilisation dans une autre installation industrielle,
- ou bien un retour dans l'une des unités fonctionnelles composant l'installation productrice du déchet.

Seuls les deux derniers objectifs constituent une valorisation. Il faut dans les deux cas que le déchet puisse trouver une destination, exprimée en termes de marché lorsqu'elle se situe à l'extérieur de l'entreprise génératrice et en termes de fonction lorsque l'on envisage une utilisation interne. Dans les deux cas, on est soumis à un cahier des charges pour la fonction ou le marché envisagé.

La valorisation consiste alors à transformer le flux afin qu'il réponde au cahier des charges de la destination choisie. Définir une stratégie de valorisation, c'est en fait choisir une destination aux flux issus du traitement.

Dans le cas du traitement de surface, nous pouvons établir une typologie des flux et des destinations possibles ainsi que des opérations de traitement qu'ils requièrent.

Les stratégies de base sont au nombre de trois :

- réutiliser le flux dans sa fonction initiale, c'est la régénération,
- extraire une part valorisable du flux, c'est la récupération,
- utiliser le flux dans une autre fonction, c'est le recyclage.

Parmi les flux, on distinguera :

- les bains de traitement,

- les rinçages concentrés,
- les rinçages dilués.

8.1) Régénération

La régénération d'un bain de traitement consiste à compenser ce qui le rend impropre à l'utilisation dans sa fonction initiale. Pour identifier les stratégies applicables, il faut donc connaître l'évolution du bain au cours du temps. Deux phénomènes principaux peuvent motiver la mise au rebut d'un bain de traitement :

- la contamination par une matière ayant un effet indésirable sur le traitement de surfaces,
- l'épuisement du bain en réactif.

La contamination peut être soit le résultat d'un apport extérieur, soit d'une réaction chimique qui, sous certaines conditions peut être réversible. De même, l'épuisement peut provenir de la transformation d'un réactif en produit qui est déposé ou incorporé à la pièce traitée, ou bien qui reste dans le bain sous forme de contaminant ou d'élément neutre.

Les stratégies de régénération des **bains de traitement** consisteront donc en :

- décontamination :
 - par extraction du contaminant,
 - + sous forme solide
 - + sous forme liquide
 - par inversion de la réaction produisant le contaminant ;
 - par destruction du contaminant.
- compensation de l'épuisement du bain :
 - par apport de réactif,
 - par concentration,
 - par inversion de la réaction responsable de l'épuisement du bain.

Pour des **bains de rinçage**, la régénération consiste à obtenir de l'eau pure ou suffisamment pure pour être utilisée à nouveau comme liquide de rinçage. La principale stratégie que l'on peut mettre en oeuvre est la décontamination. Le contaminant de l'eau de rinçage est souvent le réactif du bain de traitement précédent. L'extraction de ce contaminant peut donc conduire à

une récupération ou à un recyclage vers le bain de traitement de la fraction extraite. On pourra donc procéder par :

- destruction du contaminant,
- extraction du contaminant
 - en vue de sa récupération
 - en vue de son élimination
- séparation d'une fraction d'eau régénérée et d'une fraction d'eau concentrée en contaminant,
 - en vue d'éliminer la fraction concentrée,
 - en vue de la recycler vers le bain de traitement,
 - + en l'état,
 - + après extraction des contaminants pour le bain de traitement,
 - + après régénération du réactif par inversion de la réaction de synthèse du contaminant.

8.2) Récupération

Dans les **bains de traitement** on peut éventuellement récupérer :

- le principe actif du bain avant son rejet pour cause d'épuisement,
- les contaminants qui peuvent avoir de la valeur, avant rejet du bain ou en vue d'une régénération du bain.

Dans les bains de rinçage on peut récupérer :

- le principe actif du bain de traitement ou ses contaminants avant rejet du bain de rinçage ou en vue de sa régénération.

Les produits récupérés peuvent être réutilisés sur place ou bien vendus comme matière première. C'est la capacité d'utiliser le produit récupéré ou son assimilation à une matière négociable qui déterminera l'intérêt d'une récupération.

8.3) Recyclage

L'approche du recyclage, c'est à dire l'utilisation du déchet comme matière première dans une fonction différente de sa fonction d'origine, est plus délicate. *A priori* de nombreux scénarios sont possibles. Cependant, nous pouvons identifier certains cas remarquables.

Les **bains de rinçage** peuvent être recyclés :

- en complément du bain de traitement. Dans ce cas, il peut être nécessaire :
 - de concentrer le bain de rinçage pour ne pas diluer le bain de traitement dans lequel il est introduit,
 - de séparer les contaminants pour ne pas recharger le bain de traitement.
- ou en bain de rinçage plus concentré (principe du bain de rinçage cascade).

Les bains de traitement acides (ou basiques) peuvent être utilisés pour neutraliser d'autres déchets basiques (ou acides) à condition d'être compatibles sur le plan de la sécurité (absence de cyanures dans le bain basique, par exemple).

Nous avons précisé ce que recouvrent les stratégies de régénération, récupération et recyclage dans le contexte du traitement de surface. Nous constatons que suivant le contexte et l'objectif poursuivi, une même opération (l'extraction, par exemple) peut participer de l'une ou l'autre des stratégies ou même parfois d'une combinaison de stratégies. Nous pouvons déjà souligner le rôle très important joué par l'évolution des bains au cours du traitement de surface et par le cahier des charges de la fonction génératrice du déchet dans le choix d'une stratégie.

Nous allons maintenant examiner les moyens dont on dispose pour mener à bien ces stratégies de valorisation.

9) Procédés de valorisation de déchets et d'effluents de traitement de surface

Les procédés de valorisation applicables aux déchets et effluents de traitement de surface sont en réalité des procédés relativement classiques de la chimie minérale. Ils sont, pour beaucoup d'entre eux connus depuis des décennies. Cependant, le fait de travailler sur des déchets, c'est-à-dire des produits contaminés avec des concentrations faibles de composants à valoriser, rend l'application de ces techniques plus difficile que dans le contexte habituel du génie chimique.

Ainsi, il a fallu développer des variantes aux procédés classiques, spécialement adaptées au traitement des déchets.

Le fait de traiter des déchets complique aussi l'application des théories relatives à ces différents procédés. Il est, de ce fait, plus difficile de calculer des rendements ou de prévoir les conditions de fonctionnement optimales.

Les procédés utilisés le plus fréquemment pour la valorisation des effluents de traitement de surface sont :

- l'électrolyse
- l'électrodialyse
- l'électro-électrodialyse (électrolyse à membranes)
- les résines échangeuses d'ions
- les résines adsorbantes
- l'évaporation
- la filtration
- l'ultrafiltration
- la cristallisation
- l'osmose inverse

Nous détaillons en annexe III-2 le principe de fonctionnement de chacune de ces techniques.

Les opérations réalisées au moyen de ces procédés sont :

- la séparation,
- l'extraction,
- la concentration,
- la transformation chimique.

La plupart des procédés permettent, suivant le contexte, d'effectuer une ou plusieurs de ces opérations. La difficulté consiste à identifier la nature des opérations que l'on doit réaliser pour valoriser un déchet ou un effluent et quel procédé il faut utiliser en fonction des caractéristiques de cet effluent.

10) Difficultés relatives à la formulation du problème et à la recherche d'une solution

Lorsqu'un industriel du traitement de surface souhaite mettre en place une solution de traitement en interne pour résoudre ses problèmes de rejets, il est confronté à plusieurs difficultés. Ces difficultés sont relatives :

- à la connaissance qu'il peut avoir de son installation,
 - ◆ connaissance de la nature et des caractéristiques des flux, notamment des flux dilués ou des bains usés,
 - ◆ connaissance des fonctions mises en oeuvre,
 - ◆ connaissance du cahier des charges de ces fonctions.
- à la connaissance qu'il a du contexte réglementaire,
 - ◆ seuils de rejet,
 - ◆ limitations de consommations,
 - ◆ procédures d'auto-surveillance,
- à la connaissance qu'il a des procédés de traitement,
 - ◆ nature des procédés,
 - ◆ opérations réalisables,
 - ◆ contraintes et limites techniques,
 - ◆ coût, exigences techniques,
- au lien qu'il peut établir entre ces différentes entités,
 - ◆ stratégies de traitement applicables,
 - ◆ opérations nécessaires pour mettre en oeuvre une stratégie.

On retrouve dans les difficultés énumérées ci-dessus des problèmes :

- de diagnostic,
- d'information,
- de décision.

C'est donc à ces trois aspects que nous nous sommes intéressés pour asseoir les bases d'un système d'aide à la décision dans ce domaine.

IV Application : système d'aide à la décision pour le traitement interne des effluents et des déchets de l'industrie du traitement de surface

En évoquant au chapitre précédent la diversité des fonctions de traitement de surface, des déchets générés, des procédés de valorisation et d'élimination ainsi que des opérations et des stratégies nous avons fait ressortir la complexité d'une approche du traitement interne des déchets en traitement de surfaces. Nous allons maintenant expliquer la démarche de construction et le principe de fonctionnement du système d'aide à la décision que nous avons développé. Après une définition précise des objectifs de l'outil, nous verrons comment la connaissance a été structurée. Ceci permettra de décrire chacune des fonctions du système. Deux approches différentes seront présentées : une approche par base de cas, relativement similaire à celle utilisée pour le traitement externe, et une approche plus systématique, qui fait appel à un raisonnement portant sur le cahier des charges des fonctions de traitement.

1) Spécifications fonctionnelles du système

Nous avons assigné à notre outil les fonctions suivantes :

- le diagnostic,
- l'information.
- l'aide à la décision.

1.1) Fonction de diagnostic

La fonction de diagnostic permet à l'utilisateur de décrire son problème en fournissant à l'outil l'essentiel des informations utiles à la suite du déroulement de la session. Ces données sont exploitées par l'outil pour évaluer les écarts avec une situation idéale définie par les seuils de rejet ou tout autre critère jugé pertinent. Le système identifie ainsi les flux sur lesquels devra porter l'aide à la décision.

Pour assurer la fonction de diagnostic, il faut donc mettre en place une interface performante qui permette à l'utilisateur de décrire :

- la composition de la chaîne en termes de :
 - ◆ types de poste (traitement, rinçage),

- ◆ fonctions de traitement de surface.
- les caractéristiques des flux
 - ◆ quantités,
 - ◆ composition,
- la gamme de fabrication subie par les pièces
- les contraintes réglementaires locales

La complexité des phénomènes d'entraînement et le manque de moyens fait parfois qu'il est difficile de connaître la composition des flux de rinçage. Nous avons donc prévu dans ce module de diagnostic d'aider l'utilisateur à la calculer en fonction d'indications plus accessibles telles que la composition des bains de traitement et les consommations en eau de chaque poste.

Les résultats attendus sont donc :

- ◆ la composition de la chaîne de traitement,
- ◆ l'ensemble des compositions de flux,
- ◆ l'identification des polluants sur lesquels une intervention est nécessaire,

1.2) Fonction d'aide à la décision

La fonction d'aide à la décision doit permettre d'identifier les solutions de valorisation et d'élimination applicables. Il s'agit non seulement de trouver les procédés que l'on peut employer mais encore de préciser quelle stratégie on envisage et quelles opérations seront effectuées par chaque procédé. Il est aussi intéressant de pouvoir fournir à l'utilisateur des données sur le coût de la solution envisagée. Pour des raisons de disponibilité de données, nous n'avons développé ces calculs économiques que pour les techniques d'élimination.

Les résultats attendus sont donc :

- les procédés de valorisation applicables
 - ◆ les stratégie de valorisation poursuivie,
 - ◆ les opérations réalisées par le procédé,
- les procédés d'élimination envisageables,
 - ◆ les polluants visés,

- ◆ les quantités de réactifs consommés,
- ◆ les quantités de déchets ultimes produits.

1.3) Fonction d'information

L'information intervient soit en "amont" soit en "aval" de la fonction d'aide à la décision.

En "amont", il s'agit d'aider l'utilisateur à décrire et à comprendre son installation dans l'optique du traitement des déchets. On pourra donc proposer :

- des données sur la nature des déchets produits par différentes fonctions de traitement de surface,
- des formulations classiques de baigns,
- des critères de vidange de bain,
- des informations sur la réglementation,
- des techniques d'analyse de différents polluants.

En "aval", l'information portera sur les procédés de traitement envisagés :

- leur principe de fonctionnement,
- leurs avantages,
- des données économiques,
- des exemples,
- des adresses de fournisseurs,...

2) Principes de raisonnement

Après avoir établi les spécifications du système d'aide à la décision, en distinguant les fonctions de diagnostic, d'information et d'aide à la décision, il est nécessaire d'examiner le type de connaissance à mettre en oeuvre, la structure de données et les principes des raisonnements à intégrer dans l'outil.

2.1) Fonction de diagnostic

2.1.1) Description de la chaîne de traitement

Une chaîne de traitement est constituée par un enchaînement de bains qui constituent tous un élément d'une fonction de traitement particulière. Chaque bain est donc caractérisé par :

- la fonction à laquelle il appartient,
- le type de poste dont il s'agit (traitement, rinçage),
- sa composition au moment du rejet.

Pour que l'utilisateur puisse décrire sa chaîne de traitement de surface, il doit disposer d'un vocabulaire normalisé qui soit interprétable par l'outil dans les phases ultérieures de la session. Ceci implique de mettre en place des bases de données contenant un ensemble de descriptifs adaptés pour les fonctions, les types de poste et les composants des bains.

Pour les fonctions, nous avons choisi de conserver la classification proposée par l'ANRED dans l'ouvrage "les déchets des industries de traitement de surface"^[ANRED 88] présentée au début de cette troisième partie.

Nous avons de même prévu un certain nombre de types de bains de rinçage : statiques, courants, cascade (2 bains), cascade (3 bains), éco.

Enfin, nous avons mis en place une base de composants chimiques classés par familles :

- Acides minéraux
- Acide minéral fluoré
- Composés organiques
- Composés fluorés
- Cyanates
- Huile graisses
- Métaux en suspension
- Nitrites
- Phosphates
- Acide minéral phosphaté
- Bases minérales
- Composés chromiques
- Cyanures
- Hydroxydes métalliques
- Métaux dissous
- Nitrates
- Sels de sodium et potassium

Ces familles correspondent à des catégories de polluants identifiées par la réglementation auxquelles correspondent des traitements de détoxification particuliers.

Lors de la mise en place de cette base de données, nous avons été confrontés à une difficulté relative à la pratique industrielle. En effet, les formulations des bains sont généralement données en masse de sel ou d'espèces non dissociées en solution et rarement, voire jamais, sous forme ionique^[Wrzecian 83]. Il est donc raisonnable de proposer à l'utilisateur de décrire son bain à partir de produits non dissociés. Cependant, lorsque l'on rejette un bain, si l'on s'appuie sur des critères analytiques, ceux-ci portent souvent sur des concentrations ioniques. De même, pour calculer les quantités de réactifs à mettre en oeuvre pour détoxifier un bain de

traitement, il est nécessaire de connaître la composition du bain en termes de spéciation. Le meilleur exemple est fourni par le chrome dont le traitement est nécessairement différent suivant qu'il se trouve sous forme trivalente ou hexavalente dans la solution. Enfin, la réglementation prend aussi bien en compte des espèces ioniques que des éléments métalliques indépendamment de leur spéciation.

Cette variété de besoins appelle une approche relativement ouverte. Nous avons donc prévu que l'utilisateur puisse décrire son bain aussi bien en termes d'espèces ioniques ou moléculaires. Cette option initiale a nécessité ensuite la mise en place de procédures complémentaires permettant de passer de la description faite par l'utilisateur aux données nécessaires au fonctionnement de l'outil.

2.1.2) Calculs de composition

a) Variabilité des connaissances de l'utilisateur potentiel du système.

La variabilité des connaissances de l'utilisateur sur la nature et les caractéristiques des flux de déchets qu'il génère constitue une difficulté. Dans certains cas, seule la formule initiale du bain de traitement est connue, dans sa forme commerciale.

Nous pouvons identifier plusieurs phénomènes qui expliquent cette méconnaissance :

- la complexité des formules utilisées,
- le secret de fabrication des produits,
- l'évolution des bains au cours du traitement,
- la complexité des phénomènes de dilution et d'entraînement,
- l'importance du rôle joué par l'expérience dans la conduite des bains.

La composition d'un bain de traitement n'est pas une donnée statique. Elle évolue au cours du traitement en raison de la consommation de certains réactifs, de l'apparition d'espèces chimiques issues des réactions mises en oeuvre -soit aux électrodes soit dans le bain lui-même- de la contamination du bain liée à des phénomènes d'entraînement, de la dissolution du métal de base.

Le tableau III-3 fournit un exemple d'évolution d'un bain de nickelage. Les divers phénomènes liés aux réactions électrochimiques ou aux phénomènes d'entraînement (apport ou perte)

conduisent à une évolution globale du bain qui se traduit par une diminution de la concentration en nickel et une contamination du bain en chlore. A terme la solution n'est plus compatible avec le cahier des charges de la fonction de nickelage. En l'absence de tout procédé de régénération en continu, il devient nécessaire de vidanger la cuve, ce qui conduit à un déchet.

Composants	Phénomènes cathodiques	Phénomènes anodiques	Phénomènes d'apport*	Pertes par entraînement	Evolution globale
Ni ²⁺	∅	∪	∅	∅	
Cl ⁻	∪	∪	*	∅	∪ *
SO ₄ ²⁻	∪	∪	∅	∅	
H ₃ BO ₃	∪	∪	∅	∅	
pH	∪	∪	∅*	∪	∪

Tableau III-3: évolution normale d'un bain de nickelage composé de sulfate de nickel, chlorure de nickel et acide borique après dépassivation chlorhydrique et rinçage insuffisant^[Lacourcelle]. (* Les phénomènes d'apport dépendent naturellement de la qualité des bains précédents. Sans indication, il est impossible de les prévoir. Ici, le chlore provient d'un entraînement du chlore présent dans le bain précédent au même titre qu'une partie de l'évolution du pH.)

Les critères de vidange, lorsqu'ils existent, permettent de connaître la composition du bain lorsqu'il devient déchet. Ceci n'est vrai qu'à condition que l'on maîtrise l'ensemble des phénomènes qui ont lieu au cours du traitement.

Pour compenser ces lacunes éventuelles et pour aider l'utilisateur, nous avons mis en place une base de données contenant des formules classiques de bains ainsi que des indications sur leur évolution au cours du temps et sur les critères de vidange.

Chaque fonction est associée à un certain nombre de variantes de bains. Pour chaque variante, on indique la nature des produits chimiques utilisés avec les fourchettes de concentration courantes. Les produits sont généralement donnés sous forme non dissociée.

Pour chaque variante, on indique aussi l'évolution des espèces présentes en fonction du métal de base utilisé ainsi que la composition finale du bain si elle est connue.

b) Contribution des composants du bain à la concentration des espèces en solution

Comme l'utilisateur a la possibilité de décrire lui même la composition des bains par des concentrations en composants ajoutés et non en espèces ioniques ou moléculaires effectivement présentes, il est nécessaire de prévoir un passage de cette donnée brute à un résultat exploitable par l'outil. Plusieurs fonctions sont à distinguer :

- diagnostic de la position réglementaire,
- calculs relatifs à la détoxification,
- aide à la décision pour la valorisation.

Chacune de ces fonctions requiert un type d'information différent. L'idéal serait de disposer d'un modèle permettant de calculer la nature des espèces formées en fonction de la composition générale du bain, mais cela dépasse les objectifs fixés dans le cadre de ce travail. Nous avons donc simplement mis en place un module qui permet d'évaluer la contribution de chaque produit à un polluant identifié par la norme en partant d'hypothèses concernant notamment la dissociation complète des sels métalliques et des acides. D'autre part, nous n'avons pas implanté de calcul automatique du pH, qui doit rester une donnée fournie par l'utilisateur. La figure III-5 illustre l'articulation des données au sein du module de diagnostic. Dans ce graphe, les flèches indiquent le sens d'utilisation des données.

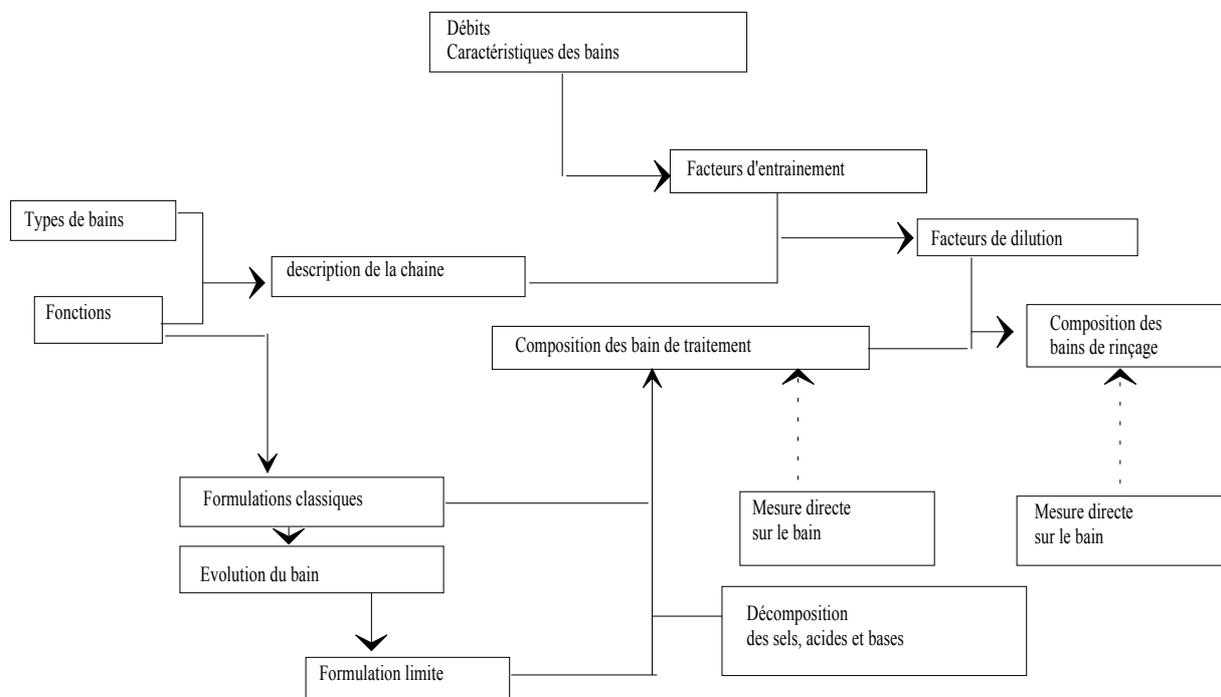


Figure III-5 : flux des données dans la première partie du module de diagnostic

c) Calculs des entraînements et des facteurs de dilution

L'objectif de cette étape de diagnostic est l'identification de paramètres importants sur le plan des rejets et sur le plan du procédé :

- concentrations dans les bains de rinçage,
- facteurs de dilution,
- facteurs d'entraînement,
- consommation d'eau.

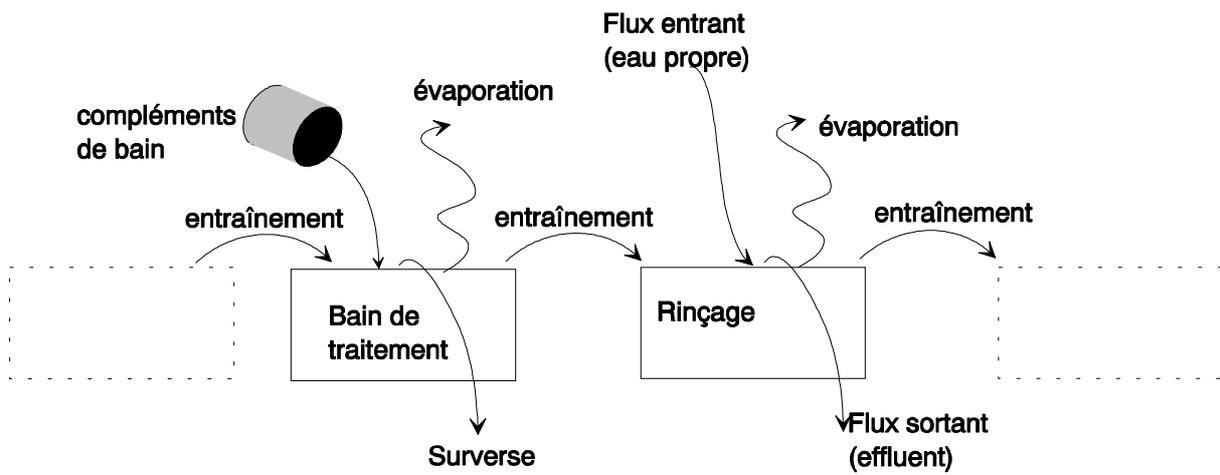


Figure III-6 : phénomènes pris en compte dans le calcul des facteurs d'entraînement et des facteurs de dilution

Le facteur de dilution F_i du bain de rinçage r_i est défini par le rapport entre la concentration C_{i-1} du bain le précédant dans la chaîne et sa propre concentration C_i en un composant donné.

$$F_i = \frac{C_{i-1}}{C_i} \quad (1)$$

Ce rapport de dilution conditionne à la fois l'efficacité du bain de rinçage, la composition des effluents et la consommation d'eau. Plus il est élevé, plus le rinçage est efficace et moins les effluents sont chargés. En contrepartie, la consommation d'eau est plus importante. Celle-ci est théoriquement limitée à 8 litres par m^2 de surface traitée par fonction de rinçage (arrêté du 26-sep-85).

Au cours de l'utilisation de l'outil, plusieurs scénarios sont envisageables :

1. l'utilisateur a mesuré l'ensemble des paramètres des bains. Il peut alors renseigner l'outil avec les valeurs mesurées. Dans ce cas, aucun calcul n'est nécessaire.

2. l'utilisateur connaît les concentrations des bains et les débits. L'outil peut alors en déduire les coefficients d'entraînement et les taux de dilution.
3. l'utilisateur connaît les facteurs d'entraînement et les débits ainsi que les règles de renouvellement des bains de rinçage statique. Il est alors possible de calculer les concentrations et les taux de dilution.
4. l'utilisateur ne connaît que les débits et les règles de renouvellement des bains de rinçage statique. Les taux d'entraînement peuvent être évalués pour les bains de traitement et les bains de rinçage statiques. Il est alors possible d'extrapoler le résultat aux bains de rinçage courants (et cascade) et aux bains de rinçage "éco", et d'en déduire les concentrations et les taux de dilution.

Calcul des facteurs de dilution lorsque les concentrations des bains sont connues

La concentration des bains étant connue, le facteur de dilution du bain de rinçage i est donné par la formule (1).

Il est à noter que pour les bains de traitement, la notion de facteur de dilution n'a pas de sens dans l'absolu. On pourra cependant définir un facteur de dilution relatif à un polluant particulier provenant du bain précédent.

Pour un rinçage cascade, on devra disposer de deux mesures : une mesure dans le premier bain de la cascade (bain concentré) qui fournit un premier facteur de dilution F_1 et une mesure dans le dernier bain qui fournit un facteur de dilution F_2 . Le premier facteur correspond à la capacité du bain à stopper la réaction et permet de calculer les concentrations de polluants dans l'effluent. Le deuxième facteur rend compte de l'état ultime de la pièce à l'issue du rinçage.

Pour un rinçage éco après bain de traitement, en supposant tous les entraînements égaux, le facteur de dilution en régime permanent est 2.

Calcul du facteur d'entraînement

Il y a deux façons de calculer les facteurs d'entraînement : en effectuant un bilan matière ou en exploitant des mesures de concentration.

Bilan matière :

Pour les bains de traitement et les bains de rinçage statiques, il est possible d'évaluer le facteur d'entraînement d'un bain à condition de connaître le facteur d'entraînement du bain précédent, la valeur exacte des quantités d'eau ou de réactifs ajoutés et perdue (par débordement ou évaporation). Le bilan matière s'écrit :

$$e' = e + \chi - s - E. \quad (2)$$

où e' est l'entraînement aval, e entraînement amont supposé connu, χ le complément de bain, s la surverse et E l'évaporation.

Dans le cas d'un bain courant, le débit est trop important pour pouvoir mesurer de manière fiable la différence entre les apports et les pertes. Il n'est donc pas possible d'évaluer l'entraînement par un bilan matière. Lorsqu'aucune donnée sur les concentrations ne permet d'évaluer cet entraînement, il peut être supposé égal à celui du bain précédent. Cette approximation n'est pas valable lorsque la viscosité dépend fortement de la concentration d'un des éléments du bain ou lorsque les temps d'égoutage varient d'un bain à l'autre.

Calcul de la concentration des bains en fonction des débits et des facteurs d'entraînement

Les calculs qui suivent permettent d'évaluer les concentrations en fonction des entraînements et des débits ou de déduire les entraînements des mesures de concentration.

Bain de rinçage courant :

Pour un bain de rinçage courant traversé par un débit Q , la concentration est donnée par :

$$C_r = \frac{\varepsilon_B \cdot p \cdot s \cdot C_B}{Q} \quad (3)$$

où C_B est la concentration du bain précédent, ε_B le facteur d'entraînement unitaire (par m^2 de pièce) du bain précédent, p le nombre de pièces traitées par unité de temps, s la surface d'une pièce. Il est facile de déduire l'entraînement ε_B connaissant les concentration C_r et C_B .

Bain de rinçage statique :

Pour un bain de rinçage statique, la concentration change à chaque passage d'une pièce.

Si le bain de traitement précédant le bain de rinçage a une concentration constante C_B en une espèce donnée, si e est l'entraînement du bain de traitement vers le bain de rinçage et e' l'entraînement du bain de rinçage vers la suite de la chaîne, alors :

$$C_n = \frac{(V - e' - s)C_{n-1} + eC_B}{V} \quad (4)$$

soit :

$$C_n = \frac{(V - e' - s)^n C_0 + eC_B \sum_{i=0}^{n-1} (V - e' - s)^i V^{n-1-i}}{V^n} \quad (5)$$

ou encore :

$$C_n = \frac{(V - e' - s)^n}{V^n} C_0 + \frac{eC_B}{V^n} \left(\frac{V^n - (V - e' - s)^n}{e' + s} \right) \quad (6)$$

où s est la surverse du bain, c'est à dire le volume rejeté à chaque passage de pièce.

$$s = e - e' - E + \chi \quad (7)$$

En général $C_0=0$ et si $e=e'$ on obtient :

$$C_n = C_B - \left(\frac{V - e'}{V} \right)^n \cdot C_B \quad (8)$$

A partir de ces équations, il est possible de calculer l'évolution du bain au cours du temps connaissant les facteurs d'entraînement (ce qui permet, par exemple, de décider au bout de combien de pièces changer un bain) ou de calculer les facteurs d'entraînement, connaissant la concentration du bain à un instant donné.

Bain de rinçage cascade :

Si C_{n-1} est la concentration dans la cuve n-1, C_n la concentration dans la cuve n et C_{n+1} la concentration dans la cuve n+1, alors :

$$C_n = \frac{QC_{n-1} + eC_{n+1}}{Q} \quad (9)$$

où Q est le débit d'eau dans le rinçage cascade et e l'entraînement supposé identique pour l'ensemble des cascades.

En considérant qu'en général Q est relativement faible et C_{n-1} petit par rapport à C_{n+1} , on peut considérer que $C_n = \frac{eC_{n+1}}{Q}$ (10)

Evaporation :

Les courbes expérimentales de l'évaporation d'un bain sont données dans le cahier technique de la DPP (direction de la prévention des pollutions) « Traitement de surface : dépollution à la source »^[Min. Env 85]. Nous avons approché ces courbes par les équations suivantes :

Avec un dispositif d'aspiration : $E_a = 0,74 \cdot e^{(0,04T-0,1)} - 1,1$ (en $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$);

sans dispositif d'aspiration : $E_a = 0,76 \cdot e^{(0,0365T-0,1)} - 2,2$ (en $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$).

Exploitation de ces modèles :

Nous avons intégré dans l'outil les calculs permettant d'évaluer les paramètres de la chaîne dans les différents scénarios pris en compte. Il s'agit surtout d'aider l'utilisateur à fournir au logiciel des valeurs fiables de concentration des différents polluants dans les flux concernés. Les résultats obtenus peuvent aussi être exploités dans le but d'optimiser les flux, notamment la consommation d'eau, qui est limitée par l'arrêté du 26 septembre 1985.

2.1.3) Seuils réglementaires de rejet et identification des flux à traiter

Les seuils de rejet sont définies en fonction soit de l'arrêté général du 26 septembre 1985, soit de l'arrêté de classement de l'installation. Nous avons prévu dans l'outil la possibilité d'introduire les normes spécifiques à une installation particulière ou bien d'utiliser les valeurs définies par le texte général.

Les seuils de rejet font référence, d'une part, à des paramètres généraux :

- la teneur en matières en suspension,
- la teneur globale en métaux,

- la teneur en hydrocarbures.

et, d'autre part, à des paramètres spécifiques comme :

- le pH,
- la concentration de chaque élément métallique,
- la concentration d'autres espèces (cyanure, phosphate...)

Les valeurs de ces différents paramètres résultent des calculs de concentrations présentés au paragraphe 2.1.2. Elles sont comparées aux seuils de rejet afin d'en déduire l'écart avec la valeur de référence. Cet écart sera utilisé ensuite pour évaluer les quantités de réactifs à mettre en oeuvre pour une dépollution physico-chimique classique de l'effluent.

2.2) Aide à la décision

Un fois le diagnostic établi sur la nature et les caractéristiques des flux à traiter, il faut identifier les solutions de traitement. Notre approche a été relativement différente dans le cas de l'élimination et dans celui de la valorisation.

Actuellement, on dispose de peu de recul sur les techniques de valorisation. Les résultats que l'on peut donner sont plus des indications que des certitudes. En raison de la variété des matériels sur le marché, il est difficile de prévoir les conditions opératoires et d'évaluer les coûts de fonctionnement. On peut cependant cerner des sources potentielles d'économie liées à la diminution des pertes de matière et à la réduction des besoins en termes de dépollution classique. L'approche adoptée ici pour la valorisation est donc essentiellement descriptive et déductive.

Pour la dépollution classique, en revanche, la détermination la nature des traitements à effectuer est relativement facile (à quelques exceptions près, que nous évoquerons), ils peuvent être modélisés dans de nombreux cas. Nous avons donc d'avantage cherché à évaluer les coûts associés à ces traitement par l'intermédiaire de calculs de quantités de réactifs utilisés et de déchets ultimes produits. Ces résultats constituent une information essentielle pour évaluer l'intérêt d'une solution de valorisation.

2.2.1) Elimination

a) Détermination des opérations de dépollution

Les opérations de dépollution sont liées à la composition des flux de déchets. Chaque polluant peut être associé à un ou plusieurs types de traitement. Les principales opérations d'élimination sont les suivantes :

- la réduction des oxydants tels que le chrome hexavalent,
- l'oxydation des cyanures et de la matière organique,
- la précipitation de tous les métaux ainsi que de certains anions (fluorure, phosphate),
- la neutralisation des acides et des bases,
- la floculation, qui permet d'augmenter la taille des particules en suspension pour en faciliter la décantation et la filtration,
- enfin, la décantation et la filtration, qui concernent toute matière solide en suspension.

Pour l'instant, seules les réactions d'oxydoréduction et neutralisation-précipitation sont prises en compte. Nous avons, par ailleurs, fait l'hypothèse simplificatrice de rendements égaux à un pour les étapes de floculation, décantation et filtration.

Pour chacune de ces opérations, il existe plusieurs réactifs d'usage plus ou moins classique :

- pour l'oxydation :
 - hypochlorite de sodium (HClO),
 - ozone (O_3),
 - eau oxygénée (H_2O_2),
 - acide de Caro,
- pour la réduction :
 - bisulfite de sodium,
 - sulfate de fer,
 - sulfure de fer,
- pour la précipitation :
 - hydroxyde de sodium ou de calcium,
 - carbonate de sodium ou de calcium,
 - sulfure de sodium ou de fer,
 - chlorure de calcium pour les ions fluorure et phosphate.

En pratique, les plus utilisés sont l'hypochlorite de sodium pour l'oxydation, le bisulfite pour la réduction et l'hydroxyde de sodium ou de calcium pour la précipitation des métaux. La plupart du temps, ces réactifs donnent des résultats satisfaisants. Les difficultés apparaissent généralement dans le cas des effluents contenant des métaux sous formes de complexes, qu'il s'agisse de complexes à base de cyanures ou d'autres agents complexants. Les réactions d'oxydation des cyanures et de précipitation des métaux sont alors fortement modifiées^[Peters 84],
[Peters 85]

Dans le cas des complexes cyanurés, on utilisera alors préférentiellement l'acide de Caro en présence de cuivre comme catalyseur afin d'oxyder les radicaux cyanures. Pour les autres agents complexants, la solution est plus délicate. Elle fait intervenir soit une complexation soit une oxydation. Dans le premier cas il s'agit de faire réagir le métal avec un complexant plus fort qui conduise à la formation d'un nouveau complexe précipitant dans les conditions où se trouve la solution. Lorsqu'un tel complexant n'existe pas, on tentera d'oxyder le complexe métallique à l'aide d'un oxydant fort (acide de Caro, ozone..).

On peut donc distinguer deux types d'effluents :

- les effluents contenant des métaux non complexés ou uniquement des complexes cyanurés, pour lesquels le choix des réactifs ne pose pas de problème,
- les effluents contenant des complexes provenant d'autres agents complexants, pour lesquels l'analyse de la solution est plus délicate.

Nous avons, pour le moment construit le module de calcul en ne tenant compte que du premier cas, pour lequel nous avons considéré uniquement, les réactifs les plus courants et des rendements optimaux. Lorsque des complexants sont présents, un message avertit l'utilisateur des difficultés qu'il peut rencontrer.

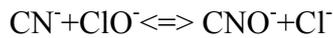
b) Calculs relatifs aux solutions classiques de dépollution

En appliquant des raisonnements issus de la chimie en solution, il est possible, lorsque l'on connaît la composition de l'effluent, de prévoir les quantités de réactif à utiliser pour arriver à un niveau de pollution compatible avec la norme de rejet. Ceci permet d'évaluer la quantité de boues générées par un traitement classique et de prévoir un coût approximatif de traitement.

Nous avons implanté ces calculs dans notre outil, notamment à partir de résultats obtenus dans le cadre d'un travail de DEA réalisé au sein de notre laboratoire^[Leduc 96]. Les bases théoriques de ces calculs sont proposés en annexe III-3.

Décyanuration

La réaction mise en oeuvre est l'oxydation des cyanures en cyanates par les ions hypochlorite :



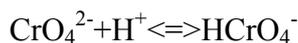
à pH > 10,5 la réaction est totale^[Degrémont 89] et rapide, ce qui permet de déduire :

$$V_{\text{NaClO}} = \frac{C_{\text{CN}^-} \cdot V_e}{C_{\text{NaClO}}}$$

Déchromatation

La réduction du Cr^{VI} en Cr^{III} est optimale à pH = 2,5. La déchromatation a donc généralement lieu en deux étapes : une acidification à l'aide d'acide chlorhydrique ou sulfurique puis une réduction avec du bisulfite de sodium.

La quantité d'acide consommé par l'acidification dépend de la nature des ions chromiques en solution. Pour un pH initial supérieur à 6,4 ce sont les ions CrO₄²⁻ qui prédominent^[Pourbaix 63]. Lors de l'acidification, une partie de l'acide est consommé par la réaction :



Pour un pH inférieur à 6,4
$$V_{\text{HCl}} = \frac{V_e (10^{-2,5} - 10^{-\text{pH}_0})}{C_{\text{HCl}} - 10^{-2,5}}$$

au delà de pH = 6,4
$$V_{\text{HCl}} = \frac{V_e (10^{-2,5} - 10^{-\text{pH}_0})}{C_{\text{HCl}} - 10^{-2,5}} + \frac{C_{\text{Cr}^{\text{VI}}} \cdot V_e}{C_{\text{HCl}}}$$

(en première approche, sans tenir compte d'effets tels que l'effet tampon de l'eau en présence de carbonates, par exemple)

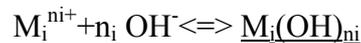
La réaction globale de réduction s'écrit $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 3\text{HSO}_3^- + 5\text{H}_3\text{O}^+ \rightleftharpoons 2\text{Cr}^{3+} + 3\text{SO}_4^{2-} + 9\text{H}_2\text{O}$

Cette réaction est quantitative, ce qui permet d'écrire :

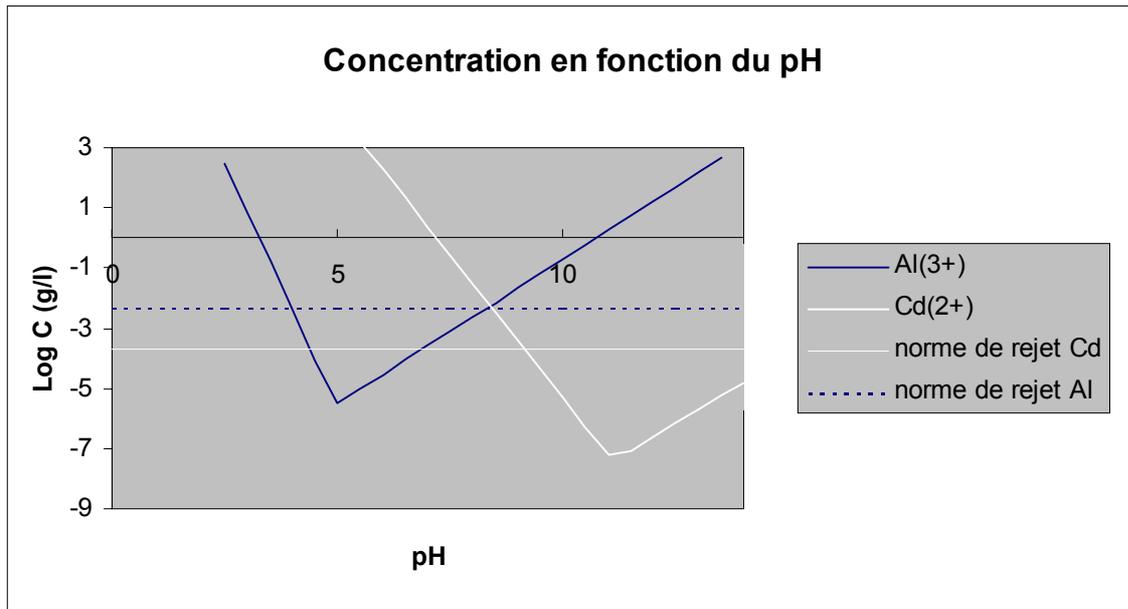
$$V_{\text{NaHSO}_3} = \frac{3 \cdot C_{\text{Cr}^{vi}} \cdot V_e}{C_{\text{NaHSO}_3}}$$

Précipitation métallique

La précipitation de l'ion métallique $\text{M}_i^{\text{ni}+}$ sous forme d'hydroxyde a lieu suivant la réaction :



La solubilité des hydroxydes métalliques varie en fonction du pH de la solution. D'une manière générale, on observe une précipitation lors de l'augmentation du pH jusqu'à un pH limite au delà duquel les hydroxydes métalliques se redissolvent. Ceci est dû au caractère amphotère de la plupart hydroxydes métalliques, qui se redissolvent sous forme de complexes $[\text{M}(\text{OH})_{2n}]^{n-}$. La figure III-7 représente les courbes simplifiées de concentration du cadmium et de l'aluminium en fonction du pH (d'après [Pourbaix 63]). On constate notamment sur cette figure que la précipitation simultanée du cadmium et de l'aluminium sous forme d'hydroxyde est théoriquement impossible. Il serait donc nécessaire -sans tenir compte des effets de synergie sur lesquels il nous ne disposons malheureusement d'aucune information fiable- pour un effluent qui contiendrait ces deux espèces, de procéder à deux étapes de précipitation/filtration.

Figure III-7 : Solubilité des ions Al^{3+} et Cd^{2+} en fonction du pH

La première étape du calcul consiste à identifier les zones de précipitation des différents métaux présents et à les hiérarchiser. Ensuite, pour chaque zone, on calcule la quantité $V_{\text{NaOH,N}}$ de soude nécessaire à l'augmentation du pH jusqu'au début de précipitation puis la quantité $V_{\text{NaOH,P}}$ de soude consommée par la précipitation proprement dite.

L'identification des zones de précipitation fait intervenir les normes de rejet et la solubilité des hydroxydes concernés en fonction de l'acidité. La relation entre le logarithme de la concentration en métal et le pH peut être assimilée à une droite :

$$\log([M_i^{ni+}]) = a_i \cdot \text{pH} + b_i$$

ceci est également vrai pour le complexe $\text{Mi}(\text{OH})_{2ni}^{ni-}$. Connaissant la concentration limite admissible de métal dans l'effluent rejeté vers le milieu naturel, on peut en déduire les $\text{pH}_{i,1}$ et $\text{pH}_{i,2}$ qui bornent la zone de pH dans laquelle la concentration en métal M_i est acceptable, que nous appellerons zone de précipitation.

On peut ainsi déterminer théoriquement pour plusieurs métaux en solution les zones de précipitations dans lesquelles plusieurs métaux précipitent. Chaque zone est définie par un $\text{pH}_{1,zi}$, qui est le plus élevé des $\text{pH}_{1,i}$ des métaux considérés et un $\text{pH}_{2,zi}$ qui est le plus bas des $\text{pH}_{i,2}$ des métaux de la zone. Entre ces deux pH limites, tous les métaux de la zone considérée sont présents en solution à des concentrations inférieures aux seuils de rejet.

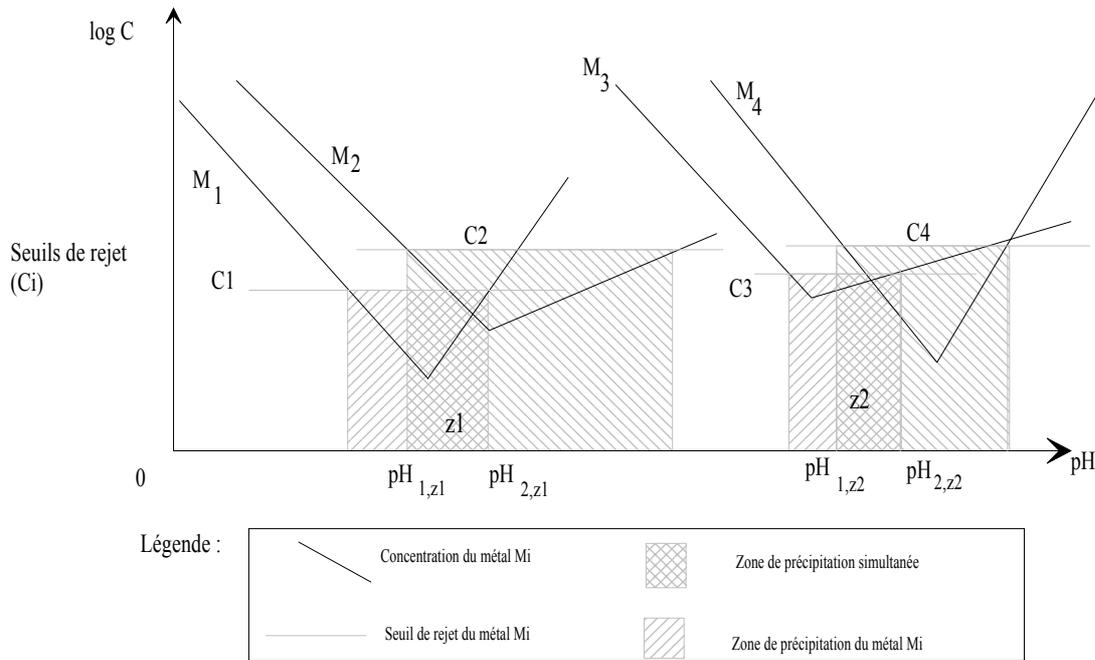


Figure III-8 : détermination des zones de précipitation des ions métalliques sur un graphe représentant la concentration en métaux M_i par rapport au pH

Au cours de l'opération de précipitation, si l'on débute à un pH_0 acide, une partie de la base forte sera consommée dans la réaction de neutralisation de l'eau :



Le volume de base consommé dans cette réaction est (à condition de considérer que les effluents sont suffisamment dilués) :

$$V_{B,N} = V_e \cdot \frac{10^{-pH_0} - 10^{-pH_{1,zi}}}{C_B}$$

où C_B est la concentration initiale de la base.

Le volume de base forte consommée dans la réaction de précipitation proprement dite est :

$$V_{B,P} = \frac{\sum n_i ([M_i^{n_i+}]_0 - [M_i^{n_i+}]_f)}{C_B}$$

$$\text{où } [M_i^{n_i+}]_f = 10^{a_i pH_{1,zi} + b_i}$$

Ces calculs sont effectués pour chacune des zones de précipitation, en considérant comme pH_0 de départ de la neutralisation le pH final de l'étape précédente. On obtient alors le volume global de base en faisant la somme des volumes pour chacune des zones de précipitation.

Les quantités de boue générées sont données par :

$$M_b = (1 - s) \mu_{H_2O} \sum_{M_i(OH)_m} V_e ([M_i^{n_i+}]_0 - [M_i^{n_i+}]_f)$$

où s est la siccité de la boue (on peut en première approximation prendre la valeur réglementaire pour la mise en décharge, soit 35%) μ_{H_2O} est la masse molaire de l'eau et $\mu_{M_i(OH)_m}$ celle de l'hydroxyde métallique.

c) Structure associée à l'information sur l'élimination

Les calculs présentés au chapitre précédent ont nécessité la mise en place de plusieurs entités dans la base de données. Il s'agit par exemple :

- des charges des ions métalliques,
- des constantes a_i et b_i permettant de calculer la concentration en fonction du pH,
- des masses molaires.

Ces entités sont liées aux autres éléments de la base de données qui interviennent dans les calculs:

- base des produits chimiques,
- seuils de rejet.

Le système fait appel à ces données, qu'il extrait en fonction des besoins et de la nature de l'effluent. La figure III-9 présente les étapes du calcul implanté dans l'outil.

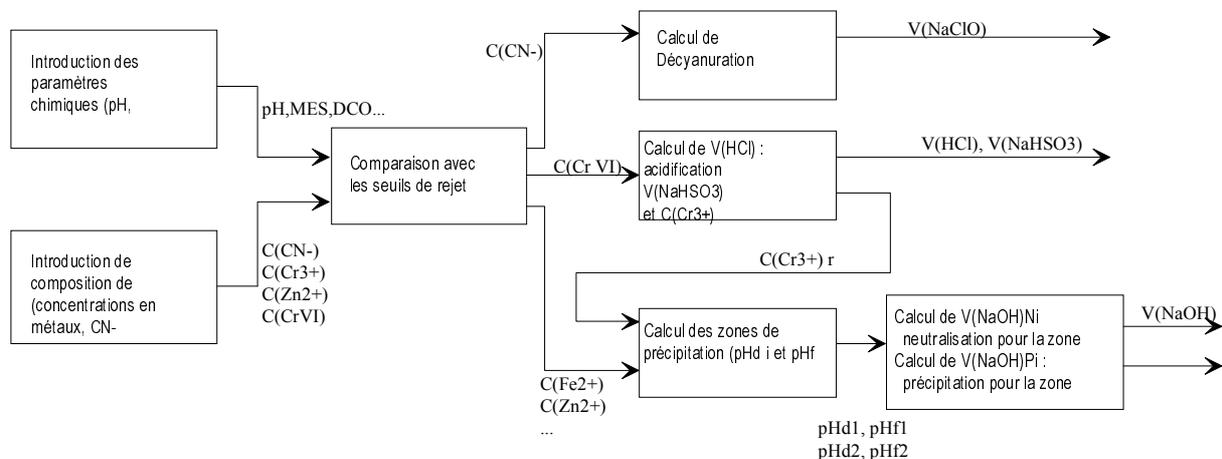


Figure III-9 étapes du calcul des quantités de réactifs pour une dépollution classique

d) Informations techniques et économiques

Une fois les quantités de réactifs à mettre en oeuvre déterminées ainsi que les quantités de boues, il est possible de calculer les coûts associés à ce traitement de dépollution classique. Il faut pour cela disposer des coûts des différents réactifs ainsi que des opérations de mise en décharge, qui peuvent constituer une donnée initiale ou être fournis par l'utilisateur.

e) Perspectives d'évolution

Dans l'état actuel du système, le nombre de réactions et de réactifs pris en compte est relativement restreint. Cette première approche nous a permis d'identifier les étapes du raisonnement et les entités qui interviennent. Afin de pouvoir traiter une variété plus grande de polluants, avec des réactifs plus divers, un développement complémentaire de l'outil est à prévoir. Le cas des effluents contenant des complexes constitue un cas particulier intéressant à traiter car il concerne un nombre important de fonctions de traitement de surface.

2.2.2) Valorisation

Le module d'aide à la décision pour le choix de procédés de valorisation a fait l'objet de deux approches assez différentes. Dans un premier temps, nous avons mis en place une base de cas qui permet d'exploiter les exemples de réalisations et les associations envisagées par les experts dans le but de fournir des solutions à l'utilisateur.

Dans un deuxième temps, nous proposons l'architecture d'un module qui permet de constituer les liens entre des fonctions de traitement et des solutions de valorisation à partir d'un raisonnement portant sur les comportements des baignades et les objectifs des procédés de valorisation.

a) Approche par base de cas

L'approche par base de cas, est fondée sur un constat : dans les nombreux ouvrages traitant des techniques de valorisation et les revues spécialisée, les raisons du choix d'un procédé ne sont pratiquement jamais justifiées. Elles sont la plupart du temps implicites. On trouve généralement dans ces documents un descriptif du procédé et des phénomènes mis en jeu, des exemples d'application et des suggestions de domaines d'application.

Ces données quelque peu disparates ne suffisent pas à elles seules pour établir d'une manière générale les circonstances dans lesquelles tel ou tel procédé est applicable. Elles permettent cependant d'identifier des cas particuliers pour lesquels il devrait être possible d'avoir recours à la technique de valorisation (à condition, naturellement, que cette information soit objective).

On dispose donc d'une information qui n'est pas exhaustive mais dont l'avantage est de pouvoir s'exprimer très simplement sous forme de liens entre des procédés de traitement et des fonctions de traitement de surface. Elle est de plus indépendante du jugement du concepteur de l'outil et est censée refléter soit une réalité lorsque des exemples de réalisation existent, soit l'avis d'experts lorsqu'il s'agit uniquement d'applications potentielles.

En structurant ces liens de manière appropriée sous forme d'une base de données, il est donc possible d'aboutir à une aide à la décision. L'information est utilisée dans le sens inverse de celui utilisé habituellement pour la présenter, puisque l'on part d'une fonction de traitement de surface pour trouver tous les procédés qui peuvent être mis en place.

Structure du module

Le module d'aide à la décision faisant l'objet d'une approche par base de cas est divisé en deux parties :

- une base de solutions potentielles, où sont répertoriées les solutions théoriquement réalisables,
- une base d'exemples, qui regroupe des cas détaillés de réalisations industrielles.

Base des solutions potentielles

La base de solutions potentielles correspond à des liens entre différentes tables du système (figure III-10) :

- procédés,
- fonctions de traitement de surface,
- types de postes (traitement, rinçage...).

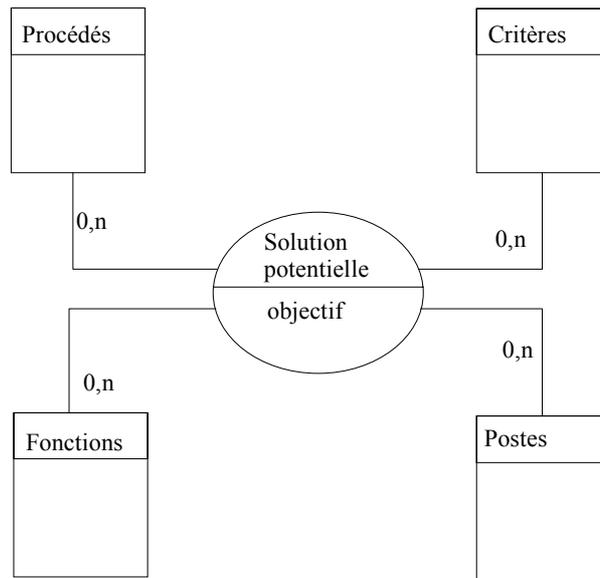


Figure III-10 : lien support de la base de solution potentielles*

Un lien entre le procédé X, la fonction F et le poste P signifie que le procédé X peut être employé sur le poste P pour la fonction F.

Ces liens sont de nature conditionnelle, c'est-à-dire qu'ils font intervenir des critères portant sur la composition de l'effluent, la nature du métal de base ou les volumes d'effluents à traiter. Ces critères permettent de prendre en compte les limitations de certaines techniques vis à vis de la teneur en différents éléments :

- limitations liées à la baisse de rendement en deçà de certains seuils de concentration,
- limitations liées à la tenue du matériel à certaines agressions chimiques,
- limitations liées à l'occurrence de réactions parasites pouvant entraîner des conséquences diverses:
 - ◆ dégagement de gaz nocif,
 - ◆ baisse de rendement,
 - ◆ génération d'un polluant secondaire,...
- limitations liées au dimensionnement des installations en fonction des volumes à traiter

* Les numéros (0,1 1,1 , 0,n ou 1,n) représentent la cardinalité de la relation entre deux entités d'une base de données, c'est-à-dire le nombre de relations du même type pouvant faire intervenir une même instance d'une entité donnée. Le symbole n correspond à un nombre illimité.

Il faut noter que la composition des effluents intervient ici comme critère d'élimination de solutions potentielles et non véritablement comme critère de sélection. En d'autres termes, le logiciel se base d'abord sur la fonction de traitement de surface et le type de poste pour sélectionner des solutions candidates. Certaines sont alors éliminées en raison de leur incompatibilité avec la composition des effluents considérés. Ceci traduit l'importance de la structure de la chaîne de traitement, c'est-à-dire de l'existence de débouchés internes, dans le choix d'une solution de valorisation. La plupart des solutions rencontrées dans la littérature concernent en effet une valorisation par :

- régénération des bains de traitement,
- recyclage des bains de rinçage dans le bain de traitement précédent,
- récupération de métaux dans les bains de traitement ou de rinçage statique.

La récupération est généralement réalisée sur des bains de dépôt métallique (traitement ou rinçage statique) dont la nature est donnée par le nom de la fonction. Pour la régénération des bains de traitement ou le recyclage des bains de rinçage, chaque fonction se traduit par une évolution du bain au cours du traitement de surface, qui entraîne la génération de parasites ou un épuisement des réactifs. Ce sont ces phénomènes et non la composition du bain qui déterminent l'intérêt d'une régénération ou d'un recyclage et l'objectif de ces opérations. Cet objectif détermine à son tour la nature du procédé à employer.

Par exemple, si nous considérons deux bains de composition comparable : un bain de cuivrage acide et un bain de décapage dans lequel on aurait traité des pièces en cuivre, on conçoit bien que les objectifs d'une régénération ne seront pas les mêmes. Dans le cas du cuivrage, le cuivre constitue le réactif que l'on cherche à conserver dans le bain de traitement, alors que dans le cas du décapage, il constitue un parasite, qui doit être éliminé.

Base d'exemples

La base de solutions potentielles a été complétée par une base de cas dont l'objectif est de fournir des exemples concrets de réalisations industrielles. Ces exemples sont tirés de la littérature. Ils sont caractérisés par les données suivantes :

- fonction de traitement de surface,
- poste (bain de traitement, rinçage),

- procédés de valorisation,
- objectifs du procédé,
- destination des flux sortant du procédé,
- composition des flux,
- solution classique remplacée éventuellement,
- coûts d'investissement,
- coûts de fonctionnement,

économies éventuelles réalisées par rapport à la solution classique remplacée.

Parmi ces informations, seuls la fonction, le poste et le procédé de valorisation sont systématiquement disponibles. Les autres données sont souvent difficiles à extraire des sources dont nous disposons.

Pour chaque exemple, un schéma montre comment le procédé de valorisation s'insère dans la chaîne de traitement de surface.

Les exemples fournis sont accessibles en fonction de plusieurs critères :

- identité de la fonction de traitement de surface,
- similitude des compositions de bain, (présence d'un composant donné : métal, cyanure)
- type de procédé employé,
- objectif de valorisation.

Cette base d'exemples constitue également une forme d'aide à la décision, puisqu'en partant de la description d'une chaîne de traitement de surface, il est possible d'aboutir à des solutions effectives lorsque des exemples existent pour un contexte similaire. Cependant, les cas cités dans la littérature sont encore loin de couvrir l'ensemble des fonctions de traitement de surface. En pratique, ce sont principalement les revêtements métalliques qui ont fait l'objet d'expériences concluantes, et plus particulièrement ceux qui mettent en oeuvre un métal ayant une certaine valeur (nickel, chrome, métaux précieux).

b) Approche déductive

L'approche proposée ci-dessus présente des limites importantes. Elle n'est pas explicite quant aux raisons qui permettent de déduire qu'une solution est applicable à une situation donnée. Elle nécessite donc de disposer pour chaque fonction de traitement de surface d'une liste

exhaustive des solutions applicables. Si certaines publications^[ANRED 88] permettent éventuellement de constituer des listes de solution applicables pour une grande variété de fonctions de traitement de surface, elles ne sont pas non plus explicites, et n'offrent donc pas de garantie d'exhaustivité, ni de pérennité.

Pour compenser ces limites, il serait bon de pouvoir proposer des solutions de traitement non plus en fonction d'une connaissance implicite sur leur adéquation au cas traité mais en fonction de critères explicites et objectifs. Nous allons maintenant examiner quels peuvent être ces critères et comment ils peuvent être employés dans le cadre d'un système d'aide à la décision.

Les stratégies de valorisation qui peuvent être mises en place au sein d'une chaîne de TS ont été évoquées au paragraphe 7) du chapitre III :

- récupération,
- régénération,
- recyclage.

Ces stratégies peuvent concerner les bains de traitement ou les bains de rinçage. Leur intérêt dépend fortement du cahier des charges des différentes fonctions ou des différents débouchés externes possibles. Une fois que l'on a choisi une stratégie, celle-ci entraîne des objectifs concrets vis à vis de l'effluent. Ces objectifs peuvent être atteints au moyen des procédés de valorisation en fonction de leurs contraintes propres.

La stratégie de régénération d'un bain de décapage du fer nécessite de débarrasser la solution du fer dissout et de restaurer la concentration d'acide sulfurique. Plusieurs procédés permettent d'atteindre ces objectifs :

- électro-électrodialyse^[Rialhe 93],
- résines adsorbantes^[Gernath 91].

La première sélection de ces solutions repose sur leur adéquation aux objectifs découlant du choix initial d'une stratégie. Le choix définitif entre ces deux techniques peut ensuite se faire sur des critères économiques et de compatibilité du matériel et du procédé avec la composition des effluents.

Plusieurs étapes de raisonnement apparaissent. Pour mettre en place une approche déductive générale, il est nécessaire de bien identifier ces étapes et de définir précisément leur contenu ainsi que les informations qu'elles nécessitent. Pour cela, nous allons remonter la chaîne des questions auxquelles il faut répondre pour aboutir à un résultat.

En partant du principe que les trois stratégies de base (récupération, régénération, recyclage) sont applicables à l'effluent considéré, nous allons examiner, pour chacune d'elles, ses conditions de mise en oeuvre.

- Récupération

Pour la récupération, les objectifs sont simples à identifier. Il s'agit de récupérer un matériau ou un produit, c'est-à-dire de l'extraire du déchet. Les questions que l'on peut se poser sont :

- Quel matériau ou quel produit a-t-on intérêt à extraire du déchet ?
- Quelles doivent être les propriétés du matériau récupéré ?
- Quel procédé permet d'extraire le matériau ou produit identifié comme intéressant ?
- Ce procédé est-il compatible avec la composition de l'effluent ?
- Quelle influence peut avoir cette composition sur la qualité du produit récupéré ?
- Quelles sont les conséquences de cette récupération sur la nécessité de traiter l'effluent et sur les quantités de déchets générés ?
- Combien cela va-t-il coûter ?

- Régénération

La régénération vise à rétablir les qualités initiales d'un bain pour qu'il puisse continuer à remplir sa fonction. On doit donc se poser les questions suivantes :

- Quelle était la fonction initiale du déchet ?
- Quelles sont les raisons de son inaptitude à remplir cette fonction ?
- Comment peut-on supprimer ces raisons ?
- Quel procédé employer ?
- Ce procédé est-il compatible avec la composition de l'effluent ?

- Quelles conséquence aura ce traitement sur les quantités de déchets générés ?
- Combien cela va-t-il coûter ?

- Recyclage

Le recyclage consiste à utiliser le déchet dans une fonction différente de sa fonction initiale. Les questions que cette stratégie engendre sont donc :

- Quelles sont les fonctions que pourrait remplir le déchet ?
- Quel est le cahier des charges de ces fonctions ?
- En quoi le déchet en l'état diffère-t-il de ce cahier des charges ?
- Quelles sont les étapes possibles pour le rendre conforme à ce cahier des charges ?
- Quel procédé employer ?
- Ce procédé est-il compatible avec la composition de l'effluent ?
- Quelles conséquence aura ce traitement sur les quantités de déchets générés ?
- Combien cela va-t-il coûter ?

Cet ensemble de questions ne concerne pas uniquement le cas du traitement de surface. Elles sont en fait applicables à tout déchet que l'on cherche à valoriser suivant l'une des stratégies de base. Certaines questions sont communes aux trois stratégies : compatibilité du flux avec le procédé, influence sur la génération de déchets secondaires, coût. D'autres, au contraire, leur sont particulières.

Pour répondre à ces questions, il faut disposer de données qui seront structurées de manière particulière pour chaque stratégie. Il faut ensuite exploiter ces données et les réponses qu'elles apportent pour déterminer les solutions recherchées.

- Récupération

Les matériaux et produits que l'on peut récupérer sont définis par l'existence d'un débouché interne ou externe. Le débouché externe dépend de la valeur marchande des produits. Il est possible d'établir *a priori* une liste de matières de récupération négociables. Cette liste peut être complétée en raison de l'existence d'un marché local atypique lié à la présence d'une industrie particulière.

Sur le plan interne, une matière est valorisable si elle peut se substituer à une matière première du process. Pour chaque installation, il est donc intéressant de disposer d'une liste des matières premières mises en oeuvre.

Chacun des éléments de ces deux listes peut être associé à son cahier des charges, c'est-à-dire à l'ensemble des caractéristiques que le produit doit avoir pour répondre aux exigences du marché ou de la fonction qu'il doit remplir.

Les produits valorisables correspondent à l'état final de l'opération de récupération. Il peut s'agir de métal à l'état métallique, de sel, d'acide concentré ou sous forme cristallisé, etc.... Dans le déchet ou l'effluent, ils sont normalement présents sous forme ionique, souvent à l'état dilué. Il n'est donc pas aisé de les identifier. Il faut donc établir une correspondance entre les espèces que l'on peut trouver en solution et les produits récupérables. Par exemple il faut établir que des ions sulfates SO_4^{2-} et des ions cuivreux Cu^{2+} constituent du sulfate de cuivre CuSO_4 ou que les ions Cd^{2+} peuvent conduire au cadmium métal Cd. Il s'agit la plupart du temps de réactions simples mais qui ne peuvent être prises en compte au plan informatique qu'à partir du moment où elles ont été implantées sous forme de liens dans la base de données.

L'opération de récupération d'un produit permet donc de passer d'un ensemble de composants en solution au produit valorisable et de séparer celui-ci de la solution. Pour chaque produit et chaque groupe de composants, il est possible d'établir l'ensemble des procédés qui permettent de passer des composants en solution au produit final. On peut aussi définir des ensembles de couples produits/composants pour lesquels un procédé est adapté. Ainsi, l'électrolyse est elle appropriée pour faire passer de l'état ionique à l'état métal les éléments de l'ensemble *métaux électrodéposables*. Le tableau III-4 présente quelques exemples de valorisation par récupération/extraction.

Objectif	Procédé	Cible
Extraction		
	Ultrafiltration	matière organique, macro-molécules
	Electrolyse	métaux électrodéposables
	Electro-électrodialyse	métaux électrodéposables
	Résines échangeuses	ions
	Cristallisation	sels en solution
	Electrodialyse	tous les ions, de manière non

		sélective
	Osmose inverse	tous les contaminants de l'eau, de faible poids moléculaire
	Evaporation	tous les contaminants non volatiles de l'eau

Tableau III-4 : techniques applicables à la récupération des composants d'un bain de traitement

La structure des données et des éléments de connaissance intervenant dans la sélection d'un procédé de récupération est illustrée par la figure III-11. L'exploitation de cette connaissance fait intervenir des données dynamiques générées au cours d'une session telles que la composition du bain, ou l'ensemble des matières premières utilisées dans la chaîne. En identifiant les composants du bain, on identifie du même coup les produits valorisables et les procédés qui peuvent être utilisés. Des critères, portant sur la composition du bain ou d'autres paramètres de la chaîne de traitement de surface, permettent d'éliminer les procédés qui ne sont pas compatibles avec l'environnement local. Ils permettent aussi d'exprimer les contraintes portant sur la qualité du produit récupéré en fonction de la composition initiale du bain.

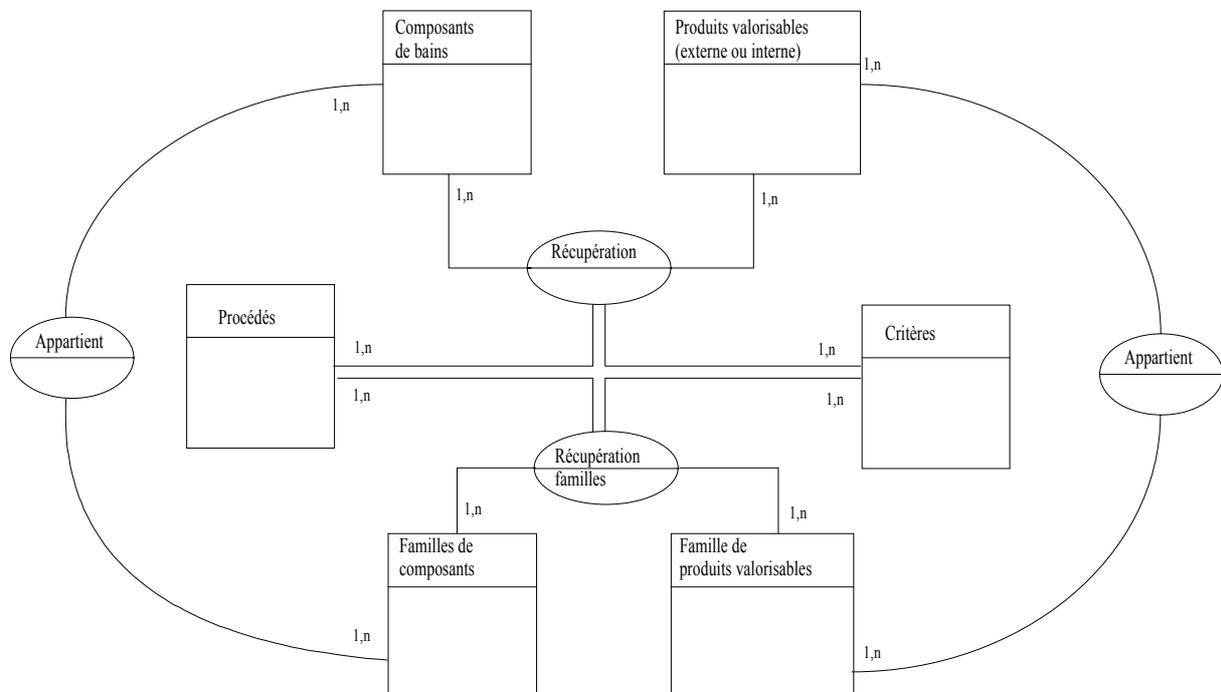


Figure III-11 : Structure des données intervenant dans l'identification d'une technique de récupération

- Régénération

Si pour la récupération, la présence d'un produit récupérable constituait le critère déterminant, dans le cas de la régénération le raisonnement est sensiblement différent. Il s'agit de redonner à un flux, qui peut être complexe, des caractéristiques telles qu'il puisse assurer à nouveau sa fonction initiale.

En premier lieu, il faut donc déterminer les raisons qui font que ce flux n'est plus conforme au cahier des charges de la fonction dont il est issu. Ces raisons proviennent de l'évolution du bain au cours du temps, qui induit principalement des phénomènes d'accumulation et d'épuisement.

L'accumulation peut être :

- exogène (dissolution du métal de base, entraînement)
- endogène (réactions parasites, réaction principale).

L'épuisement provient :

- de la consommation des réactifs par les réactions principales et parasites,
- de l'entraînement lorsqu'il est compensé par un ajout d'eau.

Les phénomènes d'accumulation peuvent se traduire par une contamination lorsque le produit qui s'accumule a un effet néfaste sur la réaction principale mise en oeuvre dans le bain de traitement. Pour les bains de rinçage, seuls les phénomènes d'accumulation se produisent alors que pour un bain de traitement, les deux phénomènes peuvent avoir lieu simultanément.

Les remèdes envisageables sont :

- pour l'accumulation : la destruction du contaminant, l'extraction du contaminant, inversion de la réaction à l'origine de l'accumulation, l'extraction du principe actif pour sa recombinaison,
- pour l'épuisement : apport de réactif en complément, concentration du bain, inversion de la réaction à l'origine de la consommation du réactif.

Dans le cas de l'accumulation, à partir du moment où l'on a identifié la nature d'un contaminant, il est possible de lui associer un ou plusieurs procédés pour chacun des remèdes préconisés précédemment. On aboutit aux relations données dans le tableau III-5 :

Objectif	Procédé	Cible
Extraction		
	Ultrafiltration	matière organique, macro-molécules
	Electrolyse	métaux électrodéposables
	Electro-électrodialyse	métaux électrodéposables
	Résines échangeuses	ions
	Cristallisation	sels en solution
Inversion de la réaction	Electrodialyse	tous les ions, de manière non sélective
	Electrolyse	résultat d'une oxydo-réduction
	Electro-électrodialyse	résultat d'une oxydo-réduction
Destruction du contaminant	Electrodialyse	sel (régénéré en acide et base)
	Electrolyse	CN ⁻ , autre espèce ionique oxydable ou réductible en une espèce inoffensive (gazeuse ou en solution)
Extraction du principe actif pour recomposition	Electro-électrodialyse	idem
	Osmose inverse	eau contaminée
	Evaporation	eau contaminée,
	Résines	ions

Tableau III-5 : procédés appliqués à la régénération de bains contaminés

De la même manière, pour les cas d'épuisement on peut préciser les cas d'application des différentes méthodes (tableau III-6).

Objectif	Procédé	Cible
Concentration (ou extraction d'eau)		
	Evaporation	toute solution aqueuse
	Osmose inverse	toute solution aqueuse
Inversion de la réaction		
	Electrolyse	résultat d'une oxydo-réduction
	Electro-électrodialyse	résultat d'une oxydo-réduction
	Electrodialyse	acides et bases
Apport de réactif		
	Electrodialyse	ions
	Complément	tout réactif

Tableau III-6 : procédés appliqués à la compensation de l'épuisement de bains

- Cas particulier des techniques à objectif multiple

Certaines techniques peuvent être appliquées pour atteindre simultanément plusieurs objectifs. C'est par exemple le cas de l'électrodialyse, elle constitue une technique d'extraction des contaminants d'un bain de rinçage et permet, dans le même temps, de concentrer le bain de traitement correspondant. De la même manière, l'électrolyse peut être utilisée pour récupérer un métal (qui peut être éventuellement un contaminant du bain) et pour détruire un contaminant comme le cyanure.

- Cas particulier de l'électrolyse et des techniques membranaires à force motrice électrique : électrodialyse, électro-électrodialyse

Trois techniques utilisent l'électricité comme moteur du processus : l'électrolyse, l'électrodialyse, l'électro-électrodialyse. Elles concernent les ions en solution et sont le siège de réactions électrochimiques et de phénomènes de diffusion d'origine chimique et électrique :

- oxydo-réduction,
- migration des ions sous l'effet du champ électrique,
 - ◆ dans la solution,
 - ◆ à travers les membranes,
- migration des espèces chimiques sous l'effet de gradients de concentration,
- blocage des ions par les membranes en fonction de leur charge,
- dissociation de l'eau :
 - ◆ aux électrodes (H_2 , O_2),
 - ◆ à l'interface de membranes bipolaires (H^+ , OH^-).

Le choix de la technique la plus appropriée dépend non seulement des objectifs poursuivis mais aussi de la nature des ions concernés et de la composition globale de l'effluent.

On peut en théorie :

- Oxyder ou réduire une espèce par électrolyse ou électro-électrodialyse.

L'électro-électrodialyse se justifie lorsque :

- ◆ l'oxydation et la réduction de l'espèce considérée peuvent avoir lieu simultanément à la cathode et à l'anode (cas du fer ou du chrome). La migration de l'une des espèces étant stoppée par la membrane, une des réactions est supprimée.
- ◆ la solution contient des ions de signe opposé à l'espèce que l'on cherche à réduire ou oxyder susceptibles de provoquer une réaction parasite.
- ◆ la solution contient une espèce susceptible de réagir aux deux électrodes.

On peut établir une liste des couples oxydant/réducteur dont la transformation peut être réalisée soit par électrolyse classique soit par électrodialyse. Il est aussi possible d'établir une liste de produits dont la présence est préjudiciable à l'une ou l'autre de ces deux techniques.

- Régénérer un acide ou une base à partir d'un sel par électrodialyse à membrane dipolaire ou électro-électrodialyse.

On peut établir la liste des sels pouvant être régénérés en acide ainsi que les contraintes portant sur la composition de l'effluent. Pour chaque couple sel/(acide/base), on peut éventuellement déterminer le procédé le mieux approprié.

- Extraire les ions d'une solution aqueuse.

Dans ce cas, tous les ions sont concernés. Il existe cependant des limitations liées à la valeur de certains paramètres comme le pH ou la teneur en matières en suspension.

- Approche générale de la régénération

A travers l'exemple ci dessus on voit apparaître l'ébauche du raisonnement conduisant au choix d'une technique de régénération. La connaissance de la composition initiale du bain et de son évolution permettent de cerner les phénomènes d'épuisement et d'accumulation et d'identifier les contaminants. Il est alors possible d'envisager plusieurs cas de figure :

- **épuisement seul** : une technique de concentration peut être mise en place, (que l'on peut en fait assimiler à une technique d'extraction d'un contaminant particulier : l'eau)
- **contamination seule** : des techniques d'extraction, de destruction et d'extraction/recomposition sont envisageables,

- **épuisement et contamination** : la concentration est interdite, en revanche les autres techniques, extraction, inversion, destruction et extraction/recomposition sont envisageables.

Nous pouvons mettre en place une base des transformations qui lie :

- une espèce chimique initiale (ou une famille de composants),
- une espèce chimique finale éventuelle (ou une famille),
- une technique de transformation,
- l'objectif de l'opération (extraction, concentration, inversion, destruction...) par rapport aux contaminants,
- l'objectif de l'opération par rapport aux espèces consommées (concentration, synthèse, apport),
- des critères de fonctionnement.

Ces liens peuvent être formalisés dans une structure de données (figure III-12) similaire à celle proposée pour le cas de la récupération (figure III-11). Ces deux structures constituent ce que nous pouvons appeler la "base des transformations possibles". A titre d'exemple, le tableau III-7 présente les liens existant entre quelques composants de bains et des techniques de valorisation.

Il est alors possible, pour chaque composant du bain, d'établir les objectifs de valorisation envisageables et d'identifier les techniques de régénération permettant de les atteindre. Dans certains cas, une même technique permet de traiter tous les composants, dans d'autres il faut envisager de coupler plusieurs procédés.

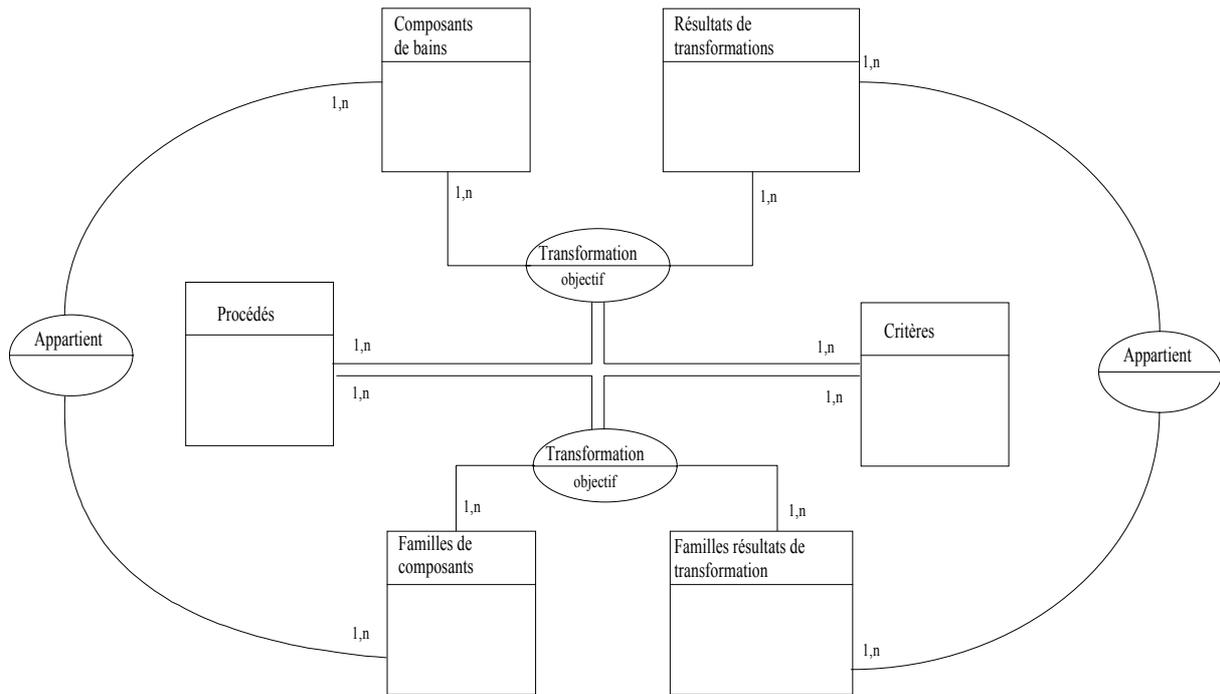


Figure III-12 : structure de données relatives aux techniques de transformation applicables à la régénération des bains.

Composant initial	Composant final	Technique	Objectif vis-à-vis des contaminants	Objectif vis-à-vis des réactifs
Cr^{3+}	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	Electro-électrodialyse	Conversion	Synthèse
Huile	Huile	Ultrafiltration	Extraction	Concentration
Cd^{2+}	Cd	Electrolyse	Extraction	Récupération
Sel	Acide ou base	Electrodialyse	Extraction	Synthèse
Ions	Ions	Electrodialyse	Extraction	Récupération
Eau	Eau	Evaporation	Extraction	Récupération

Tableau III-7 : exemples de données liant des techniques de valorisation aux composants des bains de traitement de surface dans la "base des transformations possibles" (nous ne présentons pas dans ce tableau les critères, qui peuvent être constitués de plusieurs conditions)

- Recyclage

Le recyclage est plus difficile à traiter que la régénération ou la récupération dans la mesure où il fait intervenir d'autres fonctions dont il faut pouvoir identifier le cahier des charges. A partir du moment où cette opération a été réalisée, deux données essentielles sont disponibles :

- la composition des bains usés,
- la composition des bains neufs dans lesquels on souhaite recycler les bains usés.

En comparant ces deux données, il est possible de déterminer, pour chaque couple bain usé/bain neuf, le rôle des composants dans le bain usé :

- contaminants
- réactifs (au sens large)

L'objectif du recyclage est d'amener le bain usé aux normes du bain neuf en éliminant les contaminants et en augmentant éventuellement la concentration des réactifs. On se trouve en fait ramené au cas de la régénération traité précédemment.

Le recyclage des bains de rinçage vers le bain de traitement correspondant constitue un cas particulier puisque leur composition est la même que celle du bain de traitement à un facteur de dilution près. Il s'apparente donc à la régénération d'un bain dilué.

c) Synthèse de l'approche déductive

Dans ce qui précède, nous avons proposé une structure de données et des éléments de raisonnement qui permettent de développer une aide à la décision pour le choix d'un procédé de valorisation de déchets et effluents de traitement de surface fondée sur une approche déductive. Celle-ci permet d'approcher d'un point de vue très général la valorisation des effluents et de s'affranchir de la connaissance a priori de l'adéquation d'un procédé de valorisation à une fonction de traitement de surface.

Les étapes du raisonnement sont :

- la caractérisation des bains usés,
- la détermination des débouchés potentiels :
 - ◆ bains neufs pour la régénération ou le recyclage
 - ◆ produit à usage interne ou débouché externe pour la récupération,
- l'identification du rôle joué par les composants des bains usés vis-à-vis des bains neufs (contaminants, réactif) ou des produits potentiellement récupérables (précurseur),
- la détection des couples composant/résultat dans la base des transformations possibles et identification des procédés utilisables,
- la vérification de la compatibilité des procédés avec les autres composants des bains,
- la vérification de la complétude du traitement.

Le raisonnement proposé ci-dessus sert de base au développement au système d'aide à la décision. Au delà de cette application particulière, il constitue une méthode générale d'approche d'un problème de valorisation interne, non seulement pour le traitement de surface mais aussi pour d'autres domaines faisant intervenir des réactions chimiques en phase aqueuse.

Sur le plan de sa mise en oeuvre (informatique), la contrepartie à ce raisonnement très général est la mise en place de bases de données complètes sur les transformations des composants de bains par les différents procédés et les critères de compatibilité des procédés avec les bains de traitement. La constitution de ces bases de données s'inscrit dans la poursuite de ce travail de thèse.

d) Difficultés liées aux connaissances de l'utilisateur

Une autre difficulté relative à la mise en place des bases de données nécessaires au bon fonctionnement de l'approche déductive provient de la nécessité de connaître l'évolution des bains de traitement avec le temps et le rôle joué par chacun des composants. Il faut que l'utilisateur ait une connaissance précise des processus mis en jeu au cours du traitement de surface pour pouvoir fournir les indications dont le système a besoin. Or ce n'est pas toujours le cas. Cette difficulté peut être contournée par la mise en place des bases de données déjà décrites au paragraphe 2.1) du chapitre IV concernant, d'une part, les formulations classiques de bains et, d'autre part, l'évolutions des bains au cours de l'opération de traitement de surface. Il s'agit encore de collecter et d'implanter un volume considérable de données.

e) Conclusion

En termes d'aide à la décision, deux approches sont possibles pour le choix de procédés de traitement de déchets et d'effluents de traitement de surface. La première repose essentiellement sur l'expertise et l'expérience et débouche sur une base de cas. La seconde fait appel à un raisonnement plus rigoureux et général, qui permet de déduire des caractéristiques d'un bain le procédé à employer. Il utilise des connaissances de bases sur les procédés de traitement. Cette approche, a priori plus fiable et plus ouverte à l'apparition de nouvelles

fonctions de traitement de surface ou de nouveaux procédés, nécessite néanmoins un nombre considérable de données pour être effectivement opérationnelle.

3) Exemple d'application

Dans le cas d'une chaîne de traitement de surface comportant :

- un décapage à l'acide sulfurique,
- un cuivrage alcalin,
- un cuivrage acide,
- un nickelage acide,

une session d'utilisation du système d'aide à la décision se déroule de la manière suivante.

3.1) Diagnostic

La première étape de la session consiste à décrire physiquement la chaîne de traitement de surfaces. Un premier formulaire permet donc de choisir parmi plusieurs catégories de bains : bain de traitement, bain de rinçage statique et bain de rinçage courant ou cascade.

Dans une deuxième étape, une fonction de traitement de surface est affectée à chaque bain de traitement. Elle est choisie parmi l'ensemble des fonctions de traitement de surface disponibles dans l'outil (cf. Annexe III-1). La figure III-13 présente la configuration de la chaîne à l'issue de ces étapes.

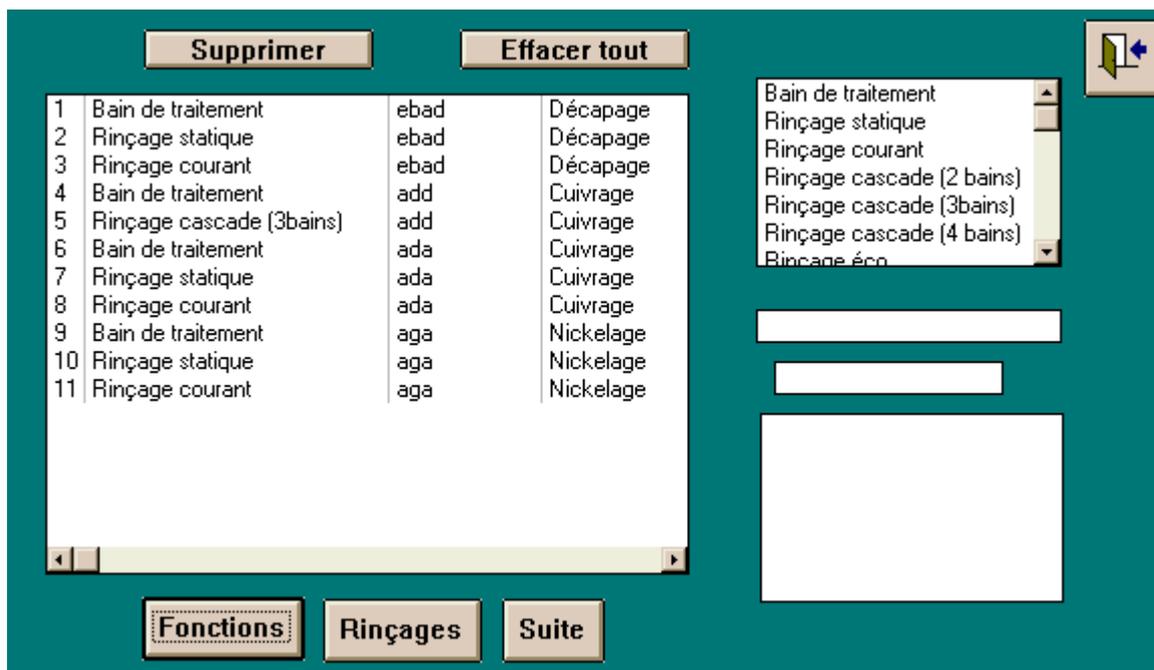


Figure III-13 : Description de la chaîne de traitement de surface

fonction: variante: watts Facteur de dilution initial:
 Facteur de dilution final:

Dépôts métalliques
 Nickelage
 Acide non fluoroborate, non hyp

formules classiques: tous

Acides minéraux
 Acide minéral fluoré
 Anions
 Bases minérales
 Composés organiques
 Composés chromiques
 Huile graisses

		Produit chimique	Concentration mini	Concentration maxi	
▶	aga	watts	H3BO3	220	280 g/l
	aga	watts	NiCl2	35	65 g/l
	aga	watts	NiSO4	220	280 g/l
	aga	watts	pH	4,5	5,2 pH
*					

Enr.1 sur 4

Figure III-14 : Proposition d'une formulation classique de bain pour une fonction de nickelage

Pour chacune des fonctions de traitement de surface choisie, l'utilisateur peut consulter les formulations classiques existantes et affecter celle de son choix au bain de traitement correspondant. Il peut aussi pour chaque formulation consulter l'évolution normale du bain. La figure III-14 présente un exemple de formulation classique pour le bain de nickelage.

La figure III-15 présente le formulaire dans lequel l'utilisateur peut modifier ou compléter la composition des bains de traitement et de rinçage. A l'aide d'une autre page écran, on peut calculer les facteurs d'entraînement et de dilution en fonction des consommations d'eau et de réactifs sur la chaîne de traitement de surface. Les facteurs de dilution obtenus par calcul (ou introduits directement par l'utilisateur, s'il les connaît) permettent de déduire la composition des bains de rinçage en fonction de celle des bains de traitement.

Composition complète de l'effluent

1. Sélectionner une famille chimique

2. Sélectionner un élément (double clic)

3. Sélectionner une ligne (double clic) et entrer la concentration

Acides minéraux
Acide minéral fluoré
Anions
Bases minérales
Composés organiques
Composés chromiques
Huile grasses

Supprimer

ordre	concentration	Produit chimique
4	2,20E+00	NaOH
4	3,60E+01	NaCN
4	1,75E+01	Na ₂ CO ₃
4	1,28E+01	pH
4	2,50E+01	Cu(CN) ₂

Postes concernés

2	Rinçage statique	Décapage
3	Rinçage courant	Décapage
4	Bain de traitement	Cuivrage
5	Rinçage cascade (3ba	Cuivrage
6	Bain de traitement	Cuivrage
7	Rinçage statique	Cuivrage

suite

Calculs de composition

Initialiser

Initialiser rinçages

Base de cas

Figure III-15 : Introduction et de modification la composition des bains

A l'issue de cette première étape d'introduction de données, les compositions de bains, qui peuvent être exprimées en espèces non dissociées (sels, acides), sont converties pour aboutir à des concentrations ioniques. Les compositions des bains sont comparées avec les exigences de l'arrêté du 26 septembre 1985 sur les rejets des ateliers de traitement de surface (figure III-16).

norme évaluation							
Poste	élément	Concentration	Minimum	Maximum			
1	Bain de traitement	pH	0,00	6,5	9	en	pH
2	Rinçage statique	pH	1,00	6,5	9	en	pH
3	Rinçage courant	pH	2,00	6,5	9	en	pH
4	Bain de traitement	CN-	30,33	0	0,0001	en	g/l
4	Bain de traitement	Cu	13,75	0	0,002	en	g/l
4	Bain de traitement	pH	12,75	6,5	9	en	pH
5	Rinçage cascade (3bains)	CN-	0,30	0	0,0001	en	g/l
5	Rinçage cascade (3bains)	Cu	0,14	0	0,002	en	g/l
5	Rinçage cascade (3bains)	pH	10,75	6,5	9	en	pH
6	Bain de traitement	Cu	100,00	0	0,002	en	g/l
6	Bain de traitement	pH	0,00	6,5	9	en	pH
7	Rinçage statique	Cu	0,10	0	0,002	en	g/l
7	Rinçage statique	pH	3,00	6,5	9	en	pH

Les paramètres affichés sont ceux pour lesquels un ajustement est nécessaire avant rejet dans le milieu naturel.

Les seuils haut et bas correspondent aux seuils de rejet imposés par la norme

Concentration de la solution de soude NaOH utilisée pour la neutralisation et la précipitation des métaux:	<input type="text" value="40"/> g/l	Concentration de la solution d'hypochlorite de sodium NaClO utilisée pour l'oxydation des cyanures:	<input type="text" value="700"/> g/l
Concentration de l'acide HCl utilisé pour l'acidification des solutions chromiques:	<input type="text" value="400"/> g/l	Concentration du bisulfite de sodium NaHSO3 utilisé pour la réduction des métaux:	<input type="text" value="1040"/> g/l

Enr:1 sur 20

Figure III-16 : Identification des paramètres des bains incompatibles avec un rejet dans le milieu naturel en fonction de la réglementation.

3.2) Aide à la décision pour la détoxification classique des effluents

L'étape suivante permet d'identifier les opérations de détoxification classiques qui seraient nécessaires pour traiter les différents bains. Les résultats (figure III-17) sont donnés pour chaque bain (traitement ou rinçage) et concernent :

- la décyanuration, avec la quantité d'eau de Javel nécessaire à l'oxydation des cyanures (en faisant l'hypothèse que tous les cyanures présents réagissent, ce qui n'est malheureusement pas le cas pour certains complexes métalliques),
- la déchromatation, avec la quantité d'acide et de bisulfite de sodium qu'il faut mettre en oeuvre pour réduire le chrome VI,
- la précipitation métallique, avec les quantités de soude nécessaires à la précipitation et la mise à pH de l'effluent. Dans le cas où il serait théoriquement nécessaire de procéder à plusieurs étapes de précipitation, celles-ci sont détaillées, et l'on peut identifier quels sont les métaux concernés par chaque étape.

Opérations de détoxification

Décyanuration

Poste	Volume de NaClO par litre d'effluent
4 Bain de traitement	5,83E-02
5 Rinçage cascade (3bains)	5,77E-04

Déchromatation

Poste	Volumes de réactifs par litre d'effluent	
	NaHSO3	HCl

Précipitations:		Poste	Nombre d'étapes	Volume total de NaOH en litre par litre d'effluent	Masse de boue en kg par litre d'effluent	Masse de boue en kg/h	Masse de boue en kg par vidange
4	Bain de traitement	1	4,37E-01	6,05E-02	0,00	0,00	
5	Rinçage cascade (3bains)	1	4,32E-03	5,99E-04	0,00	0,00	
6	Bain de traitement	1	4,17E+00	4,40E-01	0,00	0,00	
7	Rinçage statique	1	4,17E-03	4,40E-04	0,00	0,00	
8	Rinçage courant	1	4,17E-04	4,40E-05	0,00	0,00	
9	Bain de traitement	1	3,24E+00	4,29E-01	0,00	0,00	
10	Rinçage statique	1	3,24E-01	4,29E-02	0,00	0,00	

Détail des étapes de précipitation:		Poste	Élément	Etape	pH	Réactif nécessaire pour :	Mise à pH	Précipitation	Total
	Bain de traitement	Cu2+	1	8,47		1,00E+00	3,17E+00	4,17E+00	

Figure III-17 : Différentes étapes proposées pour la détoxification classique des bains et détermination des quantités de réactifs à mettre en oeuvre.

3.3) Aide à la décision pour la valorisation

Enfin, une dernière page-écran permet d'accéder aux solutions de valorisation issues de la base de cas (figure III-18). Pour chaque bain, l'utilisateur peut avoir accès à l'ensemble des procédés qu'il pourrait mettre en oeuvre. Il peut alors obtenir plus d'information sur chacune des techniques proposées ou consulter l'un des exemples de réalisation (figure III-19) faisant intervenir un des procédé sélectionnés ou concernant la même fonction de traitement de surface.

Procédés de valorisation

Procédés de valorisation applicables à la fonction TS sélectionnée

Nom procédé	Poste	objectif
Electrodialyse	Rinçage statique	Extraction des ions (Cu ²⁺ , SO ₄ (2-)) pour leur recyclage
Electrolyse	Rinçage statique	Extraction des ions Cu ²⁺ pour récupération sous forme
Evaporation	Rinçage statique	Concentration du bain avant son utilisation en complé

Fonction traitement de surface

Dépôts métalliques
Cuivrage
Acide non fluoborate, non pyro

Base de cas

Remarques

Plus d'information en double-cliquant sur le procédé

2	Rinçage statique	ebad
3	Rinçage courant	ebad
4	Bain de traitement	add
5	Rinçage cascade (3b)	add
6	Bain de traitement	ada
7	Rinçage statique	ada
8	Rinçage courant	ada

Objectif du procédé sélectionné

Extraction des ions (Cu²⁺, SO₄(2-)) pour leur recyclage dans le bain de traitement, régénération du bain statique

Figure III-18 : procédés de valorisation applicables au bain de cuivrage acide tirés de la base de cas.

Microsoft Access - [cas]

Paramètres

Année: 1981 27

Poste: Rinçage cascade (2 baigns)

Fonction TS: Procédés de valorisation

Dépôts métalliques: Cuivrage

Procédés de valorisation: Electrodialyse

Traitement classique remplacé: Station de traitement physico-chimique

Référence: DOPEE85

Afficher le Process Précédent Suivant

Coûts Ingénierie

Produits Commentaire

Formulaire: formulaire carte

```

    graph TD
      A[Bain de traitement] --- B[Electrodialyse]
      B --- C[Rinçage statique]
      C --- A
  
```

Formulaire: voir compos...

273

Composition du bain

Cu ²⁺	Concentré
H ₂ SO ₄	Concentré

Enr:1 sur 1

Formulaire: VoirOpération

Procédé mis en oeuvre: Electrodialyse

Objectifs: Régénération du bain de rinçage et du bain de traitement par transfert des réactifs du bain de rinçage vers le bain de traitement

Enr:4 sur 4

Figure III-19 : exemple d'application de l'électrodialyse à un bain de cuivrage acide tiré de la base d'exemples.

3.4) Approche déductive

Les raisonnements présentés au chapitre précédent en terme d'approche déductive sont encore en cours d'implantation dans le système d'aide à la décision. Ils permettent néanmoins d'expliquer les résultats obtenus pour les différents bains de notre chaîne de traitement comme par exemple pour le cas simple du décapage acide.

- Cas du décapage acide

Le bain est composé essentiellement d'acide sulfurique à 250 ml/l soit 450 g/l de H₂SO₄. Cet acide se charge progressivement en fer, jusqu'à une limite de 70 g/l au delà de laquelle le décapage devient plus difficile alors que parallèlement le pH augmente. Le fer joue donc un rôle de contaminant de la solution acide.

Les stratégies envisageables sont les suivantes :

Récupération

On peut envisager *a priori* la récupération de plusieurs produits :

- le sulfate de fer,
- l'acide sulfurique,
- le fer sous forme métallique.

Cette dernière opération ne présente aucun intérêt économique et est difficilement réalisable techniquement.

Régénération

Pour le bain de traitement, il s'agit de régénérer l'acide sulfurique :

- en extrayant le fer présent en solution,
- en favorisant l'apparition d'ions H₃O⁺.

Pour le bain de rinçage, il faut régénérer l'eau c'est-à-dire extraire les ions en solution.

Recyclage

Dans la ligne de traitement de surface étudiée, seul l'acide sulfurique pourrait trouver une utilité dans d'autres bains (cuvrage acide et nickelage). Il faudrait donc le débarrasser du fer, ce qui revient à l'opération précédente de régénération.

Au niveau des bains de rinçage, un recyclage vers le bain de traitement est envisageable selon quatre modes :

- sans modification, pour compenser l'entraînement et l'évaporation, ce qui n'est possible que si ceux-ci sont importants, (le bain étant à une température de 40 à 50 °C, on peut estimer l'évaporation entre 0 et 2 l.m⁻².h⁻¹, ce qui est relativement faible),
- après concentration, ce qui permet de compenser l'entraînement, et de régénérer le bain de rinçage,
- par transfert des ions vers le bain de traitement,
- par transfert sélectif de l'acide sulfurique.

Les différentes options ayant été recensées, nous pouvons examiner les procédés utilisables.

- La présence du fer et l'absence de métaux électrodéposables exclut l'électrolyse.
- De même, l'ultrafiltration n'a ici aucun intérêt puisqu'il n'y a pas de pollution organique.

Techniques d'extraction du contaminant:

- la **crystallisation** permettrait de récupérer le sulfate de fer par refroidissement du **bain de traitement**. L'acide sulfurique peut alors être complété pour reformuler un bain de décapage. On réalise dans le même temps une récupération et une régénération.
- les **résines échangeuses d'ions** pour extraire le fer du bain de traitement ne sont pas très recommandées en raison des fortes concentrations, en revanche, elles peuvent permettre de régénérer les eaux de **rinçage courant**,
- l'**électrodialyse** placée entre le bain de **rinçage statique** et le bain de traitement permet d'extraire les ions du bain statique et de les recycler dans le bain de traitement. Elle ne constitue cependant pas un moyen de régénération de ce dernier bain en raison de la présence du fer.

Techniques d'inversion de réaction :

- l'**électro-électrodialyse** et l'**électrodialyse à membrane dipolaire** permettent toutes deux de régénérer l'acide sulfurique du **bain de traitement**. Elles aboutissent parallèlement soit à un dépôt de fer à la cathode pour l'électro-électrodialyse, soit à une précipitation d'hydroxydes de fer pour l'électrodialyse.

Extraction du principe actif pour recomposition :

- il est théoriquement possible de fixer l'acide sulfurique du **bain de traitement** sur une **résine adsorbante** et de le régénérer ensuite par élution pour recomposer le bain de décapage.

Techniques de concentration :

- la concentration n'est pas envisageable pour le bain de traitement en raison de la présence de fer, en revanche, elle peut permettre de recycler les **bains de rinçage statiques** vers le bain de traitement. Il est possible d'avoir recours à l'**évaporation** ou bien à l'**osmose inverse**.

On voit que les possibilités sont très variées pour un simple bain de décapage et ses rinçages. Aucune de ces solutions ne permet de résoudre en même temps le problème du bain de traitement et des bains de rinçage. Pour traiter complètement le cas du décapage, il faudrait donc probablement investir dans trois unités :

- une unité de régénération du bain de traitement (électro-électrodialyse, électrodialyse à membrane dipolaire, résines adsorbantes ou cristallisation),
- une unité de recyclage du bain statique vers le bain de traitement (évaporation, osmose inverse, électrodialyse)
- une unité de régénération/détoxication des rinçages courants par résines échangeuses d'ions.

Le même genre de raisonnement peut être employé pour les autres bains de la chaîne. Il aboutit en général à un résultat plus large que l'approche par base de cas car il ne permet pas de prendre en compte certaines incompatibilités.

IV) Conclusions

Cette troisième partie, consacrée à la conception d'un système d'aide à la décision pour le traitement interne des déchets et des effluents issus de l'industrie du traitement de surface, a permis de mettre en évidence des différences d'approche importantes entre traitement externe et interne, d'une part, et entre valorisation et détoxification, d'autre part.

Pour la valorisation en interne la structure de la chaîne, et le rôle joué par les différents éléments dans les bains constituent les éléments majeurs de choix d'une stratégie dont découlera ensuite le choix d'un procédé de valorisation en fonction des éléments concernés.

Les connaissances du producteur sur le process générateur du déchet et sur la nature et la composition des bains jouent un rôle fondamental dans la recherche d'une solution de valorisation en interne. Cependant, elles sont souvent incomplètes et peu formalisées. Ceci impose de proposer des moyens pour permettre à un producteur d'identifier et de caractériser les flux au sein de son installation.

Pour la détoxification classique, il s'agit d'identifier les étapes du traitement et d'évaluer pour chacune d'elles les quantités de réactifs mis en oeuvre et les quantités de boue formées. Ces données peuvent être utilisées pour évaluer le coût d'une solution classique de traitement.

Pour la valorisation, en raison de la variété des solutions techniques envisageables nous avons surtout identifié les procédés utilisables et leurs objectifs. Pour cela, deux approches sont possibles :

- une approche par base de cas, qui permet de proposer des solutions en fonction d'exemples tirés de la littérature et d'avis d'experts,
- une approche déductive, qui met en jeu un raisonnement et qui s'appuie sur des critères physico-chimiques pour décider de la faisabilité d'une solution.

Ce travail méthodologique permet de mesurer l'utilité d'un système d'aide à la décision dans ce domaine. Sa structure évolutive doit permettre un enrichissement permanent, constituant ainsi un outil de "capitalisation" de l'expérience dans le domaine de l'élimination et de la valorisation des effluents de traitement de surface.

QUATRIEME PARTIE : Conclusions et perspectives

I Conclusion générale

Dans la première partie de ce mémoire, nous avons défini le contexte de ce travail de thèse en rappelant ce que sont les déchets industriels spéciaux, comment ils sont pris en compte au plan réglementaire et quel peut être leur impact sur l'environnement. La nécessité de traiter ces déchets, soit dans le but de minimiser leur impact sur l'environnement soit afin de limiter la perte de matière ou d'énergie par laquelle se traduit leur rejet, n'est plus à démontrer.

Cependant, la réglementation ne permet pas d'identifier facilement les moyens à employer pour ce traitement et, par ailleurs, les outils destinés à faciliter le choix d'un mode de traitement ne couvrent pas, individuellement, l'ensemble des solutions de traitement et de valorisation. Une approche du type "aide à la décision", destinée à faciliter la recherche de solutions de traitement externe et interne, a été entreprise. Dans ce dernier cas, nous avons choisi un domaine d'activité particulier, le traitement de surface, pour mettre en évidence les apports d'une telle approche.

L'approche "aide à la décision" fait ressortir quatre fonctions essentielles :

- le **diagnostic**, dont l'importance est considérable dans le cas du traitement interne,
- l'**aide à la décision**, dont l'objectif est la proposition d'une solution de traitement adaptée au déchet soumis au logiciel,
- l'**information**,
- l'**archivage**.

La formalisation des connaissances qui conduisent à l'identification d'une solution de **traitement externe** nous a amené à définir les critères généraux de sélection d'une filière de traitement :

- **compatibilité physico-chimique** du déchet avec la **finalité** de la filière,
- **compatibilité réglementaire** du déchet avec la filière,
- influence du déchet sur le **fonctionnement** de la filière,
- **efficacité** de la filière vis-à-vis d'un polluant contenu dans le déchet.

Ces critères doivent être mis en relation avec le **système de référence** permettant d'évaluer le résultat du traitement, en l'occurrence les **seuils réglementaires de rejet**.

Dans le contexte du **traitement interne**, les mêmes critères peuvent être considérés. Le résultat de l'aide à la décision ne s'exprime plus en termes de filière ou de centre de traitement mais en termes de **procédé**. Le système de référence est fourni par les seuils réglementaires de rejet pour l'élimination, et par le cahier des charges des fonctions auxquelles est destiné le déchet pour la valorisation.

Nous avons montré l'importance que pouvaient avoir, dans le cadre de la recherche de solutions de traitement, à des degrés divers selon que l'on s'intéresse à la valorisation ou à l'élimination et que l'on envisage une solution interne ou externe :

- la connaissance de la fonction génératrice du déchet,
- la connaissance de l'environnement industriels,
- l'identité du déchet et l'information implicite qu'elle véhicule,
- les caractéristiques du déchet.

Ceci a permis, dans les deux cas, de développer une structure de données à laquelle nous avons associé un ensemble de procédures permettant d'utiliser ces données afin d'aboutir à une aide à la décision.

Dans le cas du traitement externe, nous avons abouti à une structure dont les éléments principaux sont :

- un système arborescent d'identification des déchets,
- un ensemble de solutions de traitement,
- un ensemble de critères de compatibilité entre des caractéristiques de déchets et des solutions de traitement,
- la relation ternaire existant entre les entités énumérées ci-dessus.

Le système d'aide à la décision est utilisé de la manière suivante. Au cours d'une session, l'utilisateur est amené à identifier son déchet. Cette identité est utilisée par le système pour sélectionner un ensemble de solutions candidates associées à des critères de compatibilité.

L'utilisateur doit alors caractériser plus finement son déchet, ce qui permet au système de vérifier sa compatibilité avec les solutions retenues et d'éliminer celles qui seraient incompatibles. La solution finale proposée par l'outil se compose d'une ou plusieurs filières de traitement, d'un ou plusieurs centres susceptibles d'accepter le déchet et de textes réglementaires en rapport avec le déchet ou les filières envisagées.

Pour le traitement interne, le cas de la valorisation et celui de l'élimination ont été distingués. Ceci a conduit à deux types de structures :

- d'une part, une association entre :
 - ◆ des composants de déchets ou d'effluents,
 - ◆ des opérations physico-chimiques de détoxification,
 - ◆ des réactifs,
- et, d'autre part, association entre :
 - ◆ des fonctions de traitement de surface
 - ◆ des procédés de valorisation,
 - ◆ des objectifs de valorisation,
 - ◆ des critères de compatibilité.

L'outil dédié au traitement interne permet à l'utilisateur de décrire un atelier de traitement de surface en termes de fonctions, de compositions de bains et de débits. Il se voit alors proposer deux éléments de réponse :

- un ensemble de solutions classiques pour lesquelles les quantités de réactifs à utiliser et les quantités de boues générées ont été calculées,
- une série de procédés de valorisation, qui peuvent être installés entre les bains de traitement de l'atelier, et leurs objectifs de valorisation.

Dans le cadre de cet outil pour le traitement interne, la possibilité de mettre en place une approche déductive, qui permettrait au système d'identifier des solutions de valorisation, sans que celles-ci aient été codifiées au préalable dans la base de données du système, a été examinée. Il s'agit de considérer l'ensemble des fonctions de traitement de surface pratiquées au sein de l'atelier comme des destinations potentielles pour le déchet, et de déterminer le rôle joué par les composants du déchet vis-à-vis de ces débouchés internes : contaminant, réactif,

composant neutre. La structure permettant d'implanter cette approche déductive se compose d'une association entre des procédés, des composants et des opérations de base : extraction, transformation.

Le système d'aide à la décision qui fait l'objet de ce travail ne constitue pas encore une référence complète et fiable en raison de l'incomplétude des données utilisées pour les construire. Il s'agit d'une maquette. Cependant, il a été conçu pour pouvoir être mis à jour facilement. En cela ils peuvent constituer **un support de capitalisation de l'expérience et des connaissances dans le domaine du traitement des déchets industriels spéciaux**. La validation du contenu de tels outils ne peut être réalisée en une seule fois. Il s'agit nécessairement d'un **processus progressif qui s'apparente plus à un enrichissement permanent qu'à une validation proprement dite**.

II Proposition d'une méthode générale pour l'identification de solutions de traitement de déchets industriels spéciaux.

Dans les chapitres précédents, nous avons distingué deux approches différentes pour le traitement interne et le traitement externe des déchets industriels spéciaux. Bien que les outils obtenus soient relativement différents, en raison notamment de la nature des informations utiles à l'utilisateur et des données qui entrent en jeu, il demeure intéressant de comparer les deux approches pour dégager une méthode générale d'identification de solutions de traitement pour les déchets industriels spéciaux. A terme, il s'agit de proposer un outil unique pour les traitements internes et externes.

D'une manière générale, un déchet peut être défini par :

- un ensemble de caractéristiques,
- une identité.

Ce déchet peut être orienté, en tout ou partie, vers différentes destinations :

- l'environnement, on parle alors de rejet éco-compatible,
- une unité fonctionnelle de production ou de consommation, on parle alors de valorisation,
- un centre de stockage.

Chacune de ces destinations est caractérisée par un cahier des charges qui exprime les besoins et les contraintes de la fonction que remplira le déchet. Par rapport à ce cahier des charges, les constituants du déchet jouent un rôle de :

- contaminant,
- réactif,
- élément neutre.

Les stratégies de traitement que l'on peut mettre en oeuvre sont alors :

- la destruction des contaminants,
- la transformation des contaminants en réactifs ou en éléments neutres,
- l'extraction de contaminants en vue de leur stockage ou de leur réutilisation,

Chaque procédé de traitement peut être caractérisé par sa capacité à remplir l'un des objectifs ci-dessus pour des composants donnés. Par exemple, l'incinération permet la destruction des composants organiques, considérés comme contaminants dans le cadre d'un rejet éco-compatible.

A chaque procédé peuvent être associées des fonctions de transfert qui permettent d'exprimer la teneur des flux sortant d'un procédé de traitement en différents composants en fonction de la composition du déchet entrant et des paramètres de fonctionnement.

Ces fonctions peuvent théoriquement être utilisées pour évaluer l'efficacité d'un procédé par rapport aux objectifs cités plus haut.

Par ailleurs, chaque procédé est soumis à des contraintes quant à la nature et la composition des déchets qu'il peut traiter. Ces contraintes sont relatives :

- à la légalité du traitement,
- au fonctionnement du procédé qui peut être perturbé par certains composants,
- à la pérennité de l'installation qui peut être remise en cause par certains composants.

Ces contraintes peuvent théoriquement s'exprimer sous la forme de critères de compatibilité entre un procédé et des déchets.

Il est souvent nécessaire de mettre en oeuvre un enchaînement de procédés pour parvenir à un résultat compatible avec la destination finale du déchet et avec sa complexité.

Il est possible de considérer une filière au sein d'un centre de traitement comme un procédé particulier, pour lequel on peut définir la nature et les caractéristiques des déchets admissibles ainsi que les fonctions de transfert.

Enfin, le choix d'une solution parmi un ensemble de solutions possibles repose sur des critères qui sont propres à chaque producteur mais qu'il doit définir précisément :

- coût,
- niveau de gestion,
- facilité de mise en oeuvre et d'entretien,
- niveau de technicité.

Une méthode plus générale pour identifier et choisir des solutions de traitement pour un déchet pourrait s'énoncer de la manière suivante :

1. **identifier** le déchet, et le caractériser sommairement,
2. **repérer** les destinations vraisemblables pour le déchet :
 - rejet éco-compatible,
 - stockage,
 - débouchés externes, que l'on peut identifier en se référant aux seize filières de valorisation proposées par l'INSA de Lyon,
 - débouchés internes, qui correspondent aux unités fonctionnelles de l'entreprise.
3. pour chacune de ces destinations, établir son cahier des charges en fonction :
 - de la réglementation,
 - des exigences de la fonction de destination, dans le cas d'une valorisation,
4. caractériser le déchet en fonction du cahier des charges des destinations possibles,
5. en déduire le rôle joué par chaque composant vis-à-vis des destinations:
 - contaminant,
 - réactif,
 - élément neutre,

6. en déduire les stratégies de traitement pour chaque composant et chaque destination:
 - extraction, destruction, transformation.
7. pour chaque composant, on peut alors identifier les procédés permettant de mettre en oeuvre les stratégies retenues. Ces procédés dépendent de l'état physique du déchet et de sa nature chimique principale. Une filière de traitement au sein d'un centre collectif donné peut être considéré au même titre qu'un procédé de traitement.
8. établir la liste les critères de compatibilité des procédés,
9. caractériser le déchet en fonction de ces critères,
10. éliminer les procédés incompatibles avec le déchet,
11. évaluer l'efficacité des procédés retenus (en utilisant les fonctions de transfert) et éliminer les procédés inefficaces,
12. définir les enchaînement des procédés permettant d'aboutir à un résultat compatible avec les destinations envisagées,
13. établir un bilan économique des solutions retenues,
14. choisir la solution en fonction de critères que l'on aura défini préalablement.

Cette méthode très générale fait intervenir une grande quantité d'information. En particulier, il faut disposer d'une liste des procédés de traitement associés à leurs finalités (pour l'étape 7) et leurs critères de compatibilité (pour l'étape 8). Il faut aussi connaître les fonctions de transfert des polluants pour évaluer l'efficacité d'une solution de traitement (étape 11). Enfin, il faut pouvoir identifier et caractériser le déchet d'une manière très poussée.

Ceci a deux conséquences importantes :

- il peut être difficile de maîtriser le volume des données nécessaires,
- le caractère exhaustif des solutions auxquelles la méthode aboutit n'est pas garanti car l'information disponible n'est pas nécessairement exhaustive.

Il faut donc admettre que la recherche d'une solution de traitement ne débouche pas nécessairement sur *la solution optimale* mais plutôt sur une *bonne solution* compte tenu des informations disponibles. La qualité des solutions obtenues peut être améliorée en disposant de données supplémentaires. Cependant, un surcroît d'information est une source de complexité et d'erreurs, qui se propagent en terme d'incertitude sur les résultats produits. Un compromis est donc nécessaire entre la qualité des réponses et la complexité de la méthode.

Le fait d'implanter cette méthode sous la forme d'un **outil informatique** permettra d'optimiser l'utilisation des données existantes et de limiter la complexité apparente pour l'utilisateur, même si celle-ci se retrouve intégralement reportée sur le concepteur du système. Par ailleurs, ce type d'outil permet une mise à jour plus facile et plus systématique de l'information. Il devrait donc conduire à une amélioration constante de la qualité des solutions proposées.

Annexes de la première partie

ANNEXE I-1 : Critères de danger établis par la directive européenne 91/156 du 12 décembre 1991 et transposés en droit français par le décret 97-517 du 15 mai 1997

H01	Explosible	Est explosible une substance ou préparation solide, liquide, pâteux ou gélatineux qui, même sans intervention d'oxygène atmosphérique, peut présenter une réaction exothermique avec développement rapide de gaz et qui, dans les conditions d'essai déterminées, détone, déflagre rapidement ou, sous l'effet de la chaleur, explose en cas de confinement partiel.
H02	Comburant	Est comburant une substance ou une préparation qui, au contact d'autres substances, notamment inflammables, présente une réaction fortement exothermique.
H03-A	Extrêmement inflammable	Est extrêmement inflammable une substance ou une préparation dont le point d'éclair est extrêmement bas et le point d'ébullition bas, ainsi qu'une substance ou une préparation gazeuse qui, à température et pression ambiante, sont inflammables à l'air.
H03-B	Facilement inflammable	Est facilement inflammable une substance ou une préparation : - pouvant s'échauffer au point de s'enflammer à l'air à température ambiante sans apport d'énergie, ou - à l'état solide, qui peut s'enflammer facilement par une brève action d'une source d'inflammation et qui continue à brûler ou à se consumer après l'éloignement de la source d'inflammation, ou - à l'état liquide, dont le point d'éclair est très bas, ou - qui, au contact de l'eau ou de l'air humide, produisent des gaz extrêmement inflammables en quantités dangereuses.
H03-C	Inflammable	Est inflammable une substance ou une préparation liquide, dont le point d'éclair est bas.
H04	Irritante	Est irritante une substance ou une préparation non corrosive qui, par contact immédiat, prolongé ou répété avec la peau ou les muqueuses, peut provoquer une réaction inflammatoire.
H05	Nocive	Est nocive une substance ou une préparation qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peut entraîner la mort ou des risques aigus ou chroniques.
H06	Toxique	Est toxique une substance ou une préparation qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée en petite quantité, peut entraîner la mort ou des risques aigus ou chroniques.
H07	Cancérogène	Est cancérogène une substance ou une préparation qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peut produire le cancer ou en augmenter la fréquence.
H08	Corrosive	Est corrosive une substance ou une préparation qui, en contact avec des tissus vivants, peut exercer une action destructrice sur ces derniers.
H09	Infectieuse	Est infectieuse une matière contenant des micro-organismes viables ou leurs toxines, dont on sait ou dont on a de bonnes raisons de croire qu'ils causent la maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants.
H10	Toxiques vis à vis de la reproduction	Est toxique vis à vis de la reproduction une substance ou une préparation qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peut produire ou augmenter la fréquence d'effets indésirables non héréditaires dans la progéniture ou porter atteinte aux fonctions ou capacités reproductives.
H11	Mutagène	Est mutagène une substance ou une préparation qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peut produire des défauts génétiques héréditaires ou en augmenter la fréquence.
H12		Substances ou préparations qui, au contact de l'eau, de l'air ou d'un acide, dégagent un gaz toxique ou très toxique.
H13		Substances et préparations susceptibles lors de leur élimination, de donner naissance, par quelque moyen que ce soit, à une autre substance, par exemple un produit de lixiviation, qui possède l'une des caractéristiques énumérées ci-avant.
H14	Dangereux pour l'environnement	Est dangereuse pour l'environnement une substance ou une préparation qui présente ou peut présenter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement.

ANNEXE I-2 : Classes de qualité des cours d'eau suivant les teneurs en polluants qu'ils contiennent.

	1A/1 B	1B/2	2/3	3/HC	Unité		1A/1 B	1B/2	2/3	3/HC	Unité
Paramètres physico-chimiques						Matières organiques					
Température	20	22	25	30	°C						
pH minimum	6,5	6	6,5	5,5							
pH maximum	8,5	8,5	8,5	9,5		DBO ₅	3	5	10	25	mg/l
MES	30	30	30	70	mg/l	Oxydabilité au permanganate	3	5	8		mg/l
O ₂ dissous	7	5	3	>0	mg/l	DCO	20	25	40	80	mg/l
O ₂ dissous	90	70	50	>0	%	SEC	0,2	0,5	1		mg/l
Matières minérales						Détergents		0,2	0,5		mg/l
NO ₃	44	44	44	100	mg/l	Phénols		0,001	0,05	0,5	mg/l
NTK	1	2	3		mg/l	Paramètres biologiques					
NH ₄	0,1	0,5	2	8	mg/l	Coliformes	5000	5000	50000		N/100ml
Zn	3	5	5		mg/l	E. Coli	2000	2000	20000		N/100ml
F	0,7		1,7		mg/l	Streptocoques fécaux	20	1000	10000		N/100ml
Fe	0,5	1	1,5		mg/l						
Mn	0,1	0,25	0,5		mg/l						
Cu	0,05	0,05	1		mg/l						
As			0,1		mg/l						
Cr			0,05		mg/l						
Pb			0,05		mg/l						
CN			0,01		mg/l						
Se			0,005		mg/l						
Cd			0,0005		mg/l						
Hg					mg/l						

Les classes de qualité correspondent aux définitions suivantes (circulaire interministérielle du 17 mars 1978) :

1A : excellente qualité : tous usages possibles

1B : bonne qualité : traitement de potabilisation simple nécessaire pour l'alimentation en eau potable (AEP).

2 : qualité passable : - loisirs possibles s'ils ne nécessitent que des contacts exceptionnels avec l'eau (baignade interdite).

- traitement de potabilisation poussée nécessaire pour l'AEP

- reproduction aléatoire des poissons

- abreuvement des animaux tolérable

- usages industriels de l'eau possible

3 : qualité médiocre.

- survie aléatoire des poissons

- irrigation tolérable

- utilisation impossible en AEP, abreuvement, baignade, loisirs, eau industrielle sauf refroidissement.

ANNEXE I-3 : Analyse détaillée des sources documentaires sur le traitement des déchets

"Procédés de traitement des déchets industriels solides et liquides" [Ademe 95]

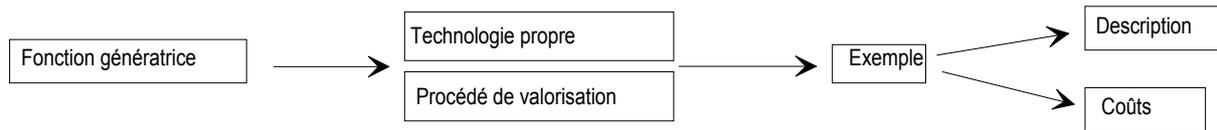
Ce catalogue propose un ensemble de fiches décrivant des procédés de traitement de déchets. Le catalogue contient actuellement 68 fiches procédés. Chaque fiche présente un descriptif succinct du procédé, une liste de fournisseurs, quelques exemples de réalisation et une table recensant les codes A et C des déchets concernés dans la nomenclature française des déchets. Dans ces fiches, seule la nature du déchet exprimée dans la nomenclature est prise en compte pour l'identification d'un procédé, et il faut noter que les contraintes relatives à la composition (concentrations) des déchets ne sont pas mentionnées.



Structure du catalogue des "Procédés de traitement des déchets industriels solides et liquides" de l'Ademe

"Traitements de surface, techniques de réduction de déchets" [CETIM 95]

Ce guide à l'usage unique de l'industrie du traitement de surface propose un certain nombre de solutions de valorisation interne ou de réduction à la source de la quantité de déchets produits. L'approche retenue fait intervenir principalement la fonction de traitement de surface pour identifier les procédés applicables. Les solutions proposées sont essentiellement des solutions internes. Ce guide est particulièrement adapté au contexte des études déchets. Il est structuré en chapitres relatifs aux différents procédés. Chaque chapitre contient une description sommaire du procédé et une série d'exemples détaillés et chiffrés. En tête du livre, un schéma présente les associations fonction-procédé envisagées dans le guide et celles qui seraient envisageables. *Aucune classification des procédés en fonction de la nature des déchets n'est proposée.*

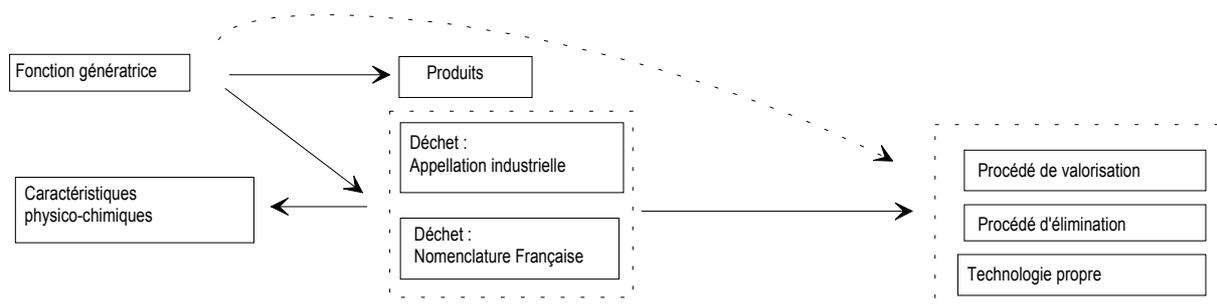


Structure du guide du CETIM "Traitements de surface, techniques de réduction de déchets"

"Guide des technologies propres et des filières de traitement des déchets, industries mécaniques"^[CETIM 95-1].

Ce guide répertorie les différentes catégories de déchets générés par l'industrie de la mécanique et établit une classification des déchets en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques. Pour chaque type de déchet, il fournit les différents procédés de traitement applicables. Il constitue donc un bon exemple d'approche pour l'orientation des déchets vers des filières de traitement. Il faut cependant rappeler qu'il *ne concerne que les déchets de l'industrie mécanique*.

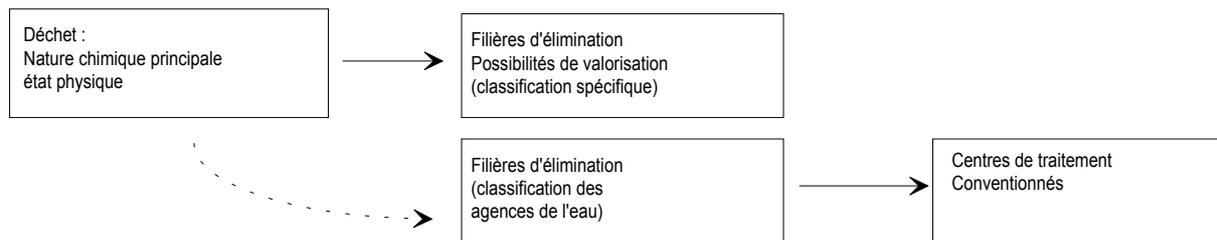
Il est constitué d'un ensemble de fiches concernant les procédés de fabrication, un ensemble de fiches concernant les produits utilisés dans la mécanique et une série de fiches sur les procédés de traitement et les technologies propres. Les fiches procédés permettent d'identifier à la fois les déchets générés et les solutions applicables.



Principe d'identification des solutions de gestion des déchets retenu dans le Guide des technologies propres et des filières de traitement des déchets, industries mécaniques

"Guide pour l'élimination et la valorisation des déchets industriels"^[Min.Env 82]

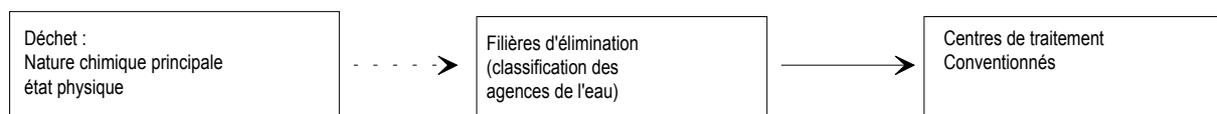
Relativement ancien, il établit le cadre de la gestion des déchets industriels, propose une description des principales filières de traitement et permet d'identifier les filières pour les grandes familles de déchets. Il fournit enfin une liste de centres classés par type de traitement. Il ne permet cependant pas de prendre en compte la composition détaillée du déchet. *Le caractère ancien de ce guide rend aussi son utilisation peu fiable.*



Structure du guide du ministère de l'environnement : "Guide pour l'élimination et la valorisation des déchets industriels"

Documents des agences de l'eau

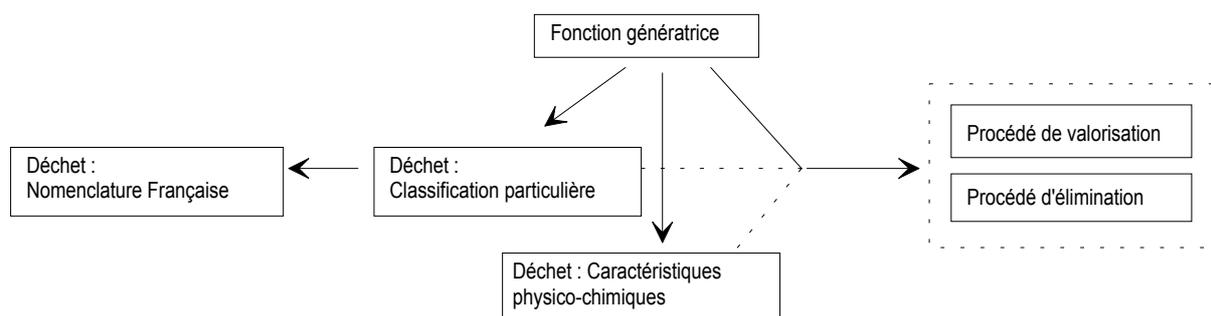
Chaque agence de l'eau publie régulièrement la liste de centres de traitement conventionnés avec, pour chacun d'entre eux, la liste des filières conventionnées. Ces documents peuvent servir en première approche à identifier les centres susceptibles de traiter un déchet à condition de savoir de quelle filière il relève. Plusieurs filières sont désignées par le nom des déchets qu'elles concernent. Il est donc possible, dans certains cas, d'associer directement un déchet à une filière. Cependant, cette approche ne peut pas garantir la pertinence du choix, en particulier dans le cas de déchets complexes. Le nombre de centres et de filières conventionnés par des agences de l'eau est aussi relativement faible au regard du nombre de solutions possibles. *En particulier, les filières de valorisation ne sont pas du tout conventionnées. Il est donc impossible de les identifier par le biais de cette documentation.*



Principe de l'identification des filières à partir des documents des agences de l'eau

"Les déchets des industries de traitement de surface"^[ANRED 88] .

Ce guide constitue une étude des déchets du traitement de surface et des procédés de traitement associés. Une première liste permet d'identifier les déchets générés par les différentes fonctions de traitement de surface. Pour chaque catégorie de déchet, le guide permet d'associer un code dans la nomenclature Française. Il permet d'identifier les procédés à partir de plusieurs critères tels que : la nature du déchet produit, la fonction de traitement de surface génératrice. Les procédés décrits sont aussi bien des procédés de valorisation que d'élimination. Pour chaque catégorie de déchet, le guide fournit la liste des possibilités de traitement en distinguant chaque fonction génératrice. *En revanche, il est peu explicite sur les raisons qui permettent de choisir tel ou tel procédé.* Des exemples de réalisations relevées dans la bibliographie montrent que *la liste des associations fonction-traitement n'est pas exhaustive.*

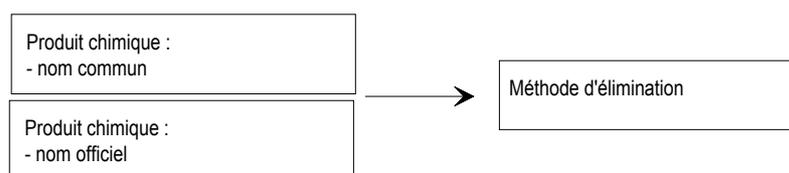


Structure du guide de l'ANRED^[ANRED 88] : Les déchets des industries de traitement de surface.

"Treatment and disposal methods for chemicals"^[UNEP 85]

Cet ouvrage est une compilation des fiches IRPTC (International Register of Potential Toxic Chemicals) du programme environnement des Nations Unies. Ces fiches établissent le lien entre des produits chimiques plus ou moins complexes et des méthodes d'élimination, qui sont essentiellement : la mise en décharge, l'incinération, les traitements physico-chimiques (éventuellement détaillés) et la valorisation. Dans de nombreux cas, il s'agit de citations d'articles scientifiques sans garantie de pertinence de la solution. Dans d'autres cas, les solutions recommandées font référence à un contexte réglementaire local dont les exigences ont été généralisées. Enfin, pour certains produits, une liste de méthodes non recommandées

est citée. Les critères de sélection des méthodes sont donnés en tête de l'ouvrage mais ne sont pas repris localement pour chaque produit chimique. *Les produits sont considérés purs et non en mélange, comme c'est généralement le cas dans un contexte déchet.* Chaque produit est désigné par son nom commun ou commercial ou par son nom dans la nomenclature des produits chimiques (IUPAC).



Structure du catalogue de l'ONU : Treatment and disposal methods for chemicals^[UNEP 85]

"Lamy environnement, les déchets"^[LAMY 95]

Il s'agit d'un ouvrage très complet qui traite à la fois des aspects réglementaires et techniques du traitement des déchets, des problèmes de transport et qui fournit un ensemble d'adresses utiles très complet. Le chapitre concernant le traitement des déchets constitue une référence sur les filières de traitement. Cependant l'approche choisie par les auteurs consiste plus à donner des exemples d'application des filières tout en spécifiant certains critères de sélection pour chaque filière qu'à orienter les déchets vers des filières précises en fonction de leurs caractéristiques. Il faut donc lire l'ensemble du chapitre pour avoir une idée des filières applicables à un déchet. Enfin, *il n'y a pas de moyen de sélectionner les centres de traitement en fonction des caractéristiques des déchets.*

" Comment traiter les déchets et réduire les rejets en milieu industriel " ^[DALIAN 95]

Ce guide traite à la fois des aspects réglementaires et techniques liés au traitement des déchets industriels. Un chapitre entier est consacré aux filières de traitement. Essentiellement descriptif, ce chapitre ne permet pas de faire directement le lien entre des caractéristiques de déchets et une solution de traitement. Sur le plan réglementaire, des résumés permettent d'aborder l'essentiel de l'esprit des lois concernant les déchets. En revanche, il est plus difficile d'identifier précisément les références des textes à consulter et d'en connaître

précisément le contenu. En résumé, *il s'agit d'un document d'introduction au traitement des déchets mais il ne peut servir de référence rapide et fiable pour répondre à la question " où et comment faire traiter mon déchet industriel ? "*

ANNEXE I-4 : Les modèles de décision

Dans l'article consacré à la décision dans l'encyclopédia universalis^[Munier], Bertrand Munier dresse un inventaire des modèles de décision, qui fait apparaître quatre familles (que nous regrouperons ici en deux catégories principales). A chacune peuvent être associés formalismes et des raisonnements propres qui pourront être utilisés pour le développement de systèmes d'aide à la décision. B. Munier situe toutes ces familles de modèles par rapport au modèle canonique de H. Simon^[Simon 80] tacitement reconnu comme la représentation schématique la plus complète du processus de décision. Ce modèle distingue quatre phases :

- *une phase de diagnostic d'un problème et d'exploration-reconnaissance des conditions dans lesquelles il se pose appelée phase d'intelligence ;*
- *une phase de conception et de formulation des voies possibles offertes à la résolution du problème : intitulée phase de conception ;*
- *une phase de choix d'un mode d'action particulier parmi les actions possibles : la phase de sélection ;*
- *et, finalement, une phase d'évaluation de la solution retenue, qui peut déboucher sur une remise en question des phases précédentes du processus.*

Les différents modèles de décision s'insèrent tous dans le modèle canonique de H. Simon dont ils ne conservent dans la plupart des cas que certaines phases.

Les modèles de sélection

Dans ces modèles, seule la phase de sélection est abordée. Il s'agit en effet en général de sélectionner la solution qui maximisera une fonction d'utilité parmi un ensemble de solutions dont on suppose qu'elles sont par ailleurs équivalentes et connues du décideur.

Modèle du décideur en avenir certain. Ce modèle, issu essentiellement de la recherche opérationnelle et du calcul économique, trouve ses applications principales dans le calcul financier et la gestion de production.

Le décideur face à la nature. Les modèles classés dans cette catégorie traitent essentiellement des problèmes d'incertitude et de l'attitude des décideurs face à un avenir incertain. Ils reposent en grande partie sur des modèles probabilistes et constituent en pratique une extension des modèles du décideur en avenir certain.

Le décideur et les autres. Cette dernière catégorie de modèles permet, dans une optique d'optimisation d'une fonction d'utilité, de prendre en compte le caractère probabiliste des comportements des acteurs impliqués dans le résultat de la décision. Il s'agit encore d'une extension des modèles de décideur en avenir certain.

Les modèles de décision organisationnelle.

Ces modèles tentent de rendre mieux compte de la complexité du processus de décision en intégrant de manière plus ou moins complète la réalité des organisations. Ils peuvent être classés en trois catégories :

Les modèles "critiques", à caractère plutôt descriptif, tentent de démontrer que le processus réel de décision, dans l'environnement complexe d'une organisation, peut différer notablement du processus optimal décrit par Simon, en raison notamment de l'absence effective de phase d'intelligence et de la prépondérance de la phase de conception sur la phase de sélection.

Le modèle S.T.I. (pour "Systèmes de Traitement de l'information") est issu directement des théories d'Herbert Simon. Ce modèle établit la distinction entre les décisions "programmables", qui n'impliquent qu'un choix entre des solutions préétablies en fonction de critères pouvant s'exprimer au moyen d'un formalisme mathématique, et les décisions non programmables qui nécessitent une recherche préalable de l'ensemble des solutions possibles en fonction d'un contexte éventuellement complexe. Dans le cas des décisions non programmables auxquelles s'intéresse H. Simon, les phases d'intelligence et de conception deviennent prépondérantes. Alors que, pour les décisions programmables, l'objectif de la phase de sélection était la prise de la décision "la meilleure", il s'agit avant tout, pour les décisions non programmables, de prendre une "bonne" décision. Ceci constitue le principe de "rationalité limitée".

Le modèle S.T.I. trouve son application concrète dans les systèmes interactifs d'aide à la décision (S.I.A.D.) dont le support est essentiellement informatique, et parmi lesquels on retrouve aussi bien des systèmes d'information que des systèmes experts.

Les modèles multicritères constituent un intermédiaire entre le modèle du décideur en avenir certain et le modèle S.T.I. puisqu'ils permettent de prendre en compte une variété de critères représentatifs d'un contexte, et d'établir ainsi l'ensemble des solutions possibles parmi un ensemble de solutions envisageables puis de choisir la solution optimale en fonction d'une approche représentative de la variété des décideurs.

Annexes de la deuxième partie

ANNEXE II-1 : Liste des centres de traitement

Centre	Département	Adresse	Activité	Tel	Fax
AFEMETAL	Loire	Boulevard de la Boissonnette 42110 FEURS	Valorisation matière	04.77.27.41.28	04.77.26.30.49
AFFICUIVRE	Yvelines	1,rue de la Faisanderie 78302 POISSY CEDEX	Valorisation matière	01.39.65.21.03	01.74.59.08
Ampère Industries	Val-d'Oise	B.P. 9177 95005 Cergy pontoise cedex	Récupération électrolytes	(1) 34.32.38.00	(1) 30.37.14.96
ANDRA	Hauts-de-Seine	Agence Nationale Pour la gestion des déchets Radioactifs Route Panorama Robert Schuman 92260 Fontenay aux Roses			
ANTIPOL	Vendée	Allée des treize femmes 85200 FONTENAY LE COMTE	Centre multifilières	02. 51.69.28.10	02.51.69.80.20
ANTIPOLL INDUSTRIES	Isère	Z.I. du Rival 38260 La Côte St André	Régénérateur de solvants	74.20.34.05	74.20.49.93
ATOCHÉM	Alpes-de-Haute-Provence	Usine de Saint-Auban 04600 SAINT-AUBAN	Centre multifilières	92.64.90.85	
BATREC		Postfach 20 3752 WIMMIS		41 (0) 033 57 25 55	41 (0) 033 57 28 76
BERGER	Paris	36, bd de la Bastille 75012 Paris	Récupération électrolytes	(1) 43.07.61.45	(1) 43.40.78.89
BRABANT	Nord	Route Nationale 59152 TRESSIN	Régénérateur de solvants	20.41.28.05	20.64.00.45
BRABANT CHIMIE	Loiret	45490 MIGNERES	Régénérateur de solvants	38.87.81.75	38.87.85.80
C3F	Loire	B.P. 34 42701 FIRMINY CEDEX	Centre multifilières	77.40.36.65	
CAHEB	Réunion	Manapany Les Hauts La Réunion 97429 Petite Ile	Eliminateur d'huiles usagées noires	(19) 262 56 80 82	
CALCIA à Airvault	Deux-Sèvres	BP 07 79600 AIRVAULT	Cimenterie	49.70.81.81	49.70.81.69
CALCIA Beaucaire	Gard	BP 47 30300 Beaucaire	Cimenterie	66.59.14.74	66.59.01.74
CALCIA à Beffes	Cher	18320 BEFFES	Cimenterie	48.76.50.41	48.76.57.75
CALCIA à Couvrot	Marne	BP 07 51301 VITRY LE FRANCOIS	Cimenterie	26.73.63.00	26.73.63.02
CALCIA à Cruas	Ardèche	BP 05 07350 CRUAS	Cimenterie	75.49.54.00	75.49.55.09
Carrières et fours à chaux de Dugny	Meuse	BP 111 55100 DUGNY SUR MEUSE	Cimenterie	29.87.60.00	
CEDEST, Usine d'Heming	Moselle	Rue Cimenterie 57830 HEMING	Cimenterie	87.25.00.03	87.25.03.22
CEDEST, Usine de Dannes	Pas-de-Calais	BP 01 62187 DANNES	Cimenterie	21.99.51.00	21.99.51.01
CEDILOR	Moselle	60 route de Metz 57130 Jouy aux Arches	Centre multifilières	87.38.40.40	87.38.40.06
CERAGUY	Guyane	Route de Stoupan 97300 Matoury	Centre multifilières	(19) 594 35 60 05	
CET d'Argences	Calvados	CGEA ONYX 7-9 rue de la Cotonnière	Centre d'enfouissement	31.73.04.50	31.73.76.04

		ZI Chemin Vert 14052 Caen	technique		
CET de Bellegarde	Gard	France Déchets Av. Jean Jaurès BP 29 78440 Grangeville	Centre d'enfouissement technique	(1) 30.98.11.11	(1) 34.79.65.22
CET de Champteusse-sur-Baconne	Maine-et-Loire	SEDA Chemin des Grittes 49220 Le Lion D'Angers	Centre d'enfouissement technique	41.95.13.26	41.95.13.71
CET de Changé	Mayenne	Laval Services Mézerolles BP 20 53810 CHANGE	Centre d'enfouissement technique	43.56.16.20	43.56.14.68
CET de Guitrancourt	Yvelines	EMTA Zone Portuaire Route du Hazay 78520 LIMAY	Centre d'enfouissement technique	(1) 34.97.25.65	(1) 34.97.25.61
CET de Jeandelaincourt	Meurthe-et-Moselle	France Déchets Av. Jean Jaurès BP 29 78440 Grangeville	Centre d'enfouissement technique	(1) 30.98.11.11	(1) 34.79.65.22
CET de Laimont	Meuse	DECTRA Les Eaux Vannes Chemin de Saint Thierry 51100 Reims	Centre d'enfouissement technique	26.04.82.62	26.04.81.48
CET de Pontailleur-sur-Saône	Côte-d'or	France Déchets Av. Jean Jaurès BP 29 78440 Grangeville	Centre d'enfouissement technique	(1) 30.98.11.11	(1) 34.79.65.22
CET de Saint-Cyr-Des-Gats	Vendée	TOP OUEST Route de Thouars BP 235 79308 BRESSUIRE CEDEX	Centre d'enfouissement technique	49.65.88.88	49.74.10.84
CET de Tourville-la-Rivière	Seine-Maritime	SERAF Tourville La Rivière 76410 CLEON	Centre d'enfouissement technique	35.78.29.00	35.77.40.96
CET de Vaivre	Haute-Saône	ECOSPACE 53, chemin des Essarts Les Torcols 25000 Besançon	Centre d'enfouissement technique	81.50.38.62	81.50.16.22
CET de Villeparisis	Seine-et-Marne	France Déchets Av. Jean Jaurès BP 29 78440 Grangeville	Centre d'enfouissement technique	(1) 30.98.11.11	(1) 34.79.65.22
CHARPAIL (ETS)	Drôme	230 av. des Lauréats 26000 VALENCE	Régénérateur de solvants	75.81.32.00	75.81.22.08
CHIMIREC DUGNY RECUPERATION	Seine-Saint-Denis	5 à 15 rue de l'Extension 93440 DUGNY	Eliminateur d'huiles usagées claires	(1) 48.37.97.65	
Christ		Hauptstrasse 192 BP 130 CH 4147 Aesch Suisse	Récupération électrolytes	41.61.755.81.11	41.61.755.85.54
CHRYSO	Loiret	Zone industrielle 45300 SERMAISES DU LOIRET	Eliminateur d'huiles usagées claires	38.39.72.40	
CHRYSO Eyguières	Bouches-du-Rhône	Chemin du Roudier - BP 4 13430 EYGUIERES	Eliminateur d'huiles usagées	90.59.81.60	

			claires		
CILA (Cie industrielle lubrifiants d'Aulnoye)	Nord	39 rue Voltaire 59620 AULNOYE AYMERIES	Eliminateur d'huiles usagées claires	27.67.30.74	
Ciments d'Origny à Altkirch	Haut-Rhin	1, route Thann BP 21 68131 ALTKIRCH CEDEX	Cimenterie	89.08.31.64	89.40.02.36
Ciments d'Origny à Lumbres	Pas-de-Calais	Rue J. Macaux 62380 Lumbres	Cimenterie	21.38.11.11	21.38.81.78
Ciments d'Origny à Origny Ste Benoite	Aisne	02390 Origny Ste Benoite	Cimenterie	23.09.80.80	23.09.79.88
Ciments d'Origny à Rochefort	Jura	BP 13 39700 Rochefort sur Nenon	Cimenterie	84.70.75.00	84.70.68.07
Ciments Lafarge à Frangey	Yonne	BP 05 89160 Lezennes	Cimenterie	86.54.61.11	86.75.64.95
Ciments Lafarge à la Malle	Bouches-du-Rhône	BP.06 13320 BOUC BEL AIR	Cimenterie	42.65.10.00	42.65.10.10
Ciments Lafarge à Lexos	Tarn-et-Garonne	82330 Lexos	Cimenterie	63.65.43.46	63.65.43.38
CIMENTS LAFARGE à Port-La-Nouvelle	Aude	B.P.26 11110 PORT-LA-NOUVELLE	Cimenterie	68.40.41.31	
Ciments Lafarge à Saint-Vigor d'Ymonville	Seine-Maritime	Route Industrielle 76 430 Saint Vigor d'Ymonville	Cimenterie	32.79.20.00	32.79.20.11
Ciments Lafarge à St Pierre La Cour	Mayenne	Route Bréal 53410 ST PIERRE LA COUR	Cimenterie	43.66.44.44	43.66.44.12
Ciments Lafarge à Val d'Azergues	Rhône	BP 01 69380 LOZANNE	Cimenterie	72.54.11.60	78.43.16.86
Ciments Lafarge au Havre	Seine-Maritime	Usine du Havre -StVigor BP 1369 76065 Le Havre Cedex	Cimenterie	32.79.20.00	32.79.20.11
Ciments Lafarge au Teil	Ardèche	BP.05 07400 Le Teil	Cimenterie	75.49.50.00	75.49.13.60
Ciments Vicat à Crechy	Allier	Cimenterie de Crechy 03150 Le Bourg	Cimenterie	70.46.83.50	70.43.54.95
Ciments Vicat à Montalieu-Vercieu	Isère	38390 Montalieu-Vercieu	Cimenterie	74.33.58.33	74.53.58.90
Ciments Vicat à Vendin	Pas-de-Calais	62880 Vendin le Vieil	Cimenterie	21.69.34.00	21.69.35.90
Ciments Vicat à Xeulilly	Meurthe-et-Moselle	54990 Xeulilly	Cimenterie	83.47.03.86	83.47.10.18
COHU la Mede	Bouches-du-Rhône	ZI des entreprises BP 35 - La Mede 13163 Chateauneuf les Martigues	Centre multifilières	42.81.02.02	42.81.08.70
COHU Lillebone	Seine-Maritime	ZI de Port Jérôme 76170 LILLEBONNE	Centre multifilières	35.38.02.39	35.31.79.71
Compagnie Française ECOHUILE	Seine-Maritime	Avenue de Port Jérôme ZI 76170 LILLEBONNE	Régénérateur d'huiles usagées noires	35.39.58.47	
CREDIA	Ille-et-Vilaine	ZA de Mi-Voie 5 rue Henri Polles 35136 Saint Jacques de la Lande	Traitement des déchets de laboratoire	99.35.38.35	99.35.38.00

DAFFOS BAUDASSE (Ets)	et Rhône	61 rue Decomberousse 69100 Villeurbanne	Eliminateur d'huiles usagées claires	72.37.51.60	
DECHAMBOUX (SA)	Haute-Savoie	490 av. Jean-Jaurès BP 03 74801 LA ROCHE SUR FORON Cedex	Régénérateur de solvants	50.03.21.71	50.25.81.31
DECO FRANCE	Jura	ZAC Les Toupes 39570 Montmorot	Eliminateur d'huiles usagées claires	84.47.18.14	
DUCLOS Environnement	Bouches-du- Rhône	86, route Nationale 13240 Septemes les Vallons	Valorisation matière	04.91.96.30.00	04.96.25.27
ELECTROLYSE	Gironde	Chemin de Bernichou ZI de Maucoulet 33360 Latresne	Centre multifilières	56.20.74.40	
ELF ATOCHEM	Alpes-de- Haute- Provence	Château-Arnoux 04600 SAINT AUBAN	Centre multifilières	92.33.75.00	92.33.75.61
EURODIEUZE Industrie	Moselle	Parc d'activités 57260 DIEUZE	Valorisation matière	03.87.86.81.77	03.87.86.81.65
FIME	Val-d'Oise	ZI Rue de Belloy 95560 Montsoul	Récupération électrolytes	(1) 34.69.95.10	(1) 34.69.90.28
GAST	Oise	Zone industrielle 60870 BRENOUILLE	Valorisation matière	02.44.72.40.98	02.44.72.41.00
GEREP	Seine-et- Marne	GEREP Z.I. de Mitry-Compans Rue jacquard 77290 MITRY MORY	Centre multifilières	(1)64.27.16.97	(1) 64.27.43.35
LABO Service	Rhône	Route de la centrale 69700 GIVORS	Traitement des déchets de laboratoire	72.24.01.13	78.07.93.12
LAMBIOTTE	Nièvre	58700 PREMERY	Régénérateur de solvants	86.37.72.00	86.68.00.55
LANGLOIS CHIMIE	Ille-et- Vilaine	3, rue de Buhotière ZI Haie des Cognets 35136 Saint Jacques de la Lande	Régénérateur de solvants	99.29.46.00	99.30.52.12
Mercure Boys Manufacture (M.B.M.)	Sarthe	Atelier de Voivre Les Le Mans ZA des Randonnais 72210 Voivre Les Le Mans	Valorisation matière	02.43.88.52.15	
METACHIMIE	Oise	ZI Route de Nanteuil 60440 BREGY	Régénérateur de solvants	44.94.00.00	44.94.01.81
METAL BLANC	Ardennes	rue Pasteur 08230 Bourg Fidèle	Valorisation matière	03.24.53.67.00	03.24.54.25.45
METALEUROP	Rhône	Avenue Beaujeu Arnas BP 451 69400 Villefranche sur Saone	Valorisation matière	04.74.02.30.70	04.74.62.37.53
OSD	Loire	41 rue des Cordes 42704 Firminy	Centre multifilières	77.61.85.91	77.61.85.47
PETROLES SHELL (Sté)	Seine- Maritime	Raffinerie de Petit Couronne - BP1 76650 PETIT COURONNE	Eliminateur d'huiles usagées claires	35.67.46.00	
PIERI	Saône-et- Loire	Saillenard 71580 SAGY	Eliminateur d'huiles usagées claires	85.74.10.45	

PLATRET	Haute-Savoie	7, rue du Commerce 74100 Annemasse	Régénérateur de solvants	50.92.15.57	50.37.04.63
PPM CHIMIE	Indre-et-Loire	La Pièce de Marais 37500 LA ROCHE CLERMAULT	Régénérateur de solvants	47.95.81.40	47.95.81.50
PPM CHIMIE	Val-d'Oise	ZI Chemin Vert 95340 PERSAN	Régénérateur de solvants	(1) 34.70.25.10	(1) 39.37.76.41
PRODUITS CHIMIQUES D'AUVERGNE	Puy-de-Dôme	8, rue de l'Industrie BP 74 63802 COURNON Cedex	Régénérateur de solvants	73.84.89.67	73.69.84.47
PROSERPOL	Yvelines	B.P. 27 78184 StQuentin en yvelines Cedex	Récupération électrolytes	(1) 30.45.90.20	(1) 30.45.90.50
RAFFINERIES IMPERATOR	Nord	Rue de Breuze 59780 Baisieux	Eliminateur d'huiles usagées claires	03.20.61.77.77	
RECUPYL	Isère	Rue de la Métallurgie 38420 DOMENE	Valorisation matière	04.76.77.43.97	
RECYCLAGE INDUSTRIEL et CHIMIQUE	Yvelines	Cour de la Gare 78650 BEYNES	Eliminateur d'huiles usagées claires	34.89.10.17	
RECYMET		29 H Chemin du côteau 1123 ACLENS VD (Suisse)		41 (0) 22 362 17 77	41 (0) 22 362 16 69
REGESOLVE S.A.	Nord	445 Bd Gambetta 59976 TOURCOING Cedex	Régénérateur de solvants	20.26.92.10	20.27.56.12
Rhône Poulenc Les Roches	Isère	B.P. 66/67 38 150 ROUSSILLON	Centre multifilières	74.31.30.00	74.29.39.91
Rhône Poulenc Pont de claix (TERIS)	Isère	BP 17 38 800 Pont de Claix	Centre multifilières	(1) 47.68.12.34	(1) 47.68.22.30
RVA	Meuse	Lieu-dit "La Vignette" 55120 Les Islettes	Valorisation matière	26.60.60.63	26.60.96.99
S.N. FRADIN (SNF)	Yvelines	163 Av. du Maréchal Foch 78130 LES MUREAUX	Régénérateur de solvants	(1) 34.74.17.10	(1) 30.99.42.65
SALBERT RECYCLAGES	Haut-Rhin	17 A - Grand Rombach 68160 St CROIX AUX MINES	Régénérateur de solvants	89.58.74.19	89.58.58.93
SARA	Martinique	Californie Le Lamentin BP 436 - La Réunion 97296 Le Lamentin Cedex 02	Centre multifilières	(19) 596.50.18.94	
SARP Industries Limay	Yvelines	Zone portuaire de Limay porcheville 78520 LIMAY	Centre multifilières	30.97.25.00	34.77.22.09
SARPAP	Dordogne	Z.I. Marais Ouest 24680 GARDONNE	Régénérateur de solvants	53.63.81.00	53.27.03.45
SCOREDI	Eure	4 Chemin du Marais 27610 ROMILLY SUR ANDELLE	Régénérateur de solvants	32.49.79.87	32.49.02.43
SCORI Unité COMBSY	Hérault	Usine Lafarge Route de Balaruc 34110 Frontignan	Cimenterie	67.48.75.61	67.48.05.69
SCORI, Unité COMBSU	Pas-de-Calais	Site des Ciments Français BP 15 62620 Barlin	Cimenterie	21.64.00.05	21.65.74.75
SDS	Bouches-du-Rhône	BP 4 ZI de Valdonne 13124 PEYPIN	Régénérateur de solvants	42.04.63.62	42.72.41.62

SEDIBEX Sandouville	à Seine-Maritime	SEDIBEX route Industrielle 76430 Saint Romain de Colbosc	Centre multifilières	35.55.00.10	
SIAP	Gironde	Rue de l'industrie BP 08 33530 BASSENS	Centre multifilières	56.31.72.22	56.31.65.78
SIKA	Gard	Route de Montfrin Thesiers 30390 ARAMON	Eliminateur d'huiles usagées claires	66.57.57.94	
SILAB	Yvelines	Zone portuaire de Limay - Porcheville Route du Hazay 78520 LIMAY	Traitement des déchets de laboratoire	(1) 30.92.33.22	(1) 30.98.03.80
SIRA	Isère	rue Frédéric Mistral 38670 CHASSE sur RHONE	Centre multifilières	72.49.25.25	72.49.25.01
SITREM. S.A.	Seine-Saint-Denis	64-66 rue de Paris 93130 Noisy le Sec	Centre multifilières	(1)48.44.72.94	(1) 48.91.38.71
SMI	Bouches-du-Rhône	2, rue Ste Julie 13002 MARSEILLE	Régénérateur de solvants	91.90.88.50	91.90.63.48
SNAM	Aveyron	avenue Jean Jaurès 12110 VIVIER	Valorisation matière	05.65.43.77.30	05.65.43.03.95
SNAM	Isère	35 rue de la Garenne 38070 St Quentin Fallavier	Valorisation matière	04.74.94.59.85	04.74.13.18
SOBEGI	Pyrénées-Atlantiques	SOBEGI BP.5 64150 Mourenx	Centre multifilières	59.60.84.20	
Société des Chaux de Bigorre	Hautes-Pyrénées	65100 Ger	Cimenterie	62.94.40.28	62.94.13.83
Société des Huiles LEMAHIEU	Nord	26, rue Gay Lussac ZI - BP 45 59147 Gondecourt	Régénérateur d'huiles usagées noires	20.90.15.36	
SOLAMAT-MEREX Fos	Bouches-du-Rhône	Route Quai Minéralier 13270 Fos Sur Mer	Centre multifilières	42.11.31.40	42.05.05.90
SOLAMAT-MEREX Rognac	Gironde	Montée des Pins - BP 2 1 3340 Rognac	Centre multifilières	42.87.72.10	42.87.12.62
SOREDI	Haute-Garonne	SOREDI Usine de la Janais 31131 Chartres de Bretagne	Centre multifilières		
SOREGE (SA)	Jura	Le Honry BP 05 39190 BEAUFORT	Régénérateur de solvants	84.87.19.50	84.25.06.71
SOTREFI	Doubs	48 rue des Tonneliers Z.I. Technoland 25460 ETUPES	Centre multifilières	81.95.53.46	81.94.38.76
SOTREMO	Sarthe	rue Louis Breguet Z.I. Sud 72100 Le Mans	Centre multifilières	43.50.22.90	43.50.22.99
SOTRENOR	Pas-de-Calais	Route d'Harnes 62170 Courrières	Centre multifilières	21.49.57.57	21.20.50.00
SOVALEG PROUVY	à Nord	SOVALEG rue de Liège 59121 PROUVY	Centre multifilières	27.87.34.33	
SPEICHIM	Haute-Loire	SPEICHIM B.P. 41 ,Rue du Reclus 43000 BRIOUDE	Centre multifilières	71.50.13.76	
SPEICHIM	Pyrénées-	Site SOBEGI	Régénérateur de	59.92.79.80	59.92.79.79

PROCESSING Mourenx	Atlantiques	ZI 64150 MOURENX	solvants		
SPEICHIM PROCESSING St- Vulbas	Ain	Allée Bois des Terres 01150 SAINT VULBAS	Régénérateur de solvants	74.46.22.20	74.46.22.21
SPUR	Loire	SI Molina La Chazotte 42350 LA TALAUDIÈRE	Éliminateur d'huiles usagées claires	77.33.12.58	77.25.39.48
STCM	Haute- Garonne	165 bis av. des États Unis 31000 TOULOUSE	Valorisation matière	05.61.13.57.17	05.61.13.57.15
STCM	Loiret	11 rue de Pithiviers 45480 BAZOCHES LES GALERANDES	Valorisation matière	02.38.34.52.50	02.38.34.52.54
TECHNIQUE BETON	Seine-et- Marne	Z.I. avenue Albert Einstein 77550 Moisy Cramayel	Éliminateur d'huiles usagées claires	64.13.30.00	
TECHNOS	Seine-et- Marne	ZI- Le Moulin à Vent 77290 Mitry-Mory	Centre multifilières	(1) 64.27.16.96	(1) 64.27.95.46
TIRU Ivry	Paris	TIRU- Usine d'Ivry, 43 rue Bruneseau 75013 Paris	Centre multifilières	46.70.11.83	
TREDI Hombourg	Haut-Rhin	B.P. 24 68490 OTTHARSHEIM	Centre multifilières	89.83.21.60	89.26.17.57
TREDI Saint- Vulbas	Ain	TREDI B.P. 55 ZI de la plaine de l'ain 01150 LAGNIEU	Centre multifilières	74.46.22.00	74.61.16.82
TREDI Salaise	Isère	Centre TREDI ZI Portuaire Sablons, Salaise sur Sanne 38150 Roussillon	Centre multifilières	74.86.10.83	74.86.16.97
TREDI Strasbourg	Bas-Rhin	74 quai Jacoutot 67000 STRASBOURG	Centre multifilières	88.45.53.53	88.61.16.82
Usine d'incinération de Douchy	Nord	Lavergris 59282 DOUCHY LES MINES	UIOM	27.31.01.58	
VALLIER (SA)	Haute-Savoie	646 Av. d'Anterne 74970 MARIGNIER	Régénérateur de solvants	50.34.59.00	50.34.89.47
VALRECOISE	Oise	43 rue Ernest Mercier 60130 Saint Just en Chaussée	Éliminateur d'huiles usagées claires	44.78.50.13	
VIDAM TRD	Somme	T.R.D. 40 rue du 8 mai 1945 80380 VILLERS BRETONNEUX	Centre multifilières	22.48.38.47	22.48.16.94

ANNEXE II-2 : Filières de traitement

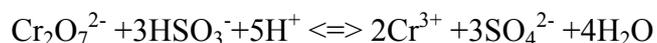
1) Filières d'élimination

1.1) Traitements physico-chimiques

Les traitements physico-chimiques concernent différentes catégories de déchets essentiellement **minéraux solides** ou **liquides aqueux**, et font appel à des procédés très divers. L'objectif de ces filières est la mise aux normes des déchets aqueux avant leur rejet, par destruction de la fraction organique du déchet et par extraction de la pollution minérale, ou la mise au norme des déchets solides avant leur enfouissement en site de classe I.

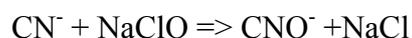
Les **filières physico-chimiques minérales en voie aqueuse** (déchromatation, décyanuration, neutralisation, précipitation métallique) font appel essentiellement à des réactions chimiques d'oxydation, réduction, précipitation, neutralisation.

La **déchromatation** a pour objectif la réduction du chrome hexavalent, difficile à précipiter, en chrome trivalent. Le chrome trivalent est ensuite précipité avec les autres ions métalliques présents par ajustement de pH. La réaction de réduction du chrome par les ions hydrogénosulfites (bisulfites) peut s'écrire, dans le cas de l'ion $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$:

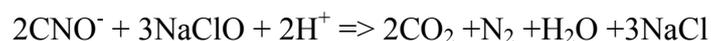


Pour que la réaction ait lieu normalement, il est nécessaire de maintenir le pH en dessous de 2,5. D'autres réactifs peuvent être utilisés, comme le dioxyde de soufre ou le fer divalent. Cependant, les centres collectifs ayant recours à la déchromatation utilisent généralement le bisulfite de sodium.

La **décyanuration** vise la destruction des cyanures par oxydation. Elle est le plus souvent pratiquée à l'aide d'hypochlorite de sodium suivant une réaction conduisant à la formation de cyanates :



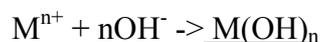
Les cyanates peuvent être oxydés en azote et en gaz carbonique en acidifiant la solution obtenue en présence d'un excès d'hypochlorite de sodium :



Très efficace pour les cyanures libres, l'hypochlorite de sodium se révèle moins actif pour les cyanures complexés avec des métaux. Dans ce cas on pourra avoir recours à l'eau oxygénée, l'ozone, l'acide de Caro en présence éventuelle d'un catalyseur comme le cuivre. Il est aussi possible de traiter les cyanures par voie électrochimique.

Enfin, l'oxydation peut aussi viser la matière organique présente dans des déchets aqueux : graisses, huiles, solvants...

La **précipitation métallique** permet d'extraire les métaux des solutions aqueuses. On utilise généralement une base forte (NaOH, par exemple) pour élever le pH et obtenir un précipité d'hydroxyde métallique suivant la réaction :



On peut aussi faire précipiter des sulfures métalliques, moins solubles que les hydroxydes. Le réactif utilisé est alors un sulfure ou un hydrogénosulfure de sodium. L'utilisation d'hydroxyde de calcium peut permettre d'éliminer aussi des anions tels que F^- , PO_4^- .

La **neutralisation**, qui vise à amener le pH à un niveau acceptable pour le rejet de l'effluent ($6,5 < \text{pH} < 8$), est le plus souvent confondue avec la précipitation métallique. Cependant, pour certains métaux, comme le cadmium, la précipitation a lieu en milieu fortement basique. La neutralisation constitue alors un traitement complémentaire avant rejet.

Les boues générées par ces traitements sont en général filtrées après une décantation précédée éventuellement par une floculation. Une étape de **déshydratation** mécanique ou thermique peut venir compléter le traitement en vue d'obtenir un déchet compatible avec la mise en décharge.

Les déchets minéraux solides susceptibles d'être stockés en CET de classe I doivent répondre à des critères d'acceptation portant sur leur capacité à relarguer des polluants dans les lixiviats. Lorsque celle-ci est trop élevée, on procède à une **stabilisation** par l'intermédiaire de liants hydrauliques ou organiques ou par vitrification.

Les filières physico-chimiques organiques concernent les déchets aqueux fortement chargés en matière organique, tels que certains fluides de coupe. Il s'agit de séparer la fraction organique de la phase aqueuse. La première est traitée par incinération alors que la seconde subit les traitements réservés aux déchets aqueux. La séparation de phases peut être réalisée par cassage acide, par centrifugation ou par ultrafiltration.

Code filière	Intitulé	Cible	Principe
01	Déchromatation	Boues ou liquides aqueux, contenant du chrome hexavalent	Réduction du chrome par les bisulfites
02	Décyanuration	Boues ou liquides aqueux, contenant du cyanure	Oxydation des cyanures par les ions hypochlorites ou l'acide de Caro
04	Neutralisation des solutions acides	Liquides ou boues acides	Ajustement du pH à l'aide d'une base minérale
04 bis	Précipitation métallique	Liquides ou boues contenant des métaux en solution	Précipitation des métaux provoquée par la neutralisation, en général suivie par des étapes de floculation, décantation, filtration...
05	Neutralisation des solutions alcalines	Liquides ou boues alcalines	Ajustement du pH à l'aide d'un acide minéral
07	Déshydratation mécanique	Boues et solides à fraction aqueuse importante	Filtration, centrifugation...
08	Solidification, stabilisation	Solides minéraux	Fabrication d'un ciment à base de déchet et de liant hydraulique. autres techniques : vitrification, liants organiques...
10	Séparation de phase d'émulsions	Mélange de phases aqueuses et organiques en émulsion ou assimilables à une émulsion	Cassage acide Centrifugation Ultrafiltration
12	Traitement spécifique d'eaux résiduaires	Déchets aqueux à forte charge organique + polluants particuliers	Enchaînement de divers procédés physico-chimiques, oxydation des polluants organiques (phénols...)
DMS	Décontamination de déchets minéraux souillés de matière organique	Déchets minéraux solides (terres souillées) souillés par une phase organique	Stripage, décontamination à la vapeur...
TSS	Traitement des sels solides par mise en solution et détoxication	Déchets minéraux solides fortement solubles	Lessivage de la fraction soluble du déchet, traitement de la solution obtenue

1.2) Filières thermiques

Une filière thermique a pour objectif la destruction de la part organique d'un déchet par oxydation à haute température. Elle vise donc **tout déchet présentant une fraction de matière organique plus ou moins importante, quelque soit l'état physique de ce déchet.**

Le phénomène principal recherché est l'oxydation de la matière organique en CO₂ et H₂O.

Néanmoins, lorsqu'il y a présence dans le déchet d'éléments tels que le chlore, l'azote ou le soufre il se produit un dégagement d'acide chlorhydrique, d'oxydes d'azote ou de soufre. Ces composés se retrouvent dans les fumées et sont indésirables. Un des critères de classification des filières d'incinération sera donc leur capacité à empêcher le passage de ces polluants dans l'atmosphère. On parlera de la capacité de neutralisation des fumées.

Les métaux sont également affectés par l'incinération, puisqu'ils peuvent s'oxyder ou être vaporisés. Ils se retrouvent alors dans les fumées et dans les cendres, à l'état d'oxydes ou précipités sur les poussières. La capacité de rétention des poussières pourrait donc être un critère de classification des filières d'incinération. Elle est en général assimilée à la capacité de neutralisation des fumées. On peut aussi considérer la capacité d'une filière d'incinération à empêcher le passage des métaux dans les fumées au niveau même de la combustion. C'est ce que permet l'incinération en cimenterie, par exemple.

Enfin, certains composés organiques particuliers peuvent ne subir qu'une oxydation partielle qui se traduit par le rejet dans les fumées d'une fraction organique imbrûlée ayant parfois acquis des propriétés toxiques. C'est le cas lors de la combustion des PCB ou des PCT qui émet des dioxines, par exemple.

La solution à ce dernier problème tient dans la maîtrise des conditions d'incinération, essentiellement la température, la durée, la quantité d'air introduit et les turbulences. Ces paramètres, et surtout la température, seront aussi des critères de classification des filières de traitement.

code	intitulé	Cible	Principe
25	Incinération classique des déchets industriels	tout déchet contenant une fraction organique, non halogéné, non soufré, faiblement chargé en métaux lourds.	combustion de la fraction organique à température moyenne (~900°C) Pas de traitement particulier des fumées.
21	Incinération en installation munie d'un dispositif de neutralisation des fumées de déchets halogénés	tout déchet contenant une fraction organique, halogéné, ou soufré.	combustion de la fraction organique à température moyenne. Epuración des fumées (poussières et acides des gaz)
28	Incinération en cimenteries	tout déchet contenant une fraction organique, peut être légèrement halogéné, ou soufré. Peut présenter une charge importante en métaux lourds	combustion de la fraction organique à température élevée sur une durée importante. Neutralisation des fumées et piègeage des polluants par la charge minérale (klinker).
201	Incinération des déchets contenant des PCB/PCT ou chlorophénols en unité spécialisée	tout déchet contenant des PCB/PCT et chlorophénols	Combustion à haute température (>1200°C) de la fraction organique du déchet, y compris des PCB/PCT ou chlorophénols. Epuración poussée des fumées.
23	Incinération de déchets liquides à sujétions particulières	déchets contenant une fraction organique non susceptibles d'être incinérés par d'autres techniques	
22	Evapo-incinération	Tout mélange de phases aqueuse et organique non halogéné, non soufré, sans métaux lourds.	Evaporation de la phase aqueuse, incinération séparée des deux phases.
IHU	Incinération d'huile usagée non régénérables	huiles usagées non régénérables	

1.3) Stockage

L'enfouissement technique vise des déchets minéraux solides ainsi que quelques rares déchets organiques tels que les boues de peinture et les résines échangeuses d'ions. La nature et les caractéristiques des déchets admissibles en décharge de classe I sont donnés par les arrêtés du 18 décembre 1992. L'enfouissement en site de classe II est réservé aux déchets banals, donc *a priori* inadaptée à notre contexte. Cependant, certains déchets industriels peuvent être orientés dans l'une ou l'autre des classes de décharges en fonction de leur composition. C'est le cas, par exemple des sables de fonderie.

Code filière	Intitulé	Cible	Principe
--------------	----------	-------	----------

50	Mise en décharge de classe I	Déchets minéraux solides admissibles en CET de classe I	Enfouissement en site imperméable
60	Mise en décharge de classe II	Déchets banals et assimilables	Enfouissement en site semi-imperméable
41	Enfouissement profond des déchets toxiques	Déchets toxiques solides non admissibles en CET de classe I	Enfouissement en mine de sel

1.5) Autres filières d'élimination

Deux filières particulières concernent les déchets en petits conditionnements. Pour ces déchets, ce sont plus les techniques de déconditionnement qui sont déterminantes, que les techniques de traitement proprement dites. Une fois déconditionnés, les déchets sont regroupés par catégories et orientés vers les centres appropriés pour y subir un traitement physico-chimique ou thermique.

code filière	intitulé	Cible	Principe
43	Tri, reconditionnement et traitement des déchets de laboratoire en petits conditionnement (<25 litres)	déchets de laboratoire en petit conditionnement	Déconditionnement et traitement par différents procédés physico-chimiques ou regroupement en vue d'une incinération.
44	Produits toxiques divers en petits conditionnements (<100 litres)	produits toxiques divers en petits conditionnements	Déconditionnement et traitement par différents procédés physico-chimiques ou regroupement en vue d'une incinération.

2) Filières de valorisation

Les filières de valorisation sont variées. On peut distinguer les régénérations qui visent à obtenir un produit ayant les mêmes caractéristiques que le produit neuf, les valorisation matière, qui visent à obtenir une matière première à partir d'un déchet complexe ou à utiliser le déchet comme matière première, et la valorisation énergétique. Chacune de ces filières concerne généralement une catégorie de déchets très spécifiques, sauf pour la valorisation thermique.

La **régénération de résines échangeuses d'ions** consiste à faire passer un acide fort ou une base forte sur la résine afin de substituer les cations ou anions fixés par les ions H^+ ou OH^- . L'éluat obtenu est fortement chargé en polluants (métaux lourds ou anions suivant le type de

résine), il peut être soit dépollué par des techniques classiques de traitements physico-chimiques, soit utilisé pour la récupération de métaux précieux.

La **régénération d'huiles usagées claires** implique une séparation de la phase huileuse des impuretés solides ou liquides. L'origine des huiles claires rend l'opération de régénération relativement simple et peu coûteuse, ce qui explique le grand nombre de centres proposant ce type de traitement.

Au contraire, la **régénération des huiles noires** nécessite le recours à une séparation chimique des constituants par l'intermédiaire d'acide sulfurique, ce qui donne naissance à des déchets difficiles à éliminer : les goudrons sulfuriques. Actuellement, seuls deux centres proposent encore cette filière qui n'est plus compétitive par rapport à la valorisation thermique en cimenterie.

La **régénération de solvants** fait appel à différents procédés suivant la nature des solvants considérés (aromatiques, aliphatiques, chlorés, cétones, fluorés, esters, etc...). Il peut s'agir de rectification, de distillation simple, d'entraînement à la vapeur. C'est l'écart entre les températures d'ébullition des différents composants du mélange qui constitue le déchet qui détermine le procédé que l'on utilise. Si en première approche on peut considérer une filière unique de régénération de solvants, il sera judicieux d'évoluer progressivement vers des filières distinctes en fonction des procédés utilisés et de la nature des solvants régénérés.

La **régénération de bains chromiques**^[Lachevre 95] est pratiquée par le centre TREDI à Hombourg. Il s'agit d'extraire les ions chromates par extraction liquide/liquide. En régénérant le liquide extracteur on obtient une solution chromique concentrée.

La **régénération de sables de fonderie** fait intervenir des opérations de broyage, criblage, séparation magnétique, en vue de séparer le sable du liant organique ou minéral qui l'entoure. Le sable ainsi régénéré peut être réutilisé pour la confection de moules.

La **récupération de métaux dissous pour valorisation** concerne des déchets aqueux contenant des métaux en solution. Il s'agit ici d'utiliser des techniques performantes d'électrolyse telles que l'E3P (électrolyse à électrode poreuse percolée pulsée) pour récupérer

le métal contenu dans un électrolyte usagé afin de le commercialiser sous forme solide. Cette technique se heurte essentiellement à des contraintes économiques, en raison des bas rendements observés aux faibles concentrations. Seuls certains métaux sont donc concernés (Ni, Au, Ag, par exemple).

La **valorisation matière en cimenterie** concerne des déchets minéraux solides qui, par calcination peuvent former un des composants du ciment : silice, alumine, oxydes de fer ou de calcium. Il s'agit donc de boues carbonatées, de certaines boues d'hydroxydes, de boues d'aciéries, de laitiers, etc... Ces déchets sont incorporés au klinker avec lequel ils sont transformés en ciment par calcination.

La **valorisation matière métallique** concerne les déchets à forte teneur en éléments métalliques. Elle est généralement réalisée par fusion au four à arc. En raison du coût de cette opération, elle ne concerne que certains métaux suffisamment précieux comme le nickel, le molybdène, le cobalt, le vanadium...

Pour les déchets organiques, la société Rhône-Poulenc propose deux filières originales de **valorisation des déchets halogénés et soufrés** par récupération des acides formés au cours de l'incinération. Une incinération simple est complétée par un lavage des gaz. Les eaux de lavage des gaz sont ensuite traitées afin de récupérer les acides.

Les **emballages souillés** font l'objet de traitements différents suivant qu'ils sont métalliques ou organiques. Les fûts métalliques peuvent être lavés, sur un site disposant d'une station de détoxification pour le traitement des eaux de lavage, puis recyclés en aciérie ou réutilisés, suivant leur état. Pour les emballages plastiques, il est plus courant d'avoir recours à l'incinération.

Les **déchets mercuriels** (piles, thermomètres,...) peuvent être traités par distillation afin de récupérer le mercure.

Il existe encore certainement de nombreuses filières de valorisation, que nous n'avons pas recensé. Dans l'ensemble, on peut constater que la plupart de ces filières concernent des

catégorie de déchets bien particulières désignées souvent en fonction de leur fonction initiale plutôt que de leurs caractéristiques.

code filière	intitulé	Cible	Principe
06	Régénération de résines échangeuses d'ions	Résines échangeuses d'ion usagées	circulation d'une solution acide ou basique concentrée et substitution des anions ou cations piégés par la résine par des ions H^+ ou OH^-
RHC	Régénération huiles usagées claires	Huiles usagées claires	Séparation des polluants minéraux de la phase huileuse par filtration, centrifugation...
RHU	Régénération d'huiles usagées noires	Huiles usagées noires	Séparation des polluants minéraux de la phase huileuse par cassage acide, filtration, centrifugation...
RSU	Régénération de solvants usagés	Solvants usagés	Régénération par distillation simple ou fractionnée.
RMD	Récupération de métal dissout pour valorisation	Déchets aqueux contenant des métaux en solution	Extraction par électrolyse des métaux en solution
RSF	Régénération de sables de fonderie	Sables de fonderie	Broyage, criblage, classification mécanique et magnétique.
VMC	Valorisation matière en cimenterie	Déchets minéraux solides(carbonates de calcium, boues d'hydroxydes métalliques (de fer, principalement) oxydes métalliques.	Incorporation de déchets minéraux à la matière première du ciment (klinker)
VMM	Valorisation matières minérales et métalliques	Déchets minéraux solides (catalyseurs usés, boues d'hydroxydes, ...)	Récupération de la matière première minérale ou métallique en vue d'une valorisation matière
PAC	Production d'acide chlorhydrique à partir de déchets chlorés	Déchets organiques chlorés.	Incinération du déchet chloré, lavage des fumées, récupération, concentration et épuration de l'acide contenu dans les eaux de lavage.
PAS	Production d'acide sulfurique à partir de déchets organiques soufrés	Déchets organiques soufrés.	Incinération du déchet soufré, lavage des fumées, récupération, concentration et épuration de l'acide contenu dans les eaux de lavage.
VTC	Valorisation thermique en cimenterie	Déchets organiques à fort PCI	Incinération et production d'énergie de substitution dans une cimenterie
TEP	Traitement des emballages pollués	Emballages pollués	Lavage, reconditionnement, traitement des eaux de lavage
THg	Traitement spécifique des déchets mercuriels	Piles au mercure, autres déchets contenant du mercure	Evaporation sous vide du mercure et recondensation

ANNEXE II-3 : Sources réglementaires nationales, seuils de rejet

Les rejets des installations classées sont régis par l'arrêté du 1er mars 1993. Les installations de traitement de déchets sont cependant exclues du champ d'application de ce texte. Elles font l'objet de contraintes spécifiques au plan national ou au plan local à travers les arrêtés de classement. Dans ce qui suit, nous allons d'abord recenser les normes de rejet relatives aux filières de traitement. Nous examinerons ensuite brièvement les exigences de l'arrêté du 1er mars 1993, qui nous permettront de d'établir les critères qui permettent de justifier un traitement et, ensuite de compléter la liste des paramètres à prendre en compte dans l'analyse de l'efficacité d'une filière.

Enfouissement technique

Les arrêtés du 18 février 1994 modifiant les arrêtés du 18 décembre 1992 relatifs au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés définissent les normes de rejet suivantes pour les lixiviats:

- $5,5 < \text{pH} < 8,5$ ou $9,5$ s'il y a neutralisation chimique ;
- Hydrocarbures $< 10 \text{ mg/l}$ (norme NFT 90.203)
- DCO $< 125 \text{ mg/l}$
- Phénols $< 0,1 \text{ mg/l}$
- Métaux lourds totaux $< 15 \text{ mg/l}$ dont :
 - $\text{Cr}^{\text{VI}} < 0,1 \text{ mg/l}$
 - $\text{Cd} < 0,2 \text{ mg/l}$
 - $\text{Pb} < 0,5 \text{ mg/l}$
- $\text{CN}^- \text{ libres} < 0,1 \text{ mg/l}$
- $\text{Hg} < 0,05 \text{ mg/l}$
- $\text{As} < 0,1 \text{ mg/l}$
- Fluorures $< 50 \text{ mg/l}$

Les effluents gazeux ne font pas l'objet de prescriptions particulières.

Incinération

L'arrêté du 10 octobre 1996 est la transposition de la directive 94/67/CE du conseil du 16 décembre 1994 (JOCE 31 dec 1994, n° L365, p.34) relative à l'incinération des déchets dangereux. Il établit des valeurs limites d'émission à respecter lors des opérations d'incinération. Ces valeurs ne seront définitives qu'à partir du 1er juillet 2000 pour les installations existantes. Les seuils de rejet prévus portent sur :

- le monoxyde de carbone (moyenne journalière $< 50 \text{ mg/m}^3$ de gaz)
- les dioxines et furanes (moyenne sur 6 heures inférieure à $0,1 \text{ ng/m}^3$)
- poussières totales (moyenne journalière $< 10 \text{ mg/m}^3$)
- substances organiques à l'état de gaz ou de vapeur, exprimées en carbone organique total (moyenne journalière $< 10 \text{ mg/m}^3$)
- chlorure d'hydrogène (HCl) (moyenne journalière $< 10 \text{ mg/m}^3$)
- fluorure d'hydrogène (HF) (moyenne journalière $< 1 \text{ mg/m}^3$)
- dioxyde de soufre (SO_2) (moyenne journalière $< 50 \text{ mg/m}^3$)
- cadmium et ses composés (exprimé en Cd) ($< 0,05 \text{ mg/m}^3$)
- thallium et ses composés ($< 0,05 \text{ mg/m}^3$)
- mercure et ses composés ($< 0,05 \text{ mg/m}^3$)
- Total de métaux suivants $< 0,5 \text{ mg/m}^3$: antimoine et ses composés, arsenic et ses composés, plomb et ses composés, chrome et ses composés, cobalt et ses composés, cuivre et ses composés, manganèse et ses composés, nickel et ses composés, vanadium et ses composés, étain et ses composés.
- Total des métaux lourds précédents plus le zinc $< 5 \text{ mg/m}^3$

Installations de transit, regroupement et prétraitement de déchets industriels

Ce type d'installations correspond à tous les centres de traitement, de prétraitement, de regroupement ou de transit autres que les centres d'enfouissement technique et que les usines d'incinération. Il s'agit, en pratique de toutes les installations désignées par la rubrique 167 de la nomenclature des installations classées. La circulaire du 30 août 1985 établit un certain nombre de prescriptions en vue de lutter contre la pollution des eaux et de l'air générée par ce

type d'installations. Elle définit en particulier la liste des paramètres sur lesquels doivent porter les normes de rejets des effluents aqueux. Il s'agit de :

- la température ;
- le pH ;
- la DCO ;
- les hydrocarbures ;
- les phénols ;
- les substances extractibles au chloroforme ;
- les cyanures ;
- les métaux ;

La circulaire ne définit cependant pas les valeurs limites de rejet, qui doivent être précisées dans l'arrêté de classement en fonction des technologies disponibles au moment de l'autorisation.

Seuls les cas mentionnés ci-dessus font l'objet de prescriptions générales. Au niveau local, chaque unité de traitement se voit imposer des normes de rejet particulières qui dépendent du contexte technique et environnemental de l'installation. Nous examinerons plus loin la possibilité de prendre en compte ces valeurs locales pour en tirer une valeur concernant la filière elle même.

arrêté du 1^{er} mars 1993, normes de rejet des autres installations classées

Bien que l'arrêté du 1^{er} mars 1993 ne soit pas directement applicable aux installations de traitement de déchets, il est important de s'intéresser aux exigences de ce texte. En effet, le traitement d'un déchet aqueux ne sera nécessaire que s'il ne répond pas aux critères de rejet sans traitement dans l'environnement. D'autre part, en absence de recommandations particulières sur un type de polluant donné pour une filière de traitement, il peut être intéressant de se référer aux exigences générales.

L'arrêté du 1er mars 1993 identifie de nombreux cas particuliers qu'il serait trop long de citer, nous nous contenterons donc des prescriptions générales concernant les rejets atmosphériques et aqueux.

Pollution de l'air

	condition sur le débit	concentration limite
Poussières totales	> 1kg/h	50 mg/m ³
	< 1kg/h	100 mg/m ³
Oxyde de soufre (exprimé en SO ₂)	au delà de 25 kg/h	300 mg/m ³
Oxydes d'azote	au delà de 25 kg/h	500 mg/m ³
HCl et autres composés inorganiques du chlore	au delà de 1kg/h	50 mg/m ³
Fluor et composés inorganiques du fluor	au delà de 500 g/h	5 mg/m ³
Composés organiques	au delà de 2kg/h	150 mg/m ³
Composés organiques pariculiers	au delà de 0,1 kg/h	20 mg/m ³
Cd + Hg + Tl	au delà de 1 g/h	0,2 mg/m ³
As + Se + Te	au delà de 5g/h	1 mg/m ³
Sb + Cr + Co +Cu +Sn +Mn +Ni +Pb + V + Zn	au delà de 25 g/h	5 mg/m ³
Phosphne, phosgène	au delà de 10 g/h	1 mg/m ³
HCN, HBr, HCl, H ₂ S	au delà de 50 g/h	5 mg/m ³
Ammoniac	au delà de 100 g/h	50 mg/m ³
Amiante	si plus de 100 kg d'amiante mis en oeuvre par an	0,1 mg/m ³
Autres fibres	si plus de 100 kg mis en oeuvre par an	1 mg/m ³

Pollution des eaux

Température		30 °C
pH	sans traitement de neutralisation chimique (précipitation des métaux)	5,5 <pH<9,5
	avec traitement de neutralisation	5,5 <pH< 9,5
modification de couleur sur le milieu récepteur		100 mg Pt/l
Matières en suspension totales (MEST)	flux maximal autorisé (FMJA) < 15 kg/j	100 mg/l
	flux maximal autorisé > 15 kg/j	35 mg/l
DBO ₅	FMJA < 30 kg/j	100 mg/l
	FMJA > 30 kg/j	30 mg/l
DCO	FMJA < 100 kg/j	300 mg/l
	FMJA > 100 kg/j	125 mg/l
Azote (organique, amoniacal et oxydé)	FMJA > 50 kg/j	30 mg/l
Phosphore total	FMJA > 15 kg/j	10 mg/l
Indice phénols	FMJA > 3 g/j	0,3 mg/l
Phénols	FMJA > 1 g/j	0,1 mg/l
Chrome hexavalent	FMJA > 1g/j	0,1 mg/l
Cyanures	FMJA > 1 g/j	0,1 mg/l
Arsenic et composés	FMJA > 1g/j	0,1 mg/l
Plomb et composés	FMJA > 5 g/j	0,5 mg/l
Cuivre et composés	FMJA > 5 g/j	0,5 mg/l

Chrome et composés	FMJA > 5 g/j	0,5 mg/l
Nickel et composés	FMJA > 5 g/j	0,5 mg/l
Zinc et composés	FMJA > 20 g/j	2 mg/l
Manganèse et composés	FMJA > 10 g/j	1 mg/l
Etain et composés	FMJA > 20 g/j	2 mg/l
Fer, aluminium et composés (Fe +Al)	FMJA > 20 g/j	5 mg/l
Composés organiques du chlore (en AOX)	FMJA > 30 g/j	5 mg/l
Hydrocarbures totaux	FMJA > 100 g/j	10 mg/l
Fluor et composés	FMJA > 150 g/j	15 mg/l
Substances toxiques, bioaccumulables ou nocives pour l'environnement : annexe V.a.	FMJA > 0,5 g/j	0,05 mg/l
annexe V.b.	FMJA > 1g/j	1,5 mg/l
annexe V.c.1	FMJA > 10 g/j	8 mg/l
annexe V.c.2	FMJA > 10 g/j	fixé par arrêté

Certaines activités, parmi les quelles le traitement de surface dont nous traiterons dans la troisième partie de ce mémoire, sont soumises à des normes de rejet spécifiques.

ANNEXE II-4 : Sources réglementaires nationales : nature et caractéristiques des déchets admissibles

En plus des normes de rejet, les sources réglementaires fixent certaines caractéristiques des déchets admissibles dans les unités de traitement. La filière enfouissement technique fait l'objet de prescriptions très précises au niveau national alors que pour les autres filières seuls quelques paramètres sont visés. Enfin, des textes réglementent l'élimination de déchets spécifiques.

Enfouissement technique

Les arrêtés du 18 décembre 1992 modifiés par ceux du 18 février 1994 définissent les déchets qui peuvent être admis en décharge de classe I à partir de deux critères : leur nature et leurs caractéristiques.

Nature des déchets admissibles :

Il s'agit avant tout de déchets minéraux solides. Une liste vient préciser les catégories de déchets visés. Cette liste (tableau 1) identifie les déchets essentiellement en référence au procédé générateur.

Ces déchets se répartissent en trois catégories:

A: déchets qui doivent être stabilisés ;

B: déchets qui doivent être stabilisés à compter du 30 mars 1998.

C: déchets admis au cas par cas.

Résidus de l'incinération:

- suies et cendres non volantes,
- poussières, fines et cendres volantes,
- déchets de neutralisation des gaz ou des eaux de lavage des gaz;

Résidus de la métallurgie:

- poussières de fabrication d'aciers alliés,
- poussières issues de procédés de fabrication de métaux
- scories et crasses de seconde fusion de métaux par bains de sels,
- boues d'usinage contenant moins de 5% d'hydrocarbures.

Résidus de forages résultant de l'emploi de fluides de forage à base d'hydrocarbures.

Déchets minéraux de traitement chimique:

- oxydes métalliques résiduaire solides hors alcalins,
- sels métalliques résiduaire solides hors alcalins,
- sels minéraux résiduaire solides non cyanurés,
- catalyseurs usés.

Les déchets industriels spéciaux ultimes de la catégorie B pouvant être admis sont les suivants:

Résidus de traitement d'effluents industriels et d'eaux industrielles, de déchets ou de sols pollués notamment:

- boues d'épuration d'effluents industriels et bains de traitement de surface (boues d'hydroxydes notamment) à faibles teneurs en chrome hexavalent et en cyanures,
- résidus de stations d'épuration d'eaux industrielles ;
- résines échangeuses d'ions saturées ;
- résidus de traitement de sols pollués.

Résidus de l'incinération :

- mâchefers résultant de l'incinération des déchets industriels.

Résidus de peinture:

- déchets de peinture polymérisés ou solides, de résines de vernis ou de polymères sans phase liquide (à faible teneur en solvants).

Résidus de la métallurgie:

- scories, crasses issues de procédés de fabrication de métaux à l'exception des scories et crasses de seconde fusion de métaux par bains de sels.
- sables de fonderie n'ayant pas subi la coulée.

Résidus d'amiante:

- résidus d'amiante conditionnés conformément à l'arrêté du 31 août 1989, relatif aux industries fabriquant des produits à base d'amiante.
- autres résidus d'amiante.

Résidus de recyclage d'accumulateurs et de batteries :

Réfractaires et autres matériaux minéraux usés et souillés :

- matériaux souillés au cours du processus de fabrication ;
- matières premières, rebuts de fabrication et matériels divers souillés non recyclables.

Tableau AII-4-1 : catégories de déchets admissibles en CET de classe I

Les désignations des déchets ci-dessus correspondent à quelques nuances près à des rubriques de la nomenclature française des déchets (avis du 16 mai 1985), sans que les arrêtés y fassent toutefois référence explicitement. A chaque catégorie de déchets ci-dessus est associé un ensemble de critères d'admission portant sur la composition des lixiviats. La démarche qui conduit à l'enfouissement technique d'un déchet passe donc par son identification dans la liste des déchets admissibles, l'identification du critère d'exclusion associé, la caractérisation du déchet en fonction des paramètres du critère et l'évaluation de sa compatibilité avec le critère d'exclusion.

Déchets interdits :

Est interdit sur l'installation de stockage:

- tout déchet visé aux articles 7 et 8 dont les caractéristiques ne répondent pas aux critères d'admission correspondants ainsi que tout autre déchet dont la charge polluante ou les inconvénients peuvent être réduits par un traitement préalable à un coût économiquement acceptable;
- tout déchet radioactif provenant du démantèlement des installations nucléaires de base;
- tout déchet présentant l'une au moins des caractéristiques suivantes:
 - explosif, } au sens de la directive
 - inflammable, } 79/831/CEE du 18/9/79
 - radioactif,
 - non pelletable,
 - pulvérulent non préalablement conditionné en vue de prévenir une dispersion,
 - fermentescible,
 - contaminé selon la réglementation sanitaire.

Caractéristiques des déchets admissibles

Pour chacune des catégories de déchets mentionnée ci-dessus, les arrêtés de 1994 fixent les limites de composition du déchet et des lixiviats qui peuvent en être extraits lors d'un test de lixiviation.

Critères généraux d'admission:

$4 < \text{pH} < 13$;

siccité $> 35 \%$ dans un délai de deux ans;

fraction soluble $< 10 \%$ sur déchet sec

Le producteur de déchets doit faire la preuve du caractère minéral et non fermentescible de ses déchets. A défaut, une analyse du COT est effectuée. Le résultat doit être $< 10 \text{ g/kg}$.

Critères supplémentaires d'admission des déchets minéraux solides en centre d'enfouissement technique

Déchets stabilisés (dont catégorie A):	DCO < 2000 mg/kg, phénols < 100 mg/kg, Cr6+ < 5 mg/kg, Cr < 50 mg/kg, Pb < 50 mg/kg, Zn < 250 mg/kg, Cd < 25 mg/kg, CN < 5 mg/kg, Ni < 50 mg/kg, As < 5 mg/kg, Hg < 5 mg/kg,		Hg < 10 mg/kg		Cd < 20 mg/kg Ni < 50 mg/kg As < 10 mg/kg
Déchets de la catégories B :		Résidus de peinture:	fraction soluble < 10 % siccité > 40 %	Déchets de peinture polymérisés ou solides, de résines de vernis ou de polymères sans phase liquide (à faible teneur en solvants):	COT < 7500 mg/kg, Hydrocarbures totaux < 5 % sur déchet phénols < 1000 mg/kg, Cr6+ < 30 mg/kg, Cr < 100 mg/kg, Pb < 2000 mg kg, Zn < 1000 mg kg, CN < 50 mg/kg, Cd < 100 mg/kg, As < 30 mg/kg, Sn < 500 mg/kg, fluorures < 5000 mg/kg, Hg < 30 mg/kg, Co < 100 mg/kg, Cu < 500 mg/kg, Mb < 500 mg/kg, Ni < 250 mg/kg, Pour les terres souillées: PCB < 50 mg/kg sur déchet brut, HAP < 260 mg/kg AOX < 80 mg/kg.
Résidus de traitement d'effluents ou de déchets: Boues déshydratées d'épuration d'effluents et bains de traitement de surface (boues d'hydroxydes notamment) à faibles teneurs en Cr6+ et en CN ; résidus de stations d'épuration d'eaux industrielles ; résidus de traitement des sols pollués.	Siccité > 25 % fraction soluble < 30 % COT < 5 000 mg/kg, Cr6+ < 15 mg/kg, Cr < 100 mg/kg, Pb < 100 mg/kg, Zn < 1000 mg/kg, Cd < 50 mg/kg, CN < 10 mg/kg, Ni < 250 mg/kg.	Résidus de la métallurgie:	fraction soluble < 35 % COT < 7500 mg kg Pb < 1000 mg/kg, Cd < 100 mg/kg, Zn < 500 mg/kg, Ni < 100 mg/kg, Hg < 10 mg/kg, Cr < 100 mg/kg, As < 500 mg/kg,	Sables de fonderie n'ayant pas subi la coulée:	siccité > 30 % fraction soluble < 10 % COT < 3500 mg/kg 50 mg/kg < phénols < 1000 mg/kg
Résines échangeuses d'ions saturées:	Siccité > 30 % COT < 3500 mg/kg fraction soluble < 10 % CN < 50 mg/kg, Cr6+ < 5 mg/kg.	Résidus d'amiante: résidus autres que ceux de déflocage	siccité > 30% fraction soluble < 10 % COT < 3500 mg kg, phénols < 1000 mg/kg, CN < 50 mg/kg.	Réfractaires et autres matériaux minéraux usés :	COT < 5000 mg/kg Fraction soluble < 20 % Pb < 500 mg/kg Cr < 100 mg/kg Cd < 100 mg/kg Zn < 1000 mg/kg Cu < 500 mg/kg
Résidus de l'incinération: Mâchefers:	fraction soluble < 10 % COT < 3500 mg/kg, Cr6+ < 20 mg kg, Cr < 100 mg/kg, Pb < 100 mg/kg, Zn < 500 mg kg, Cd < 50 mg/kg, CN < 10 mg/kg, Ni < 100 mg/kg, As < 30 mg/kg,	Résidus de recyclage d'accumulateurs et de batteries :	COT < 3500 mg/kg fraction soluble < 10 % Pb < 500 mg/kg Zn < 100 mg/kg		

Incinération

Aucun des textes relatifs à l'**incinération** déjà cités (directive européenne 94/67/CE et arrêté du 10 octobre 1996) ne définit de liste explicite de déchets admissibles. L'arrêté du 10 octobre 1996 établit cependant qu'il est nécessaire de définir dans l'arrêté préfectoral d'autorisation la nature et les caractéristiques des déchets admissibles en tenant compte des capacités de l'installation. Dans le cas particulier de la **coincinération en cimenterie**, les caractéristiques limites des déchets admissibles sont définies par l'arrêté du 10 octobre 1996 :

- 10 mg/kg de mercure (Hg) ;
- 100 mg/kg pour la somme des teneurs en cadmium (Cd), mercure (Hg), Thallium (Tl);
- 2500 mg/kg pour la somme des teneurs en antimoine (Sb), arsenic (As), plomb (Pb), chrome (Cr), cobalt (Co), nickel (Ni), vanadium (V), étain (Sn), tellure (Te), sélénium (Se).

Autres traitements

Les textes réglementaires concernant les autres modes de traitement ne sont pas explicites sur la nature des déchets admissibles dans les différentes filières.

Déchets particuliers

Un certain nombre de déchets font l'objet de prescriptions réglementaires particulières quant aux filières d'élimination. Il s'agit en particulier :

- des déchets contenant des chlorobiphényles (PCB) et chloroterphényles (PCT) dont l'incinération nécessite une température particulièrement élevée (1200 °C).
- des huiles usagées ;
- des sables de fonderies ;
- des piles et accumulateurs usagés ;

Ces déchets sont définis en fonction de leur nature, de leur composition, de leur fonction initiale ou de leur provenance.

Les directives européennes et les arrêtés français concernant les déchets contenant des PCB ou des PCT¹ fixent une teneur maximale de 0,005 % en masse soit 50 mg/kg au delà de laquelle il est impératif de traiter le déchet dans une unité spécialisée. La loi n'indique cependant pas précisément les techniques qui doivent être employées pour le traitement, mais plutôt les critères d'une décontamination effective. Actuellement, seules deux unités sont autorisées à traiter des déchets contenant des PCB ou des PCT, et l'on considère le traitement de ce type de déchets comme une filière à part entière.

La collecte et le traitement des huiles usagées sont encadrés au niveau Français comme au niveau européen. Les huiles usées ne peuvent être collectées et éliminées que par des entreprises bénéficiant d'un agrément spécifique. Les seules filières admissibles sont, lorsque la qualité des huiles le permet, la régénération et l'utilisation industrielle comme combustible (loi n° 80-531 du 15 juillet 1980 sur les économies d'énergie et l'utilisation de la chaleur). Il existe donc une filière spécifique de régénération des huiles. La valorisation thermique est, elle, principalement réalisée par voie cimentière. Ces dispositions réglementaires obligent à distinguer les huiles des autres déchets organiques à caractéristiques équivalentes. La loi n'identifie pas explicitement les critères permettant de décider de la faisabilité de la régénération ou de la valorisation thermique. Ceux-ci dépendent des critères locaux des centres de valorisation, eux mêmes définis en fonction des normes de rejet (locales ou telles que définies par la directive CEE 75/439 du 16 juillet 1975) et du matériel utilisé localement.

L'élimination des sables de fonderie est réglementée au niveau français par l'arrêté du 16 juillet 1991 sur l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse, précisé par la circulaire n°91-59 du 16 juillet 1991. L'arrêté n'impose pas une filière particulière de traitement. Il fixe seulement le type de décharge dans lequel peuvent être admis les sables ainsi que les modes de valorisation possibles en fonction des caractéristiques du déchet. Trois types de décharge sont envisageables : décharge de classe I, décharge de classe II et décharge spécifique pour sables de fonderie à très faibles teneurs en phénols. Les sables sont classés en fonction de leur teneur supposée en phénols. On distingue donc :

¹ Directive CEE du 6 avril 1976 sur l'élimination des polychlorobiphényles et polychloroterphényles, directive CEE du 1^{er} octobre 1985, circulaire du 30 septembre 1985 sur les installations utilisant ou mettant en oeuvre des polychlorobiphényles, circulaire n° 12-86 du 11 mars 1986,

- les sables ne contenant que des liants organiques naturels ou des liants minéraux ;
- les sables contenant des liants organiques de synthèse brûlés au cours de leur utilisation ;
- les sables imbrûlés contenant des liants organiques de synthèse.

Seule la dernière catégorie est susceptible de contenir une part importante de phénol. La teneur effective en phénols est alors utilisée comme critère pour déterminer la destination finale du déchet.

		teneur en phénols ²	Décharge	Valorisation autorisée
sables liés à l'aide de liants minéraux naturels			pas de prescription	pas de prescription
Sables liés par des liants organiques de synthèse	Sables brûlés non retenus au tamisage	< 1 mg/kg	décharge spécifique ou classe 2	Utilisation en remblai (sans interaction avec les eaux souterraines) et autres procédés ci-dessous
Sables liés par des liants organiques de synthèse	Sables brûlés non retenus au tamisage	< 5 mg/kg	décharge spécifique ou classe 2	fabrication de produits à base de liants hydrauliques et autres procédés ci-dessous
Sables liés par des liants organiques de synthèse	Sables brûlés non retenus au tamisage	> 5 mg/kg	classe 2	tout procédé susceptible de détruire les phénols et dûment autorisé.
Sables liés par des liants organiques de synthèse	Sables non brûlés ou retenus au tamisage	< 50 mg/kg	classe 2	tout procédé susceptible de détruire les phénols et dûment autorisé.
Sables liés par des liants organiques de synthèse	Sables non brûlés ou retenus au tamisage	> 50 mg/kg	classe 1	tout procédé susceptible de détruire les phénols et dûment autorisé.

Tableau AII-4-2 : catégories de sables de fonderie et filières d'élimination ou de valorisation autorisées.

La directive CEE du 18 mars 1991 concernant les piles et accumulateurs contenant certaines matières dangereuses fixe les objectifs suivants aux états membres de la communauté européenne : réduire la teneur en métaux lourds des piles et accumulateurs, promouvoir la mise sur le marché de piles et accumulateurs contenant des quantités plus faibles de matières polluantes ou dangereuses, promouvoir la recherche sur la réduction de matières dangereuses dans les piles et accumulateurs, réduire la quantité de piles potentiellement polluantes ou dangereuses dans les ordures ménagères, et les éliminer séparément. Les piles potentiellement polluantes sont :

- les piles ou accumulateurs contenant :

- plus de 25 mg de mercure par élément à l'exception des piles alcalines au manganèse ;
- plus de 0,025 % en poids de cadmium ;
- plus de 0,4% en poids de plomb.
- les piles alcalines au manganèse contenant plus de 0,25 % en poids de mercure.

L'objectif de traitement séparé a entraîné la mise en place de filières spécifiques aux piles et accumulateurs, soit en vue de leur valorisation, soit en vue de leur élimination.

² mesurée sur le lixiviat et rapporté à 1kg de matière sèche

ANNEXE II-5 : Exemples de seuils réglementaires de rejet en sortie de centre de traitement de déchets^[R.E.C.O.R.D. 94]

Filières physico-chimiques minérales

SIRA

Paramètre	Concentration maximale autorisée	Flux en kg	
		Journalier	Annuel
pH	6,5<pH<8,5		
Température	<30°C		
MES	50 mg/l	20	3200
COT	300 mg/l	120	19000
Hydrocarbures	20 mg/l	8	1300
Indice-phénol	0,5 mg/l	0,2	32
Cyanures libres	0,1 mg/l	0,04	7
Cr ^{VI}	0,1 mg/l	0,04	7
Sels métalliques des métaux : Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Sn	20 mg/l	8	1300
Azote amoniacal	30 mg/l	12	1900

SARP Industries à LIMAY (ensemble des rejets aqueux)

Paramètre	Concentration maximale autorisée	Flux en kg	
		sur 2 h	sur 24 h
pH	6,5<pH<8,5		
MES	50 mg/l	2,5	25
DBO5	800 mg/l	40	400
DCO	20 000 mg/l	100	1000
COT	300 mg/l	120	19000
Azote total	40 mg/l	2	20
Hydrocarbures extractibles à l'hexane	5 mg/l	0,25	2,5
Hydrocarbures totaux	20 mg/l	1	10
Phénols ou Indice-phénol	0,5 mg/l	0,025	0,25
Cyanures totaux	0,1 mg/l	0,005	0,05
Cr ^{VI}	0,1 mg/l	0,005	0,05
Fe	5 mg/l	0,25	2,5
Cu	2 mg/l	0,1	1
Ni	1 mg/l	0,05	0,5
Zn	1 mg/l	0,05	0,5
Cd	0,1 mg/l	0,005	0,05
Pb	1 mg/l	0,05	0,5
Al	2 mg/l	0,1	1
Sn	2 mg/l	0,1	1
Cr total	1 mg/l	0,05	0,5
Total Métaux (Fe, Cu, Ni, Zn, Cd, Al, Cr)	10 mg/l	0,5	7,5
Mn	3 mg/l	0,15	1,5
Hg	0,05 mg/l	0,0025	0,05
As	0,1 mg/l	0,005	0,05

filière physico-chimique organique**SIRA**

Paramètre	Concentration maximale autorisée	Flux en kg/j
pH	6 < pH < 8	
Température	< 30°C	
MES	300 mg/l	30
COT	500 mg/l	50
Hydrocarbures	20 mg/l	2
Indice-phénol	0,5 mg/l	0,05
Cyanures libres	0,1 mg/l	0,01
Cr ^{VI}	0,1 mg/l	0,01
Sels métalliques des métaux : Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Sn	20 mg/l	2

Rejets gazeux :**SIRA, Evapo-incinération**

Paramètres	Concentrations maximales en mg/Nm ³	Flux en kg/jour
Poussières totales	30	7,6
NOx	250	63
CO	50	12,6
HCl	50	12,6
HF	2	0,5
Oxydes de soufre (en SO ₂)	50	12,6
Composés organiques (en carbone total)	20	5
Métaux lourds: Pb + Cr + Cu + Mn	5	13
Ni + As	1	0,3
Cd + Hg	0,2	0,05

SARP Industries Evapo-incinération

Le contrôle des rejets atmosphériques issus de l'unité d'évapo-incinération de l'usine de SARP Industries à Limay est réalisé sur les condensats des gaz. Les normes sont donc exprimées en g/l et sont de ce fait difficiles à comparer avec celles d'autres installations.

Paramètres	Concentrations maximales
pH	5,5 < pH < 8,5
DCO	1000 mg/l
Indice-phénol	0,5 mg/l
Hydrocarbures extractibles à l'hexane	5 mg/l
Hydrocarbures totaux	20 mg/l

Incinération

SARP Industries Limay

	Concentrations maximales en mg/Nm ³	Flux en kg/jour
poussières:	<150 mg/Nm ³	<1,5 kg/tonne de déchet traité
métaux lourds	<5 mg/Nm ³	< 0,06 kg/tonne de déchet traité
élément chlore(sous forme de Cl ₂ et HCl)	<100 mg/Nm ³	<1,00 kg/tonne de déchet traité
Vitesse d'émission	<8 m/sec.	

SOLAMAT à Rognac

- Contrôles des émissions à l'atmosphère en marche normale:

	Concentrations maximales en mg/Nm ³	Flux en kg/jour
Poussières totales	30	36
Métaux lourds	5	6
Elément chlore (sous forme Cl ₂ et HCl)	50	60
autres éléments halogénés (F, Br, I)	50	
SO ₂	30	360

-Contrôles de qualité des eaux et des rejets :

paramètres	Concentrations limites tolérées en mg/l	Flux journalier (y compris les eaux pluviales) à calculer sur 30 m ³ et Fréquence des mesures
pH	6<pH<9	
MES	30 (sur 24 h)	900 g
DBOs	30 (sur 24 h)	900 g (tous les 5 j)
DCO	90 (sur 24 h)	2700 g journalier)
Hydrocarbures totaux	20 (sur 24 h)	600 g
Phénols	0,2 (sur 24 h)	6 g
Ensemble des métaux lourds	5 mg/l	150 g (tous les 15 j)

TREDI à Salaise sur Sanne

Nature des polluants	Concentrations maximales autorisées en mg/Nm ³
Poussières totales	150 mg/Nm ³ (en continu)
HCl	100 mg/Nm ³ (en continu)
CO	100 mg/Nm ³ (en continu)
Hydrocarbures gazeux (en équivalent CH ₄)	10 ppm (en volume)
Métaux lourds totaux particuliers (Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, Sn, Ag, Co)	5 mg/Nm ³ (mensuel)

Hg + Cd particuliers et gazeux	0,3 mg/Nm ³ (mensuel)
--------------------------------	----------------------------------

Rejets aqueux

Nature des polluants et norme de mesure	Concentrations moyennes sur 2h, admissibles (en mg/l)	Flux de pollution maximum (en kg/jour)
pH (NF T 90.008)	entre 5,5 et 8,5	
T° (NFT 90.100)	300 C	
MEST (NFT 90.105)	30 mg/l	54 kg/j
DCO (NFT 90.101)	120 mg/l	216 kg/j
Hydrocarbures (NFT 90.203)	20 mg/l	36 kg/j
Phénols	0,3 mg/l	5,4 kg/j
Zinc	10 mg/l	18 kg/j
Cuivre	2 mg/l	3,6 kg/j
CrIII	3 mg/l	5,4 kg/
CrVI	0,1 mg/l	1,8 kg/j
Cadmium	0,1 mg/l	1,8 kg/j
Hg	0,1 mg/l	1,8 kg/j

ANNEXE II-6 : Information concernant les déchets admissibles contenue dans les arrêtés de classement des centres

L'information concernant les déchets admissibles est composée de:

- la désignation des déchets admissibles suivant la nomenclature française ou un vocabulaire propre au centre de traitement,
- les critères supplémentaires d'admission.

Nous avons regroupé des exemples de ces données dans le tableau suivant, qui nous permet de constater la variété des modes de désignation des déchets employés et des critères d'admission.

Tous les arrêtés font référence à la teneur des déchets en PCB qui est limitée à 50 mg/kg sauf, naturellement, pour l'unique centre habilité à traiter ce type de déchets. Nous n'avons donc pas reporté cette information dans le tableau ci-dessous.

Cimenteries	Désignation des déchets admissibles	Critères supplémentaires d'admission
1	NOMENCLATURE	liquide solides PE>0°C ou pas de limite suivant déchet S<1,25 à 4,39% Cl organique <2% Pb +Zn+ Sn+ Cr <5000 mg/kg Ni+Co+As<500 mg/kg Cd+Tl+ Hg< 100 mg/kg Pression de vapeur à 35 °C <0,1mbar pour G2000 et G3000 granulométrie <20 mm pour G4000
2	NOMENCLATURE	liquides Cl<2% S<4% Métaux lourds<1%
3	Combsy brais de fabrication huiles usagées	Cl<2 % F,B,I<1 % Métaux lourds<0,5 % S< 4% 5<pH<10 PE > 55°C
4	Nomenclature	pE > 55°C Cl < 2% S < 2% Métaux < 1%
5	NOMENCLATURE	Cl < 2 à 4% suivant la nature du déchet S < 1 à 4 % suivant la nature du déchet Métaux < 6%
6	NOMENCLATURE	5<PH<10 Cl <2%

		Métaux <1%
7	Nomenclature	température de ramolissement >150 °C si PCI >3500th/t pE>0°C Cl< 2% I+F<1% Métaux lourds<1% Pb +Cr +Hg +Cd +V +Tl <0,1% Soufre<5% extrait sec<5%
8	Boues hydrocarburées pompables à faible PCI G3000 G3500	Cl <2% Métaux<0,5% Soufre<4% peroxydes et perchlorates interdits
9	NOMENCLATURE	PCI PE>-10°C à 80°C suivant le déchet Cl<2% autres halogènes<1% Métaux Lourds<1% Soufre<2%
10	NOMENCLATURE	Cl<2% S<4% PCb,PCT<50ppm Halo (F,Br,I)<1% Métaux : CD+Tl+Hg+As+Co+Ni+Se+Te<0,5% Sb+Cr+Sn+Cu+Mn+Pb+Va+Zn<2%
11	NOMENCLATURE	pE>55°C ou pas de limite suivant déchet Température de ramolissement<150°C teneur en chlore<2% autres halogènes<1% métaux lourds<1% dont Pb + Cr + Hg + Cd + V + Tl < 0,1% Soufre < 5% Extrait sec < 5%
12	Déchets liquides aqueux pouvant contenir des solvants déchets liquides huileux (huiles moteurs, autres déchets huileux) déchets solides combustibles "+NOMENCLATURE"	Cl<2% S<1% Métaux<1% Cd+Hg+Tl<0,1% F<1%
13	Matières d'ajout : Nomenclature Boues d'hydroxydes et oxydes métalliques Cendres humides et sèches issues du foyer d'une centrale thermique catalyseurs usés des unités de craquage fumées de silice boues d'aciéries laitiers battitures	Métaux lourds <5%

	Déchets solides industriels (NOMENCLATURE) Huiles usagées (Nomenclature) Gamme 2000 (Nomenclature)	Cl<4% S<6% Métaux < 5% "
14	Nomenclature	Point éclair suivant PCI (déchets des groupes G2000, G3000, G4000) Cl<2% Halogènes (F,Br,I)<1% Métaux lourds (Cr, Cd, Pb, Hg, V, Zn, Ni, Th, Cu)<0,5% Soufre<4% 3<pH<12
15	Nomenclature Boues d'apprêt et de travail des matériaux Déchets de synthèse et autres opérations de chimie organique déchets de traitement de dépollution et de préparation d'eau mélanges et mélanges aqueux des produits susmentionnés Solvants et déchets de solvants déchets de peinture vernis colle mastic encres alcools, diluants, résines déchets liquides huileux boues d'apprêt et de travail des matériaux déchets de synthèse et autres opérations organiques déchets urbains huiles et graisses végétales, animales, minérales, synthétiques déchets et mélanges aqueux de goudrons, solvants ou résidus d'hydrocarbures eaux glycolées lessivats de décharge	Odeurs Cl<4%
Multifilière		
16	émulsions et pseudo-émulsions provenant d'ateliers d'usinage (fluides d'usinage) Lessives usées de machines à laver assurant le dégraissage de pièces bains usés de phosphatation ou de dégraissage mélanges aqueux d'hydrocarbures susceptibles d'être traités efficacement bains de polissage en milieu lessiviel bains d'activation dits aussi de neutralisation eaux de cabines de peinture fluides d'usinage en solution	Ne sont pas mélangés à des solvants ou à des liquides halogénés Ne sont pas constitués d'effluents concentrés de traitement de surface

	<p>eau de lavage de filtre à sable, à charbon actif à média filtrant</p> <p>effluents huileux de lavage des sols d'ateliers de travail des métaux</p> <p>effluents répondant aux définitions précitées provenant de nettoyage d'installations industrielles ou de véhicules citernes d'entreprises</p> <p>boues huileuses</p>	
17	<p>NOMENCLATURE</p> <p>Unité physico-chimique minérale</p> <p>Unité physico-chimique organique</p> <p>Unité d'évapo-incinération</p>	<p>PE>55°C</p> <p>Oléum et acides gras interdits</p> <p>peroxydes interdits</p> <p>Déchets mercuriels interdits</p> <p>Déchets arséniés interdits</p> <p>COT<1500 mg/l</p> <p>COT<500 mg/l pour déchets non justiciables d'un traitement complémentaire de la charge organique</p> <p>Indice phénol< 20 mg/l</p> <p>Indice phénols < 0,5 mg/l pour déchets non justiciables d'un traitement complémentaire de la charge organique</p> <p>Chrome hexavalent <0,1 mg/l sauf pour déchets justiciables d'un prétraitement</p> <p>cyanure libre<20 mg/l</p> <p>cyanure libre <0,1 mg/l sauf pour déchets justiciables d'un prétraitement</p> <p>COT <1500 mg/l</p> <p>Indice phénol < 20 mg/l</p> <p>Chrome hexavalent < 0,1 mg/l</p> <p>Cyanure libre< 0,1 mg/l</p> <p>Sels métalliques(Cr, Cd, Ni, Cu, Zn, Fe, Pb, Sn)<20 mg/l</p> <p>Chlore organique< 2%</p> <p>Soufre< 4%</p>
18	<p>Solutions acides et basiques chromatées ou non, phénolées ou non, faiblement ou pas cyanurées</p> <p>Boues</p> <p>déchets aqueux spéciaux : produits phénolés, organiques légers ou faiblement cyanurés</p> <p>effluents liquides, déchets solides, liquides ou pâteux par incinération</p> <p>fluides d'usinage</p> <p>solvants chlorés ou non acides, alcooliques, spéciaux</p> <p>Piles et lampes usagées : piles primaires ou secondaires, longues, plates, bouton (teneur en métaux Cd, Zn, Hg, Mn, Ni, Fe, Cu)</p>	<p>Cl<7%</p> <p>tension de vapeur < 700 mbar à 20°C</p>
19	<p>NOMENCLATURE</p> <p>Unité physico-chimique</p> <p>Incinération</p>	<p>COT<900 mg/l</p> <p>Phénols< 1mg/l</p> <p>Cl<25% sur vrac</p>

	Evapo-incinération	PE>0°C Cl<2% sur vrac PE>0°C
Physico-chimique minéral		
20	NOMENCLATURE	PE>55°C Cl<1,5% Refus si le déchet contient des éléments incompatibles avec le fonctionnement du centre
21	tout effluent liquide compatible avec les traitements physico-chimiques Par dérogation, effluents liquides à caractère organique marqué	
Physico-chimique organique		
22	Eaux alcalines Huiles solubles minérales Eaux hydrocarburées (<30% Hc) Résidus hydrocarburés (plus de 30% Hc)	Huiles usées interdites PE<56°C odeurs résultat favorable au test de cassage phénols ou DCO élevée après les tests biologiques ne permettant pas de garantir les normes de rejet CrVI ou CN < 0,1mg/l
23	liquides huileux fluides d'usinage aqueux (émulsion, solution), mélanges liquides eau hydrocarbures eaux de machine à laver les pièces usinées eaux de lavage de cabines de peinture eaux de lavage de gaz "+ nomenclature	pH>4 Cl<2% sédiments < 40% pas de solvant
24	NOMENCLATURE Liquides solides pâteux ou boueux tous liquides sauf ceux particulièrement inflammables déchets cyanurés uniquement liquides	Cl<20% PCB/PCT<50ppm S<4% Métaux<1% pas d'odeur nauséabonde pas d'élément conférant au déchet un réel danger lors de la manipulation et de l'incinération
25	Liquides et pâteux	PE>55°C Cl<2% ph entre 5 et 12 Absence d'odeur gênante
26	Tout déchet liquide pâteux ou solide y compris déchets organohalogénés compatibles avec le fonctionnement des installations ultrafiltration : fluides aqueux de travail des métaux: émulsions et pseudo-émulsions d'huiles minérales effluents des machines à laver des pièces usinées effluents de lavage des sols des ateliers d'usinage	

	<p>effluents de lavage d'unités d'ultrafiltration</p> <p>effluents de lavage des véhicules ayant contenu des produits admissibles sur les unités d'ultrafiltration</p> <p>eaux provenant de cabines de peinture</p> <p>bains de dégraissage de machines à laver</p> <p>ne contenant pas d'éléments toxiques (CN, CrVI...)</p> <p>pas de solutions vraies</p> <p>transit : NOMENCLATURE</p> <p>Prétraitement : Solvants et diluants pétroliers kérosène white spirit pétrole normal pétrole spécial essence spéciale (E,F,H) hexane cyclohexane heptane toluène exempt de peinture xylène</p> <p>Régénération d'huiles claires Huiles noires</p>	
Incinération		
27	<p>Solvants usagés</p> <p>déchets liquides huileux</p> <p>Résidus et effluents chimiques divers</p> <p>goudrons sulfuriques</p>	<p>granulométrie < 2mm</p> <p>liquides ou fusibles en vrac</p> <p>Cl, Br, P, F < 2%</p> <p>métaux lourds < 1%</p>
28	<p>Tout type de déchet liquide (incinérable)</p>	<p>Liquides</p> <p>Br et F < 2%</p> <p>Métaux lourds totaux < 1%</p> <p>As, Pb, Cu, Sn, Mn, Cr, Zn, Ni, Al < 0,3%</p> <p>Cd < 0,005%</p> <p>Hg < 0,001%</p>
29	NOMENCLATURE	<p>Absence de blocs massifs et sédiments < 5mm</p> <p>Vrac ou petit conditionnement</p> <p>PE > 21°C</p> <p>Cl < 0,5%</p> <p>S < 1%</p> <p>métaux lourds < 1%</p> <p>pH 5 à 10 ou 6 à 9</p> <p>alcalins < 5%</p> <p>pas d'odeur gênante</p> <p>Na, K < 5</p>
30	déchets spéciaux ayant une teneur en substances organiques halogénées	(Cl < 2%)

	exprimées en chlore, inférieure à 2% déchets hospitaliers déchets phytosanitaires organiques à l'exception des produits mercuriels et arsenic sous réserve des dispositions prévues à l'article 29 Huiles usées	
31	NOMENCLATURE	Halogènes < 10% Soufre <4%
32	NOMENCLATURE	Soufre organique<5% Chlore organique<10%
33	NOMENCLATURE	
34	tous types de déchets, liquides, solides, pâteux, y compris organo-halogénés sauf déchets relevant d'une filière de traitement physico-chimique	
35	OM et déchets provenant de la collecte des OM Cadavres de petits animaux déchets banals déchets industriels solides pâteux ou liquides à charge organique	Cl<2% S<4% interdits : déchets relevant de traitement Physico-chimique
36	Huiles usagées autres déchets	
Traitement des déchets de laboratoire et en petites quantités		
37		Conditionnement : containers, fûts , bonbonnes etc de capacité < 1000 l vrac interdit
38	NOMENCLATURE	Interdits : solvants halogénés ou non Sels métalliques et minéraux Déchets à siccité supérieure à 40% Sels de trempe cyanurés bain sulfo-chromiques
Régénération de solvants		
39	Hydrocarbures aliphatiques : <ul style="list-style-type: none"> • white spirit • essence de pétrole, point d'ébullition compris entre 40 °C et 250 °C Hydrocarbures aromatiques, point d'ébullition entre 110,8°C et 190 °C <ul style="list-style-type: none"> • toluène • xylène • naphta Hydrocarbures aromatiques hydrogénés <ul style="list-style-type: none"> • cyclohexane • méthylcyclohexane Hydrocarbures chlorés, points d'ébullition entre 77 °C et 180 °C <ul style="list-style-type: none"> • chlorure d'éthylène • chlorure de méthylène 	

	<ul style="list-style-type: none"> • trichloréthylène • dichlorobenzène <p>Cétones, point d'ébullition entre 56 °C et 164 °C</p> <ul style="list-style-type: none"> • acétone • méthylcétone • méthylisobutylcétone • diacétone alcool • cyclohexanone <p>Ethers, point d'ébullition entre 77°C et 130 °C</p> <ul style="list-style-type: none"> • acétate d'éthyle • acétate d'isopropyle • acétate de butyle • acétate d'isobutyle <p>Autres (en très faible quantité)</p> <ul style="list-style-type: none"> • alcool éthylique • alcool isopropylique • alcool butylique 	
40	Solvants usés	
Valorisation matière		
41	Crasses et scories provenant de l'affinage e l'aluminium	<p>siccité>80%</p> <p>fraction soluble<10%</p> <p>pH sur lixiviat entre 6 et 9</p> <p>Cr total, As,CN,Cd sur lixiviat < 2mg/kg</p> <p>Va Cu Pb Al Ni Zn Fe Mo sur lixiviat <20 mg/kg</p> <p>Azote total Nkt sur lixiviat< 10mg/kg</p>

ANNEXE II-7 : Approche théorique des procédés de traitement des déchets, exemple de l'incinération et de la régénération de solvants

1) Incinération

L'incinération est sans doute le procédé sur lequel le plus de données et de modèles sont disponibles. Une part des modèles concerne le phénomène de combustion proprement dit. D'autres au contraire sont relatifs aux équipements principaux, comme le four, ou complémentaires, comme les filtres ou les équipements d'épuration des fumées.

Modèles de la combustion

La première série de modèles permet d'expliquer les phénomènes liés à la combustion. On peut ainsi estimer théoriquement la nature des rejets avant traitement ou l'influence de certains paramètres de fonctionnement sur la réaction principale d'oxydation. Des caractéristiques des déchets aux caractéristiques des rejets on pourra enchaîner plusieurs modèles intermédiaires.

Soares^[Soares 94] cite ainsi des modèles permettant de calculer le pouvoir calorifique d'un déchet en fonction de sa composition, puis des modèles permettant d'évaluer les besoins en oxygène pour la combustion d'où l'on peut déduire la dilution des polluants dans les fumées avant traitement.

Pouvoir calorifique d'un déchet.

Le pouvoir calorifique du déchet intervient à deux niveaux. Il détermine d'abord la capacité du déchet à brûler sans apport supplémentaire de combustible. Ensuite, il est un indicateur indirect de la quantité d'air nécessaire à la combustion et de la quantité de fumée qui sera générée. Connaître le PCI est donc une information importante pour l'exploitant d'une installation d'incinération, qui ajustera les paramètres de fonctionnement de son unité en fonction de sa valeur.

Le PCI est déterminé à partir du PCS mesuré par combustion en bombe calorimétrique. On a alors :

$$PCI = PCS - 25,1(9H\% \cdot \left(1 - \frac{Eau\%}{100}\right) + Eau\%)$$

où PCI et PCS sont en kJ/kg, H% est le pourcentage massique d'hydrogène contenu dans le déchet et Eau% sa teneur en eau.

Lorsque l'on dispose de la décomposition du déchet en différents composés chimiques de PCI connu, il est aussi possible de calculer le PCI global du déchet :

$$PCI_{total} = \sum_i PCI_i \cdot X_i$$

où PCI_i est le PCI du composant *i* du déchet et X_i sa fraction massique.

Utilisation du PCI pour évaluer la capacité du déchet à être incinéré

Les auteurs s'accordent en général à fixer aux environ de 8000 kJ/kg la valeur limite en deça de laquelle l'incinération est difficile. Cependant, il est possible d'avoir recours à un combustible d'appoint. En pratique de nombreux centres de traitement de déchets incinèrent des déchets à très bas PCI, y compris des déchets aqueux. Nous ne pouvons donc pas conserver cette valeur comme référence pour l'admission d'un déchet en incinération. Tout au plus peut-elle entraîner une remarque sur la nécessité d'utiliser un combustible d'appoint.

En revanche, on pourra considérer qu'il n'y a valorisation thermique effective que dans la mesure où le PCI est supérieur à cette valeur.

Utilisation du PCI pour déterminer l'efficacité de la filière pour des polluants minéraux.

L'efficacité d'une filière d'incinération vis à vis d'un polluant non affecté par la combustion ou transformé en une autre forme de polluant dépend de deux facteurs :

- le transfert de ce polluant vers les effluents, fumées ou mâchefers, ou vers des éléments de l'installation, comme les réfractaires ;
- l'efficacité des traitements complémentaires destinés à épurer ces effluents.

Ainsi, les métaux se retrouvent-ils dans les fumées ou les mâchefers, précipités sur les poussières ou sous forme d'oxydes. L'évaluation du transfert de pollution au cours de l'incinération pour un métal passe par la détermination du taux de transfert de ce polluant dans

les cendres. Certaines données sont disponibles à ce sujet, bien qu'encore très incomplètes. Le tableau 1 fournit les pourcentages de différents éléments qui peuvent être retrouvés dans les cendres. Le reste s'évacue logiquement dans les fumées.

Hg	Pb	Cd	Zn	Cr	As
1,5%	71 %	22 %	50 %	94 %	31 %

Tableau AII-7-1 : taux de transfert des métaux dans les résidus solides^{[OFEFP 87],[FINET 91]}

Connaissant la teneur en métal du déchet, il est possible de calculer la teneur en métaux dans les cendres, et de la comparer au maximum empirique de 5% au delà duquel les métaux peuvent avoir un effet néfaste sur les réfractaires.

$$X_{\text{Métaux}}_{\text{cendres}} = \sum \frac{\tau_M X_M}{X_{\text{cendres}}}$$

où $X_{\text{métaux}}_{\text{cendres}}$ est la teneur en métaux dans les cendres, τ_M le taux de transfert du métal M dans les cendres (obtenu par mesure de la composition des mâchefers dans un incinérateur type), X_M la fraction massique du métal M dans le déchet, et X_{cendres} la fraction de résidus solides de la combustion du déchet (mesuré par un test de combustion à 815 °C).

La teneur en métaux dans les fumées avant traitement est le rapport entre la quantité de métal non capté par les cendres et le volume de fumées émis au cours de l'incinération. Le volume de fumées est lui-même fonction de la quantité d'air introduite dans le four et de la quantité de gaz généré par la combustion.

Le volume d'air théorique nécessaire pour la combustion d'un déchet est proportionnel à sa teneur en éléments combustibles. Celle-ci étant directement liée au PCI du déchet, il y a théoriquement une relation linéaire entre le PCI et le volume d'air nécessaire pour la combustion du déchet. Des relations empiriques ont été établies par plusieurs auteurs pour différents types de déchets.

$$V_a = 24 \cdot 10^{-5} \cdot \text{PCI} \quad (\text{Veron})$$

$$V_a = 20 \cdot 10^{-5} \cdot \text{PCI} \quad (\text{Rosin et Fehling, combustibles liquides})$$

$$V_a = 24 \cdot 10^{-5} \cdot \text{PCI} \quad (\text{Rosin et Felhing, combustibles non pulvérisables})$$

où V_a est le volume d'air nécessaire à la combustion. De la même manière, on peut évaluer le volume de fumée générée par la combustion neutre du déchet, soit sans excès d'air.

$$V_g = 28 \cdot 10^{-5} \cdot \text{PCI} \quad (\text{Veron})$$

$$V_g = 27 \cdot 10^{-5} \cdot \text{PCI} \quad (\text{Rosin et Fehling, combustibles liquides})$$

$$V_g = 21 \cdot 10^{-5} \cdot \text{PCI} + 1,65 \quad (\text{Rosin et Fehling, combustible non pulvérisable})$$

En général, il est nécessaire d'introduire de l'air en excès dans le four d'incinération. En se fondant sur les formules de Veron et en considérant un excès de 20% pour les liquides et 110% pour les solides, Soares obtient un volume total de fumée de :

$$V_{fL} = 33 \cdot 10^{-5} \cdot \text{PCI} \quad \text{pour les liquides}$$

$$\text{et } V_{fS} = 54 \cdot 10^{-5} \cdot \text{PCI} \quad \text{pour les solides.}$$

Connaissant le taux de transfert d'un métal dans les cendres et le volume de fumées, il est possible de calculer la teneur en métal dans les fumées avant épuration X_{fM} :

$$X_{fM} = \frac{(1 - \tau)}{V_f} \cdot X_M$$

Cette information doit alors être couplée avec l'inefficacité η du système d'épuration pour obtenir la teneur en métal dans la fumée après épuration. η représente la fraction de polluant non captée par le système d'épuration. Le tableau 2 fournit des valeurs d'inefficacité pour différents types d'installations et différents polluants. La teneur en métal X'_{fM} dans la fumée après traitement est donc exprimée sous la forme :

$$X'_{fM} = X_{fM} \cdot \eta = \frac{\eta(1 - \tau)}{V_f} \cdot X_M$$

Four classique			Four spécialisé			Four cimentier		
Hg	Cd	Pb	Hg	Cd	Pb	Hg	Cd	Pb
87,5	4	1,7	4,5	1,5	0,7	0,02	0,1	4,5

Tableau AII-7-2 : Inefficacité η (%)

En comparant la valeur de X'_{JM} avec les seuils fixés par la norme, il est possible de décider si le traitement du déchet en l'état est approprié ou non. L'exploitation de ce genre de modèles est cependant rendue difficile pour plusieurs raisons :

- Les données relatives au traitement - inefficacité, taux de transfert des polluants dans les cendres - ne sont pas disponibles pour tous les types d'installations et tous les polluants. Celles qui le sont ont parfois été calculées à partir d'observations sur une seule installation, ce qui diminue leur représentativité.
- Les centres sont souvent autorisés à effectuer des mélanges avant enfournement du déchet. Il n'est donc pas possible de prévoir les caractéristiques du déchet qui sera effectivement enfourné.
- Les seuils de rejet varient selon les centres dans des proportions importantes. Dans les données dont nous disposons en annexe II-5, le seuil de rejet pour le mercure se situe entre 0,3 et 5 mg/Nm³.

On peut donc envisager d'utiliser cette information pour attirer l'attention de l'utilisateur sur le caractère spécial de son déchet plutôt que pour éliminer une solution de traitement.

2) Régénération de solvants

Nous avons présenté la filière de régénération des solvants sans détailler les divers procédés mis en oeuvre. Une étude théorique de ces procédés permet de mettre en évidence différentes catégories de déchets et différents paramètres influant sur la nature du procédé à employer.

Les techniques employées pour la régénération des solvants sont principalement^[BRETON 88] :

- la distillation simple,
- la rectification,
- l'évaporation,
- l'entraînement à la vapeur.

La distillation simple et la rectification reposent sur le même principe et ont pour objectif de séparer les composants de mélanges de solvants (y compris l'eau) en tirant partie de leur différences de température d'ébullition.

L'évaporation concerne des déchets solides ou visqueux contenant des solvants volatiles. Par évaporation de la fraction volatile on obtient un solvant ou un mélange de solvants qui peut être ensuite purifié ou rectifié par distillation fractionnée. Le procédé le plus utilisé est l'évaporateur à film raclé^[PIERRAT 94].

Enfin, l'entraînement à la vapeur permet principalement de récupérer des solvants non miscibles dans l'eau à partir d'un déchet aqueux ou de séparer deux solvants organiques dont l'un forme un azéotrope à bas point d'ébullition avec l'eau. L'entraînement à la vapeur peut aussi être utilisé pour décontaminer des déchets solides sans intention de valorisation du solvant.

D'autres techniques peuvent être utilisées pour le traitement de déchets contenant des solvants, comme l'extraction liquide-liquide, l'adsorption sur charbons actifs ou l'entraînement à l'air. Ces techniques ne conduisant généralement pas à une valorisation du solvant, nous ne les examinerons pas dans ce chapitre.

Distillation et rectification

En dehors de paramètres tels que la teneur en matière en suspension qui peut être modifié par un prétraitement, il existe trois principaux facteurs affectant la possibilité du traitement d'un mélange de solvants par distillation :

- la position relative des points d'ébullition des différents composants,
- la formation d'un azéotrope,
- le point d'auto-inflammation.

Lorsque les points d'ébullition des composants sont trop proches, la séparation devient difficile car une légère variation de température entraîne la vaporisation ou la condensation de l'ensemble du mélange.

Lorsque le mélange de solvants forme un azéotrope, celui-ci constitue l'un des produits obtenus à l'issue de la distillation, en association avec l'un des composants du mélange à l'état pur (figure 1). La régénération n'est alors intéressante que si la fraction de produit pur est suffisamment importante ou si le mélange azéotropique présente un intérêt. C'est par exemple le

cas lorsqu'il s'agit d'un mélange aqueux et que l'on tolère une certaine humidité dans le solvant.

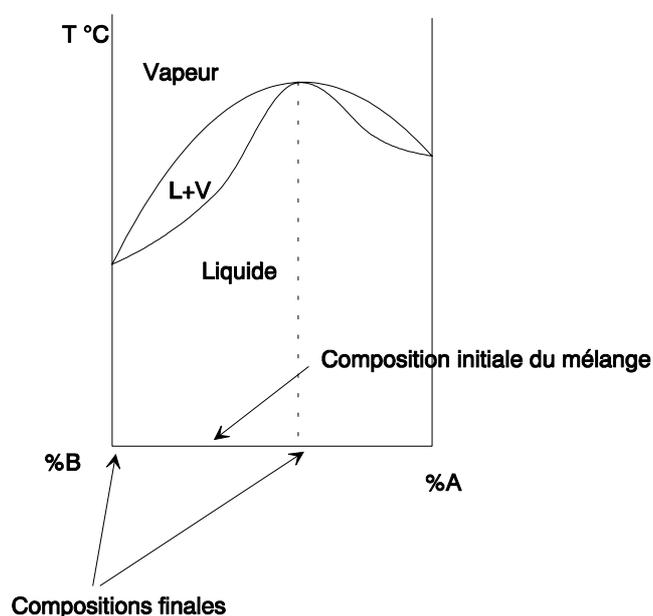


Figure AII-7-1 : Composition des produits dans le cas de la distillation d'un mélange avec formation d'azéotrope

Le point d'auto-inflammation est la température à laquelle un corps en présence d'oxygène s'enflamme sans intervention d'une flamme. Un point d'auto-inflammation trop bas peut se traduire par un danger d'incendie ou d'explosion lié au chauffage du mélange. On limitera donc la régénération par distillation aux solvants dont le point d'auto-inflammation est supérieur au point d'ébullition de 40°C au moins^[BRETON 88].

En plus des paramètres purement techniques, certaines données économiques peuvent intervenir. Il s'agit en particulier de la valeur des solvants récupérés et du coût d'élimination des résidus de distillation. Ceux-ci dépendent notamment de la teneur en chlore du solvant, un solvant chloré étant généralement plus cher à l'achat mais aussi plus coûteux à éliminer.

Evaporation

Les paramètres qui interviennent dans le choix d'une technique d'évaporation sont les suivants :

- la viscosité du déchet,
- les données thermodynamiques relatives à l'équilibre liquide-vapeur, qui sont les mêmes que pour la distillation,
- des considérations économiques.

L'évaporation à film mince raclé est principalement utilisée pour des déchets particulièrement visqueux (de 10 à 10 000 cps). D'autres techniques d'évaporation existent. Leur utilisation dépend de la viscosité du déchet comme le montre la figure 2. L'évaporation est souvent effectuée sous pression réduite afin de réduire les températures d'ébullition des composants à séparer.

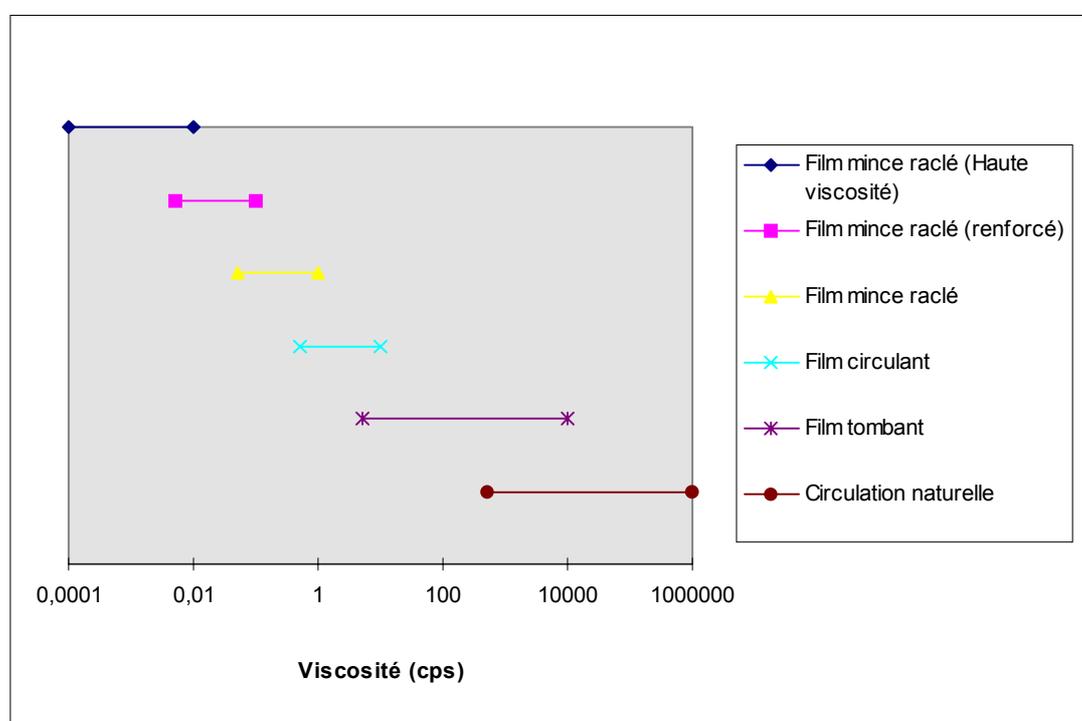


Figure AII-7-2 : Domaine d'utilisation de différents types d'évaporateurs^[BRETON 88]

Entraînement à la vapeur

L'entraînement à la vapeur est habituellement utilisé pour les opérations suivantes :

- la séparation d'une faible quantité de COV d'une grande quantité de matière,

- la séparation d'une quantité importante de composants à faible solubilité et haut point d'ébullition d'un déchet non volatile lorsque le composant à séparer forme un azéotrope à température d'ébullition minima avec l'eau,
- la récupération de solvants instables thermiquement ou qui réagissent avec d'autres composants du déchet à la température d'ébullition,
- la récupération de solvants qui ne peuvent pas être distillés même à basse pression en raison de leur point d'ébullition élevé,
- la récupération de solvants lorsque des dangers d'explosion ou d'incendie existent.

La vapeur agit par réduction de la pression partielle des constituants du mélange, ce qui entraîne une réduction du point de fusion du constituant à séparer. Le mélange de gaz ainsi formé est stable en raison de la basse température d'ébullition de l'azéotrope. Il peut être évacué et recondensé pour obtenir un mélange eau-solvant. Lorsque le solvant est immiscible dans l'eau il peut aisément être récupéré.

Le point essentiel à considérer pour déterminer la faisabilité d'un entraînement à la vapeur est l'existence d'un azéotrope à température d'ébullition minima. En l'absence d'information sur ce point, on utilise le point d'ébullition et la constante de Henry comme indicateur de l'intérêt d'un entraînement à la vapeur. On considère que les composants présentant les caractéristiques suivantes sont susceptibles d'être traités par entraînement :

- point d'ébullition inférieur à 150°C,
- constante de Henry supérieure à 10^{-4} atm.m³/mole.

A partir des informations techniques sur la régénération des solvants, nous avons accès à trois types de résultats.

Tout d'abord, les caractéristiques générales du déchet nous permettent de choisir une technique de traitement parmi les trois familles présentées ci-dessus. Ces caractéristiques générales concernent essentiellement l'état physique du déchet, sa teneur en eau et son état de

mélange. En utilisant ces critères de classification, nous pouvons établir des familles de déchets susceptibles d'être traités par l'une ou l'autre des techniques :

- déchets solides
 - minéraux souillés de solvants
- déchets liquides
 - organiques
 - solvants souillés ou mélanges de solvants ne contenant pas de matière polymérisable
 - solvants souillés ou mélanges de solvants contenant de la matière polymérisable
 - mélange
 - déchets aqueux contenant des solvants organiques miscibles
 - déchets aqueux contenant des solvants organiques non miscibles
- déchets intermédiaires
 - boue minérale souillée de solvants halogénés
 - déchet organique visqueux contenant des solvants (boue de peinture,...)

Ensuite, pour chacune des techniques il existe des conditions limites de fonctionnement. Ces conditions se traduisent par des valeurs maximales admissibles de certains paramètres comme le point d'autoinflammation ou la viscosité. Ces conditions fournissent une première catégorie de critères numériques de sélection.

- point d'auto-inflammation
- point d'éclair
- tension de vapeur
- viscosité

Enfin, les caractéristiques physiques des solvants, existence d'un azéotrope, écart de points d'ébullition, déterminent les caractéristiques limites du produit régénéré. En disposant d'une base de donnée complète des points d'ébullition et des compositions azéotropiques, la composition des solvants régénérés pourrait être estimée. Celle-ci serait alors à mettre en relation avec la fonction et la valeur du produit et le coût du traitement pour établir s'il est intéressant de le régénérer. Il faudrait disposer d'une grande quantité de données technico-

économiques plus ou moins aisées à mettre en oeuvre. Une autre approche consiste à s'appuyer sur la pratique des régénérateurs de solvants pour identifier les produits régénérables disposant d'un réel débouché. Ceci nous permet d'établir une liste de solvants couramment régénérés.

A titre d'exemple, le centre SOREGÉ à Beaufort (73) régénère les solvants ou mélanges de solvants suivants (les désignations ci-dessous correspondent à celles de l'arrêté de classement du centre) :

Hydrocarbures aliphatiques :

- white spirit
- essence de pétrole, point d'ébullition compris entre 40 °C et 250 °C

Hydrocarbures aromatiques, point d'ébullition entre 110,8°C et 190 °C

- toluène
- xylène
- naphtha

Hydrocarbures aromatiques hydrogénés

- cyclohexane
- méthylcyclohexane

Hydrocarbures chlorés, points d'ébullition entre 77 °C et 180 °C

- chlorure d'éthylène
- chlorure de méthylène
- trichloréthylène
- dichlorobenzène

Cétones, point d'ébullition entre 56 °C et 164 °C

- acétone
- méthylcétone
- méthylisobutylcétone
- diacétone alcool
- cyclohexanone

Esters, point d'ébullition entre 77°C et 130 °C

- acétate d'éthyle
- acétate d'isopropyle
- acétate de butyle
- acétate d'isobutyle

Autres (en très faible quantité)

- alcool éthylique
- alcool isopropylique

- alcool butylique

En combinant ces trois niveaux d'information : nature du déchet, nature des solvants qu'il contient, paramètres de fonctionnement, la possibilité de régénérer les solvants peut être établie et le procédé à employer déterminé.

		Solutions neutres contenant des métaux en solution	
		Autre solution saline	
Organique	Solvants	Solvant halogéné	
		Solvant non halogéné	
	Huiles usagées	Huiles noires	Huile entière d'usage
			Huile de trempe
			Huile moteur
		Huiles claires	Huile isolante Chlorée
			Non chlorée
			Huile de transmission hydraulique
		Huiles minérales entières mélangées	
	Autres déchets halogénés ou contenant métaux lourds, soufre...	Halogénés	
		Soufrés	
		Chargés en métaux lourds	
		Chargé en polluants divers	
	Autres déchets non halogénés sans métaux lourds	Culots de régénération de solvants non halogénés	
		Autres déchets non halogénés	
Mélange aqueux-organique	Mélange eau-hydrocarbures séparable	Halogénée	
		Non halogénée	
	Mélange eau-hydrocarbures non séparable	Halogénées	
		Non halogénées	
	Autres déchets liquides en mélange	Non halogénés	
	Boues	Halogéné	
		eau-hydrocarbures-sédiments	
		Boues de peinture, vernis, colle, encre	
Boue minérale liquide	Carbonate de calcium résiduaire		
	Sulfate de calcium résiduaire		
	Boues d'hydroxydes métalliques		
	Autre boue de neutralisation d'effluent acide		
	Boues de forage		
Intermédiaires	Minéral	Boues d'hydroxydes métalliques	Hydroxydes de fer
			Hydroxydes d'aluminium

			Autres hydroxydes
		Boue contenant des métaux en solution dans la phase aqueuse	Boue chromique
			Boue chromique
			Acide non chromique
			Cyanurée
			Alcaline non cyanurée non chromique
			Autre boue minérale contenant des métaux en solution ou facilement mobilisab
			Boue d'usinage avec hydrocarbures
		Carbonate de calcium	
		Sulfate de calcium résiduaire	
		Autre boue minérale (non métallique)	Avec hydrocarbures
			Sans hydrocarbures
	Organique ou souillé de matière organique	ou Halogéné	
		Non halogéné	
		Organique contenant des métaux lourds	
		Résidus de peinture, vernis, colle, mastic, encre	Boues de peinture, vernis, colle avec phase aqueuse
			Déchets d'encres ou de colorants avec phase organique
		Boue minérale souillée d'hydrocarbures	Boue d'usinage de métaux avec hydrocarbures
			Boue d'usinage de matériaux non métalliques avec hydrocarbures
		Boues biologiques	
	Goudrons sulfuriques		
	Résines saturées		
Solides	Déchets minéraux peu solubles	Résidu de forage	Contenant des hydrocarbures (plus de 1%)
			Sans hydrocarbures
		Résidu de la métallurgie	Poussières de fabrication d'aciers alliés
			Poussières issues de procédés de fabrication des métaux

		Scories et crasses de seconde fusion de métaux par bains de sels
		Autres scories et crasses issues de procédés de fabrication des métaux
		Autres scories et crasses
		Boues d'usinage contenant moins de 5% d'hydrocarbures
		Sables de fonderie n'ayant pas subi la coulée
		Sable contenant des liants de synthèse phénolés
		Sables contenant uniquement des liants naturels
		Sable de fonderie ayant subi la coulée
Résidu de l'incinération		Suies et cendres non volantes
		Poussières, fines et cendres volantes
		Déchets de neutralisation des gaz ou des eaux de lavage des gaz
		Mâchefers résultant de l'incinération de déchets industriels
Déchet chimique		Autres oxydes métalliques résiduaux
		Composés d'aluminium
		Composés d'argent
		Composés de baryum
		Composés de beryllium
		Composés de cadmium
		Composés de chrome
		Composés de cobalt
		Composés de cuivre
		Composés d'étain
		Composés de fer
		Composés de magnésium
		Composés de manganèse
		Composés de mercure
		Composés de molybdène
		Composés de nickel
		Composés d'or
		Composés de plomb
		Composés de potassium

		Composés de sodium
		Composés de zinc
		Déchets composites et autres sels
	Oxydes métalliques résiduaires solides hors alcalins	Composés d'aluminium
		Composés d'argent
		Composés de baryum
		Composés de beryllium
		Composés de cadmium
		Composés de chrome
		Composés de cobalt
		Composés de cuivre
		Composés d'étain
		Composés de fer
		Composés de magnésium
		Composés de manganèse
		Composés de mercure
		Composés de molybdène
		Composés de nickel
		Composés d'or
		Composés de plomb
		Composés de potassium
		Composés de sodium
		Composés de zinc
		Déchets composites et autres sels
	Sels minéraux résiduaires solides non cyanurés	
	Catalyseurs usés	
	Sels métalliques résiduaires solides hors alcalins	
Résidus de traitement d'eaux industrielles ou de sols pollués	Boues d'épuration d'eaux, d'effluents et de bains de traitement de surface	Boues d'hydroxydes métalliques deshydratées
		Boues d'hydroxydes métalliques non deshydratées
	Résidus de stations d'épuration industrielles	Boues de décarbonisation
	Résidus de traitement de sols pollués	

	Résines échangeuses d'ions saturées
Résidus d'amiante	Résidus autres que ceux de déflocage
Réfractaires et autres matériaux minéraux usés	Résidus de déflocage
	Matériaux souillés au cours du processus de fabrication
Résidus de recyclage d'accumulateurs et batteries	Matières premières, rebuts de fabrication et matériels divers souillés, non
Déchets organiques ou chargés en matière organique	Halogéné
	Non halogéné
	Fusible
	Non fusible
Résidus de peintures, encres et vernis	Déchets de peinture polymérisés ou solides
	Déchets de résines, de vernis ou de polymères sans phase liquide
	Boues de peinture, vernis, colle avec phase aqueuse
	Boues de peinture, vernis, colle avec phase organique
	Déchets d'encres ou de colorants avec phase organique
	Déchets d'encres ou de colorants sans phase organique
	Boues de forage
	Boues d'usinage avec hydrocarbures (> 5%)
	Goudrons sulfuriques
Sels et réactifs solides ou déchets minéraux fortement solubles	Sels minéraux et déchets métalliques solides cyanurés
	Sels minéraux solides non cyanurés
	Sels métalliques solides non cyanurés
	Composés d'aluminium
	Composés d'argent
	Composés de baryum
	Composés de beryllium

		Composés de cadmium		
		Composés de chrome		
		Composés de cobalt		
		Composés de cuivre		
		Composés d'étain		
		Composés de fer		
		Composés de magnésium		
		Composés de manganèse		
		Composés de mercure		
		Composés de molybdène		
		Composés de nickel		
		Composés d'or		
		Composés de plomb		
		Composés de potassium		
		Composés de sodium		
		Composés de zinc		
		Déchets composites et autres sels		
Emballages et matériels souillés	Emballages souillés	De matières organiques	Fût métallique	
			Emballage plastique	Volume supérieur à 30 litres
				Volume inférieur à 30 litres
		Uniquement de matières inorganiques		
	Matériels souillés			
	Absorbants, adsorbants et matériaux souillés	Souillés notamment de produits organiques	Cartouches de filtration de solvants	
			Autres absorbants	
			Chiffons souillés	souillés de produits halogénés
				souillés de produits non halogénés
			Papiers d'emballage souillés	
		Souillés uniquement de produits inorganiques		
Piles et accumulateurs				
		Piles salines et alcalines		
		Batteries au plomb		
		Accumulateurs Nickel Cadmium		
		Autres piles et accumulateurs		

Déchets phytosanitaires organiques	Déchets mercuriels
	Déchets arseniés
	Autres déchets phytosanitaires organiques
Déchets métalliques	Composés d'aluminium
	Composés d'argent
	Composés de baryum
	Composés de beryllium
	Composés de cadmium
	Composés de chrome
	Composés de cobalt
	Composés de cuivre
	Composés d'étain
	Composés de fer
	Composés de magnésium
	Composés de manganèse
	Composés de mercure
	Composés de molybdène
	Composés de nickel
	Composés d'or
	Composés de plomb
	Composés de potassium
	Composés de sodium
	Composés de zinc
	Déchets composites et autres sels
Autres déchets solides	Tubes d'éclairage

Annexes de la troisième partie

ANNEXE III-1 : fonctions de traitement de surface prises en compte

Dépôts métalliques	
Argenture	
Cadmiage	<i>Acide non fluoborate</i>
Cadmiage	<i>Acide fluoborate</i>
Cadmiage	<i>Alcalin</i>
Chromage	<i>Chrome 6 non fluosilicate</i>
Chromage	<i>Chrome 6 fluosilicate</i>
Chromage	<i>Chrome 3</i>
Cuivrage	<i>Acide non fluoborate, non pyrophosphate</i>
Cuivrage	<i>Acide Fluoborate</i>
Cuivrage	<i>Alcalin non Cyanuré</i>
Cuivrage	<i>Alcalin cyanuré</i>
Cuivrage	<i>Acide pyrophosphate</i>
Dorure	
Etamage	<i>Acide non fluoborate</i>
Etamage	<i>Acide fluoborate</i>
Etamage	<i>Alcalin</i>
Nickelage	<i>Acide non fluoborate, non hypophosphite</i>
Nickelage	<i>Acide fluoborate</i>
Nickelage	<i>Acide hypophosphite</i>
Nickelage	<i>Alcalin</i>
Zingage	<i>Acide non fluoborate</i>
Zingage	<i>Acide fluoborate</i>
Zingage	<i>Alcalin non cyanuré</i>
Zingage	<i>Alcalin cyanuré</i>
Plombage	
Modification de surface	
Anodisation	<i>Sulfurique</i>
Anodisation	<i>Chromique</i>
Colmatage	<i>Sans sel</i>
Colmatage	<i>Avec sels non chromiques</i>
Colmatage	<i>Avec sels chromiques</i>
Coloration	<i>Minérale</i>
Coloration	<i>Organique</i>
Passivation	<i>Acide</i>
Passivation	<i>Alcaline</i>
Passivation	<i>Chromique</i>
Chromatation	<i>Hors aluminium</i>
Chromatation	<i>Aluminium</i>

Finition	<i>Non noire cadmium, Chromique</i>
Finition	<i>Non noire cadmium, Fluorée</i>
Finition	<i>Noire Cadmium</i>
Finition	<i>Non noire, Non bleue, Zinc</i>
Finition	<i>Noire Zinc</i>
Finition	<i>Bleue Zinc</i>
Phosphatation	<i>Non fluorée, non nitritée</i>
Phosphatation	<i>Fluorée</i>
Phosphatation	<i>Nitritée</i>
Brillantage	<i>Non chromique, non fluoré, non phosphaté, hors cadmium</i>
Brillantage	<i>Chromique hors cadmium</i>
Brillantage	<i>Fluoré hors cadmium</i>
Brillantage	<i>Phosphaté hors cadmium</i>
Brillantage	<i>Non phosphaté cadmium</i>
Brillantage	<i>Phosphaté cadmium</i>
Gravure	<i>Acide</i>
Gravure	<i>Alcaline</i>
Polissage électrochimique	<i>Acide, non chromique, non Fluoré, non phosphaté</i>
Polissage électrochimique	<i>Acide chromique</i>
Polissage électrochimique	<i>Acide fluoré</i>
Polissage électrochimique	<i>Alcalin</i>
Polissage électrochimique	<i>Acide phosphaté</i>
Polissage électrochimique	
Usinage chimique	<i>Acide non fluoré</i>
Usinage chimique	<i>Acide fluoré</i>
Usinage chimique	<i>Alcalin</i>
Démétallisation	
Désargenture	<i>Hors aciers</i>
Désargenture	<i>Aciers</i>
Décadmiage	<i>Non cyanuré</i>
Décadmiage	<i>Cyanuré</i>
Déchromage	<i>Hors aciers et nickel</i>
Déchromage	<i>Aciers et nickels</i>
Décuivrage	<i>Hors aciers ordinaires</i>
Décuivrage	<i>Acide, aciers ordinaires</i>
Décuivrage	<i>Alcalin non cyanuré, aciers ordinaires</i>
Décuivrage	<i>Alcalins cyanurés, aciers ordinaires</i>

Désétamage-déplombage	<i>Acide non fluoborique</i>
Désétamage-déplombage	<i>Acide fluoborique</i>
Désétamage-déplombage	<i>Alcalin</i>
Dénickelage	<i>Non cyanuré</i>
Dénickelage	<i>Cyanuré</i>
Dézingage	<i>Acide</i>
Dézingage	<i>Alcalin</i>
Prétraitements, intertraitements	
Dégraissage	<i>Non cyanuré, non nitrite, non phosphaté, hors cadmium</i>
Dégraissage	<i>Non cyanuré, phosphaté, hors cadmium</i>
Dégraissage	<i>cyanuré, phosphaté, hors cadmium</i>
Dégraissage	<i>nitrite</i>
Dégraissage	<i>non cyanuré, non phosphaté, cadmium</i>
Dégraissage	<i>non cyanuré, phosphaté, cadmium</i>
Dégraissage	<i>cyanuré phosphaté hors cadmium</i>
Décapage	<i>Aqueux acide, Chromique</i>
Décapage	<i>Aqueux acide, Fluoré</i>
Décapage	<i>Aqueux acide, Phosphaté</i>
Décapage	<i>Aqueux acide, Non chromique, Non Fluoré, Non Phosphaté</i>
Décapage	<i>aqueux alcalin</i>
Préparation plastique	<i>Sensibilisation</i>
Préparation plastique	<i>Activation chlorhydrique</i>
Préparation plastique	<i>Activation Chromique</i>
Dépassivation et neutralisation	<i>Acide hors cadmium</i>
Dépassivation et neutralisation	<i>Alcaline hors cadmium</i>
Dépassivation et neutralisation	<i>Cadmium</i>

ANNEXE III-2 : Procédés de valorisation des effluents de traitement de surface.

1) Electrolyse

L'électrolyse est utilisée de manière industrielle depuis plus d'un siècle pour le revêtement des pièces métalliques. C'est donc un procédé essentiel de l'activité du traitement de surface. L'utilisation de l'électrolyse pour la valorisation des effluents de traitement de surface n'est pas nouvelle. Elle a été utilisée très tôt pour la récupération des métaux nobles tels que l'or et l'argent, pour lesquels le recours à cette technique était parfaitement justifié du point de vue économique.

L'application de l'électrolyse à la récupération d'autres métaux est plus récente. Elle se heurte à des difficultés d'ordre économique qui sont liées aux performances des électrolyseurs aux faibles concentrations. En effet, le rendement d'une cellule d'électrolyse diminue fortement lorsque la concentration du métal à récupérer chute (Figure 1). Cette chute de rendement est due principalement à la réduction des transferts d'ions dans la solution et éventuellement à la prédominance de réactions parasites.

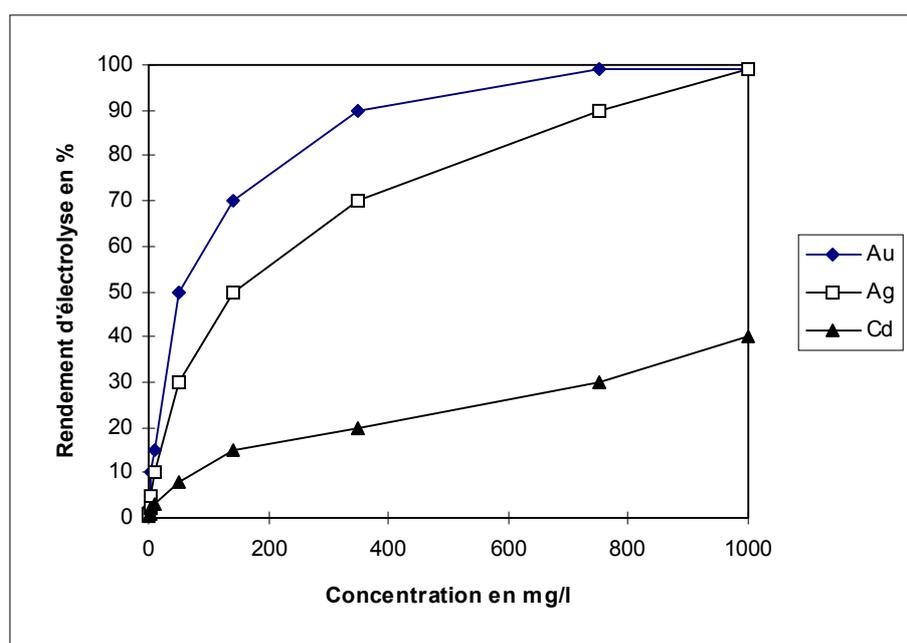


Figure AIII-2-1 : Rendements d'électrolyse en fonction de la concentration de métal en solution (sous forme de complexes cyanurés)^[Grange 94]

Pour compenser ces chutes de rendement, de nouvelles géométries d'électrode ont été développées. Il s'agit principalement d'électrodes volumiques destinées à augmenter la surface de contact entre l'électrode et l'électrolyte.

Les principales applications envisageables pour l'électrolyse sont liées à l'électrodéposition des métaux résiduels. Il s'agit de : la récupération de métal dans les bains de traitement usagés, la régénération en continue des bains de rinçage statiques par récupération du métal, l'épuration en continue des rinçages courants. La régénération en continu des bains de rinçage statique est de loin la plus courante de ces applications.

La liste des métaux susceptibles d'être électrodéposés est dictée à la fois par des considérations thermodynamiques et cinétiques. En pratique, il s'agit des métaux suivants :

Cu, Zn, Au, Pt, Ag, Cd, Sn, Ni...

En traitement de surface, ces métaux interviennent soit directement dans les bains de revêtement soit indirectement dans les bains de démétallisation. Nous pouvons donc identifier les fonctions susceptibles de fournir un effluent contenant les métaux concernés. Il s'agit des fonctions suivantes^[ANRED 88].

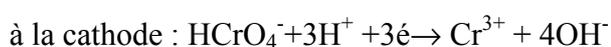
Démétallisation	Décadmiage
Démétallisation	Décuivrage
Démétallisation	Dénickelage
Démétallisation	Désargenture
Démétallisation	Désargenture
Démétallisation	Désétamage-déplombage
Démétallisation	Dézingage
Dépôts métalliques	Argenture
Dépôts métalliques	Cadmiage
Dépôts métalliques	Cuivrage
Dépôts métalliques	Dorure
Dépôts métalliques	Etamage
Dépôts métalliques	Nickelage
Dépôts métalliques	Plombage
Dépôts métalliques	Zingage

Ces fonctions spécifiques de revêtement ou de démétallisation sont complétées par des fonctions plus générales comme le décapage lorsque le métal de base est l'un des métaux électrodéposables. C'est alors la présence de l'un de ces métaux dans la solution qui est un indicateur de la possibilité d'avoir recours à l'électrolyse.

Dans la mesure où le bain à dépolluer est destiné à l'origine au dépôt métallique par électrolyse, il est raisonnable de supposer que la récupération des métaux est faisable par la même voie. Cependant, lorsque la concentration de métal à récupérer diminue, des réactions parasites peuvent devenir prépondérante. Il s'agit notamment du dégagement d'hydrogène due à la réduction des ions H⁺. Dans ce cas le rendement chute de manière importante, empêchant une dépollution suffisante de l'effluent pour que son rejet direct dans l'environnement puisse être envisagé. Suivant la position relative de la courbe intensité potentiel du couple rédox formé par le métal et son cation par rapport à celle du couple H⁺/H₂, cette réaction parasite interviendra à des concentrations plus ou moins élevées en fonction du pH. Il sera donc éventuellement nécessaire de maintenir celui-ci à un niveau suffisamment élevé. La nature des électrodes peut modifier la cinétique des réactions électrochimiques et permettre de réduire fortement les réactions parasites.

D'autres réactions parasites peuvent intervenir. Elles sont dues à la présence d'éléments multivalents tels que le fer ou le chrome qui réagissent en même temps à l'anode et à la cathode et mobilisent ainsi l'essentiel de l'énergie électrique. Les réactions en jeu sont les suivantes.

Pour le chrome la réaction dépend du pH de la solution et de la concentration de la solution en chrome. Par exemple, pour un pH situé entre 1 et 7 et une concentration inférieure à 0,01 g/l de Chrome on a :



Pour le fer on a :

à l'anode : $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}$

à la cathode : $\text{Fe}^{3+} + \text{e} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$

En présence de ces éléments à des concentrations importantes, il est impossible de mettre en oeuvre une dépollution électrolytique classique des effluents. Le développement de techniques d'électrolyse à compartiments séparés permet cependant de compenser ces phénomènes^[Grange].

Mode d'utilisation :

On a vu que trois modes d'utilisation principaux sont envisageables :

- la récupération de métal dans les bains de traitement, par bâchée ou en continu
- la récupération de métal dans les bains de rinçage statique en continu
- la récupération de métal dans les rinçages courants en continu.

La récupération de métal dans les bains de traitement ne représente un intérêt que dans la mesure où le bain est destiné à être renouvelé fréquemment soit du fait de la contamination métallique et de la consommation des réactifs (cas de la démétallisation) soit du fait de la trop grande concentration d'additifs liés à l'apport de solution (certains bains de dépôt métallique). En revanche, de nombreux bains de traitement peuvent être maintenus très longtemps par apport de métal solide à l'anode et complément en réactifs (acides, tensioactifs...) pour compenser l'entraînement. Pour ces bains, l'investissement dans une unité d'électrolyse n'est pas intéressant.

La récupération de métal dans les bains de rinçage statique peut être envisagée dans tous les cas. Elle permet de maintenir le bain à une concentration relativement faible, qui limite les entraînements vers les bains de rinçage courant et permet donc de réduire la pollution à traiter en bout de chaîne. Cependant, cette concentration métallique pouvant rester de l'ordre de quelques grammes par litre, elle ne se traduit pas par une baisse trop importante du rendement électrolytique.

La dépollution de rinçages courants par électrolyse est moins utilisée en raison de la baisse de rendement résultant des faibles concentrations métalliques. On préfère souvent utiliser des résines échangeuses d'ions pour dépolluer les effluents peu chargés, avec la possibilité de

régénérer ces résines et de récupérer les métaux dans les éluats par électrolyse. L'électrolyse est cependant utilisée sur les bains de rinçage courant pour la récupération des métaux précieux.

2) Résines échangeuses d'ions

Le principe de fonctionnement des résines échangeuses d'ions repose sur l'affinité préférentielle de certains radicaux organiques avec des ions. Les résines échangeuses d'ions sont des polymères sur lesquels sont fixées des fonctions ionisables. On distingue généralement quatre familles de composés échangeurs d'ions^[Lumbroso 92] :

- les résines cationiques fortement acides qui possèdent un groupement échangeur acide sulfonique, leur structure est du type : $R-SO_3 H$,
- les résines cationiques faiblement acides possédant un radical carboxylique de structure du type : $R-COOH$,
- les résines anioniques fortement basiques avec un radical ammonium quaternaire ($R-CH_2-N[CH_3]_3-OH$),
- et les résines anioniques faiblement basiques avec un radical ammonium primaire, secondaire ou tertiaire. (ex: $R-CH_2-NH[CH_3]_2-OH$).

Lors du passage d'une solution chargée en cations métalliques sur une résine cationique, ceux-ci se substituent aux ions H^+ . Inversement, lors du passage d'une solution chargée en anions, ils se substituent aux OH^- du radical.

Les résines peuvent ensuite être régénérées par l'action d'un acide fort ou d'une base forte. On récupère alors un éluat fortement concentré en l'espèce ionique fixée.

L'affinité des échangeurs d'ions varie suivant la nature de la résine et l'espèce considérée. Ainsi, pour les résines de fortement acides, on observe les priorités de réaction dans l'ordre suivant :

- $Ag > Cu > K > NH_4 > Na > H$ pour les ions monovalents,
- $Pb > Hg > Ca > Ni > Cd > Cu > Zn > Fe > Mg > Mn$ pour les ions divalents,
- $Fe > Al$ pour les ions trivalents.

De même, les résines anioniques moyennement basiques sont plus indiquées pour l'extraction de complexes cyanurés ($Cu(CN)_4^{3-}$, $Zn(CN)_4^{2-}$) ou les anions d'acides forts, alors que les

échangeurs d'ions fortement basiques sont utilisés pour retenir les autres types d'anions (CN^- , CO_3^{2-}).

La quantité de pollution qu'une résine peut absorber est définie par sa capacité d'échange. Habituellement, celle-ci est de l'ordre ou inférieure à 1 eq/l. C'est pourquoi il est peu économique d'utiliser des résines pour des concentrations élevées en polluant, puisqu'il faut alors les régénérer en permanence. En revanche, l'emploi de résines est adapté à des effluents dilués (de l'ordre de 1 meq/l) en composant à extraire. Certaines applications utilisent cependant des cycles de fixation régénération rapides avec succès sur des bains concentrés^[Brown 89].

Les résines échangeuses d'ions trouvent donc leur application :

- dans l'extraction de polluants d'effluents de rinçage courant, soit en vue de leur rejet, soit pour régénérer l'eau qui peut à nouveau être utilisée pour les rinçages,
- dans l'extraction de contaminants de bains de traitement afin de les régénérer,
- dans l'extraction des teneurs résiduelles en réactifs dans les bains de traitement après épuisement et extraction éventuelle par électrolyse.

Dans la mesure où les polluants métalliques se retrouvent concentrés dans les éluats, il devient possible de les récupérer, par électrolyse par exemple.

De nombreux montages particuliers permettent d'effectuer une grande variété de traitement visant des polluants très divers. Le principe est cependant toujours celui de l'extraction d'un ou plusieurs composants ioniques qui peuvent être éventuellement récupérés par la suite. Ces montages utilisent essentiellement :

- des combinaisons de résines anioniques et cationiques, qui permettent d'éliminer en même temps les anions (CN^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, par exemple) et les cations (métaux) :
 - en lits superposés,
 - en lit mélangé,
 - à colonnes multiples.
- des cycles continus de régénération, qui autorisent le travail à concentration plus élevée,
- le couplage avec une autre technique, comme l'électrolyse, pour valoriser les éluats.

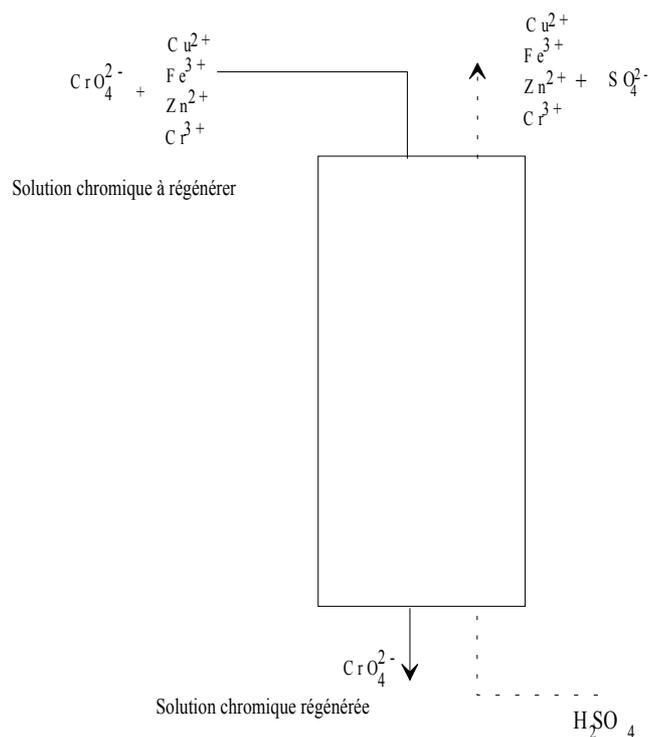


Figure AIII-2-2 : principe d'utilisation des résines échangeuses d'ions pour la régénération d'un bain chromique (les pointillés correspondent à la régénération de la résine)

Résines chélatantes

Il existe d'autres types de résines que celles décrites ci-dessus. Parmi celles-ci, on trouve les résines chélatantes, qui exploitent la réaction de chélation entre la résine et un métal pour extraire celui-ci. Ces résines ont l'avantage d'être spécifiques, c'est à dire de pouvoir extraire sélectivement une espèce particulière^[Jeanneret 90].

3) Cristallisation

Le principe de la cristallisation repose sur les différences de solubilité des composants (en particulier des sels) en fonction de la température. Une solution saline est introduite dans un système réfrigérant. En abaissant la température on obtient soit une cristallisation du sel, soit la formation de cristaux de glace à faible teneur en sel en suspension dans une solution concentrée en sel.

Dans le cas du décapage des aciers au moyen d'acide sulfurique, la solution de décapage est progressivement contaminée par du fer. En refroidissant cette solution, on parvient à faire précipiter le sulfate de fer et à récupérer de l'acide sulfurique résiduaire.

La cristallisation est une solution intéressante mais limitée par les caractéristiques des sels (capacité à cristalliser sous l'effet de la température) et par des critères de pureté des produits que l'on souhaite récupérer.

4) Electrodialyse

L'électrodialyse est une technique de séparation d'ions utilisant les membranes ioniques pour leur pouvoir sélectif et l'électricité comme force motrice. Les membranes ioniques ont une structure similaire à celle des résines échangeuses d'ions. Elles sont constituées d'un matériau généralement macromoléculaire portant des groupes ionisables^[Brun 89]. Au contact avec une solution aqueuse, ces groupes ionisables se dissocient en ions fixes et ions mobiles, qui peuvent passer dans la solution et être remplacés dans la résine par les ions de même signe provenant de la solution (figure 3).

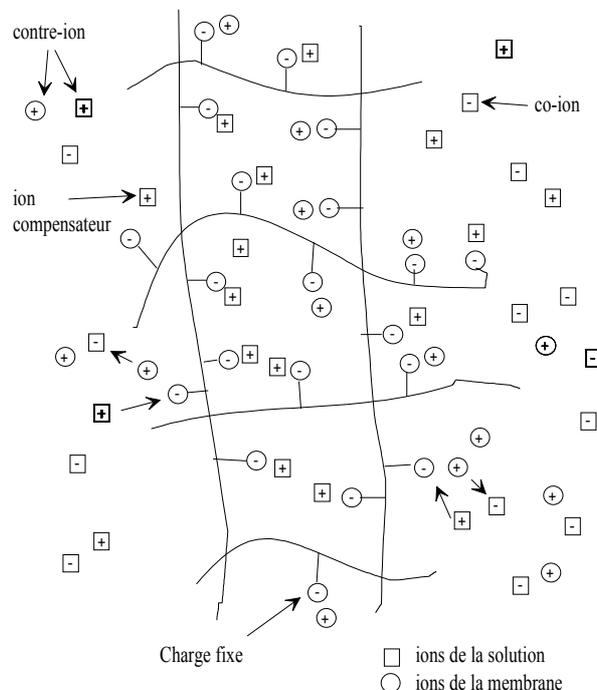


Figure AIII-2-3 : Principe des échanges dans une membrane cationique

Une cellule d'électrodialyse est constituée par deux électrodes entre lesquelles sont placées des membranes alternativement anioniques et cationiques. Sous l'effet du gradient de potentiel électrique les charges se déplacent en direction des électrodes. Les anions traversant une membrane anionique sont ensuite bloqués par la membrane cationique. Le même phénomène a lieu pour les cations. Ceci conduit à une désionisation de la solution contenue dans certains compartiments et du chargement en ions des autres.

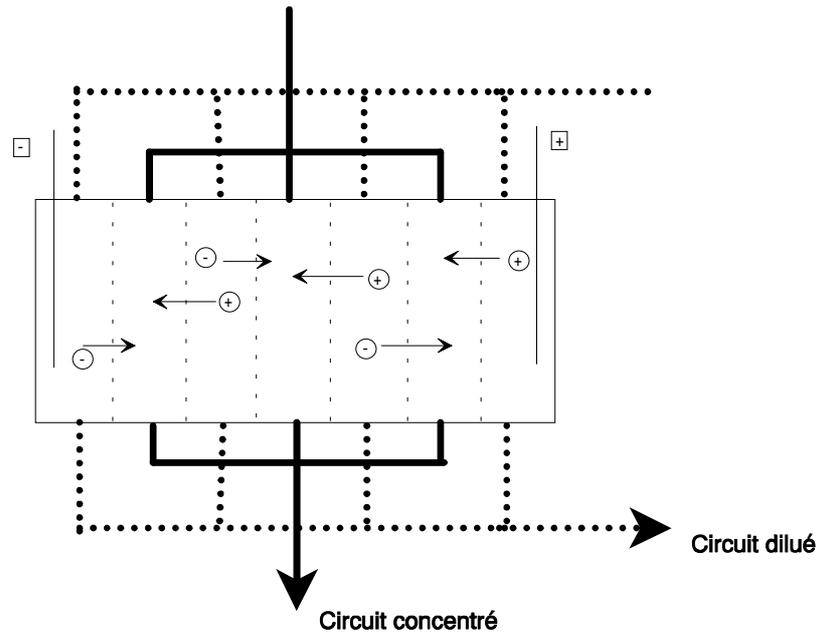


Figure AIII-2-4 : Principe de fonctionnement d'une cellule d'électrodialyse

L'électrodialyse est donc une technique qui peut être utilisée pour extraire des ions d'un bain de rinçage, par exemple, ces ions pouvant alors être dirigés vers le bain de traitement en faisant passer celui-ci dans le circuit concentré.

Les principaux paramètres qui vont influencer la faisabilité d'un traitement par électrodialyse sont :

- la tenue des membranes,
- la capacité d'échange,
- le nombre de transport des ions, (fraction de l'électricité transportée due à un ion donné; dans le cas d'une membrane cationique idéale la somme des nombres de transport des cations est un)
- la permsélectivité, (représente la capacité de la membrane à faire passer sélectivement une espèce; elle vaut 1 lorsque seule l'espèce considérée peut traverser et 0 lorsque les transferts d'espèce ont lieu dans des proportions équivalentes à celles des espèces en solution)
- la perméabilité hydraulique.

Electrodialyse à membrane dipolaire

Un cas particulier d'électrodialyse utilise des membranes dipolaires constituées par l'association d'une couche anionique et d'une couche cationique. A l'interface entre ces deux membranes a lieu une réaction de dissociation de l'eau ($\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$). Ce dispositif permet de régénérer un acide et une base. Il produit éventuellement en parallèle des déchets (boues d'hydroxydes par exemple) liés à la présence de cations métalliques, qu'il faut éliminer. L'électrodialyse à membrane dipolaire ne permet donc pas nécessairement d'atteindre l'objectif de "zéro déchet".

5) Electrolyse à membrane

L'électrolyse à membrane ou électro-électrodialyse est une technique particulière d'électrolyse à compartiment séparés faisant intervenir une membrane permselective. L'intérêt de la méthode est de supprimer les flux ioniques parasites responsables d'une baisse de rendement dans les opérations électrolytiques. Ainsi, dans le cas de la régénération de l'acide chromique, la réaction recherchée est l'oxydation du chrome III en chrome VI. Dans le cas d'une électrolyse classique, cependant, la réaction inverse a lieu à la cathode. En plaçant une membrane cationique entre les deux électrodes on empêche la migration des ions chromiques et, du même coup, la réaction parasite.

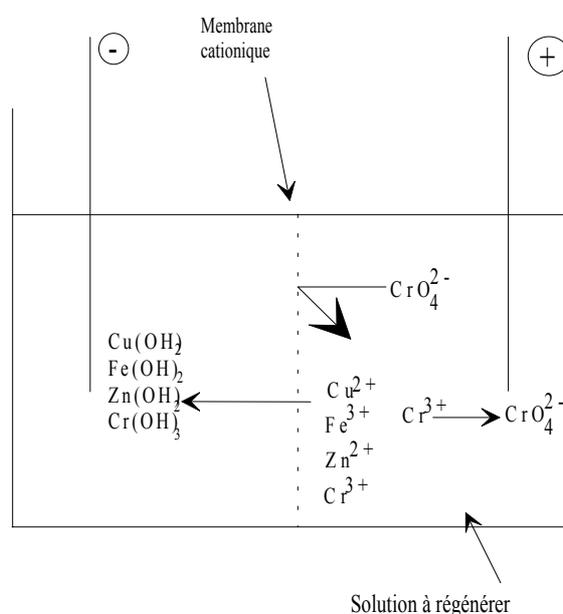


Figure AIII-2-5 : principe de l'électrolyse à membrane

L'électrolyse à membrane peut donc être appliquée chaque fois que l'électrolyse présente un intérêt mais se révèle impossible en raison de phénomènes liés à la présence de certains ions aux deux électrodes.

Les paramètres importants sont à la fois ceux de l'électrolyse (caractère électrodéposable des métaux,...) et ceux de l'électrodialyse.

6) Osmose inverse

L'osmose inverse est une technique déjà ancienne, principalement appliquée au dessalement d'eau de mer. Un dispositif d'osmose inverse est constitué par deux compartiments séparés par une membrane perméable uniquement à l'eau contenant une solution concentrée d'une part et de l'eau pure ou une solution diluée d'autre part. On applique à la solution concentrée une pression P supérieure à la pression osmotique π pour inverser le flux naturel de l'eau.

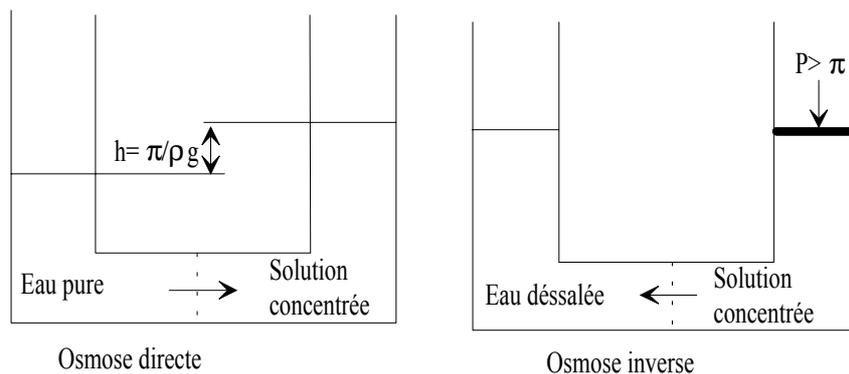


Figure AIII-2-6 : principe de l'osmose directe et de l'osmose inverse.

La pression osmotique π est approximativement proportionnelle à la différence de concentration entre les deux solutions, et le flux d'eau entre les deux compartiments varie en fonction de la différence $P - \pi$. Les pressions utilisées en osmose inverse sont généralement situées entre 20 et 80 bars^[Huchon 87].

L'osmose inverse constitue essentiellement une technique de concentration. Dans le domaine de la valorisation des effluents de traitement de surface, elle peut permettre de valoriser des bains statiques en les concentrant avant leur réutilisation comme complément de bains de traitement. Cependant le coût de mise en oeuvre de cette technique la rend de moins en moins

compétitive par rapport à d'autres techniques (électrodialyse notamment) ayant des applications similaires. L'osmose inverse est donc actuellement en déclin^[ADIT 95].

7) Filtration liquide solide

Il existe de nombreux procédés de filtration parmi les deux principales catégories suivantes :

- filtration sur support :

dans ce type de filtration, la suspension passe à travers un support (grille, toile, membrane...). Les particules retenues forment progressivement un gâteau qui participe progressivement à l'effet filtrant. La taille des particules, la texture du support et le temps influencent l'efficacité de l'opération.

- filtration en profondeur :

Dans ce cas, le filtre est constitué par une masse poreuse dans les anfractuosités de laquelle les particules à séparer se déposent. Les particules déjà déposées participent autant que le filtre lui-même à l'effet filtrant. Les paramètres importants sont : la texture de la masse filtrante, l'épaisseur de la couche filtrante, la forme et la granulométrie des particules en suspension, les propriétés physico-chimiques des particules et du filtrat, le temps, le débit...

8) Micro, ultra et nano filtration

Ces techniques de filtration permettent de séparer des particules très petites ou des macromolécules en solution ou en émulsion dans une solution aqueuse. Elles se distinguent par la taille des particules qu'elles peuvent retenir (figure 7).

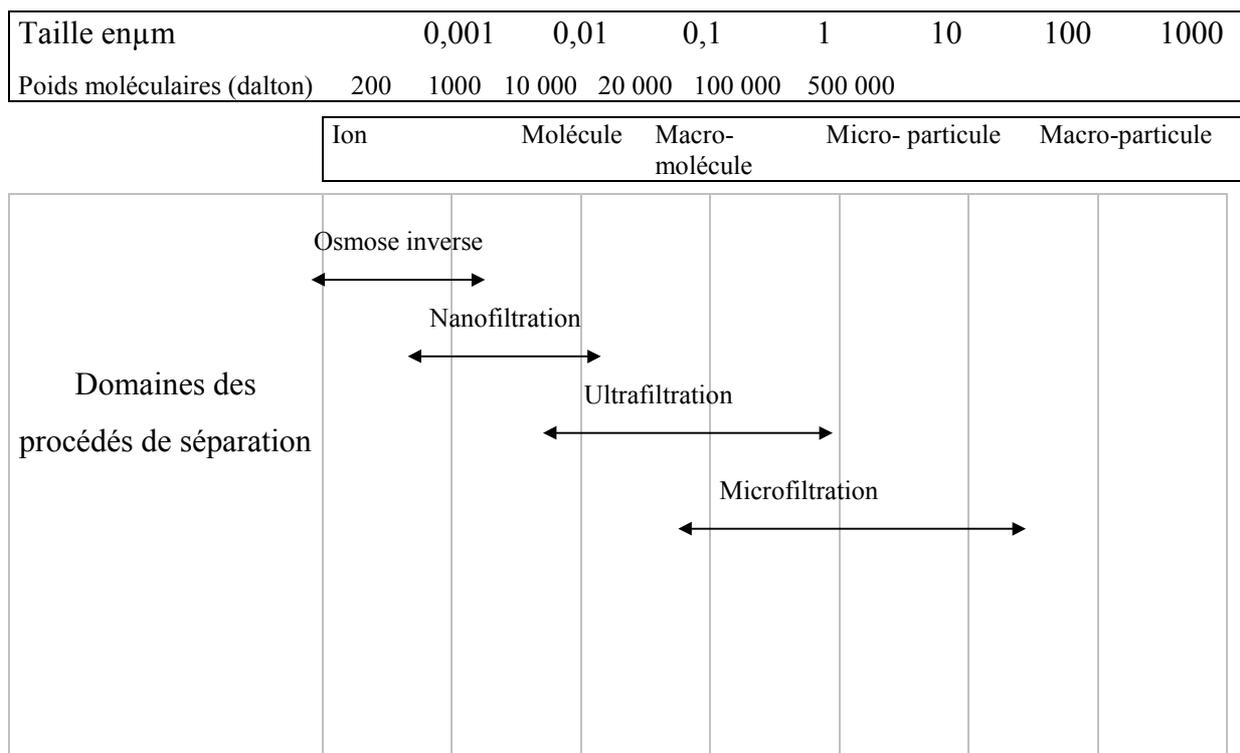


Figure AIII-2-7 : Techniques de séparation en fonction du type de particules retenues^[ADIT 96]

Dans le domaine du traitement d'effluents issus du traitement de surface, c'est principalement l'ultrafiltration qui est utilisée. Elle permet par exemple d'éliminer les graisses des bains de dégraissage.

9) Cémentation

La cémentation est rarement utilisée sauf pour la récupération des métaux précieux. Il s'agit d'introduire un métal réducteur dans la solution sous forme d'une poudre par exemple. On assiste alors à une réaction d'oxydoréduction conduisant à l'oxydation (donc au passage en solution) du métal ajouté et à la réduction du métal que l'on souhaite récupérer, qui est ensuite séparé par filtration.

10) Evaporation

L'évaporation est une technique de concentration d'effluents et de régénération d'eau. On a souvent recours à l'évaporation sous vide, qui permet d'abaisser la température d'ébullition de l'eau. Ceci permet d'éviter des difficultés qui pourraient apparaître aux alentours de 100 °C comme la cristallisation de certains sels ou la détérioration de réactifs mais aussi d'améliorer le rendement énergétique de l'opération.

Un évaporateur est généralement composé d'une cuve fermée dans laquelle passe un circuit de chauffage en bas (eau chaude ou vapeur) et de refroidissement en haut. Une pompe permet de faire un vide partiel.

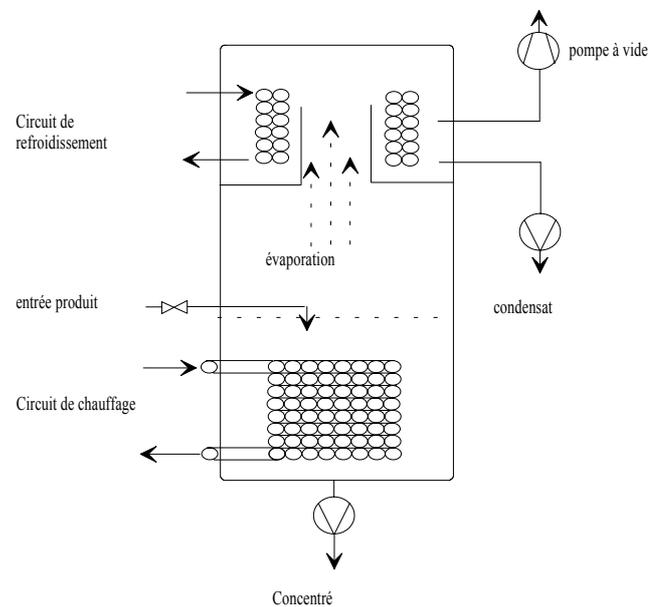


Figure AIII-2-8 : schéma de principe d'un évaporateur sous vide [Linnhoff 93]

Références bibliographiques

- [ADEME 94] *La lettre de l'Ademe, n° Spécial Sites Pollués*, Paris : Ademe, 1994, 55 p.
- [ADEME 95] *Les procédés de traitement des déchets industriels solides et liquides*, Angers : Ademe, 1995, 42 p. et 68 dossiers procédés.
- [ADIT 94] ADIT, *Le traitement des effluents liquides par séparation sur membrane*, Décision et technologies, Paris : ADIT, 1994, 150 p.
- [AFB-AP 92] *Guide des déchets industriels spéciaux*, Douai : Agence de l'eau Artois Picardie, 1992, 54 p.
- [AFB-LB 92] *Mesure de la qualité des cours d'eau*, Orleans : Agence de l'eau Loire-Bretagne, Septembre 1992, 573 p.
- [AGHTM 85] *Les résidus Urbains, Vol 2 : traitement et valorisation*, Paris : Lavoisier, 1985, 437 p.
- [ANRED 88] *Les déchets des industries de traitement de surface*, Angers : ANRED, 1988, 252 p.
- [Belakhowsky 78] S. Belakhowsky, *Introduction aux combustibles et à la combustion*, Paris : Techniques et documentation, 1978, 385 p.
- [Breton 88] M. Breton et al., *Treatment technologies for solvent containing wastes*, New Jersey : Noyes Data Corporation, 1988, 753 p.
- [Breuil 92] JN. Breuil, C. Demanze, "Les impératifs environnement en traitement de surface", *Surfaces*, 1992, vol. 233, p. 16-21
- [BRGM 95] BRGM et Ministère de l'environnement, *Gestion des sites (potentiellement) pollués, guide méthodologique*, Orléans la Source : BRGM éditions, 1995, non paginé.
- [Brown 89] C.J. Brown, "La récupération des acides de décapage", *Galvano-organo-traitements de surface*, 1989, n°593, p. 211-213.
- [Brun 89] J.P. Brun, *Procédés de séparation par membranes*, PARIS : MASSON, 1989, 270 p.
- [CETIM 95] J.M. Muiras, B. Sutter, *Traitements de surface, techniques de réduction des déchets*, Senlis : CETIM, 1995, 134 p.
- [CETIM 95-1] *Guide des technologies propres et des filières de traitement des déchets, industries mécaniques*, Saint-Etienne : CETIM, 1995, 394 p.

Références bibliographiques

- [DALIAN 95] F. Cazalas, *Comment traiter les déchets et réduire les rejets en milieu industriel*, Paris : Dalian éditions, 1995. non paginé.
- [Degrémont] *Mémento technique de l'eau*, Paris : Degrémont, distribué par Lavoisier, 1989, 1459 p.
- [Bligny-Morel 95] M. Bligny-Morel, "Chromage dur : La réglementation", *Chromage dur, techniques, marchés et procédés concurrents, Saint-Etienne, 10-12 mai 1995, Recueil des conférences*, Grenoble : CRITT-ADTS, 1995, p.11-19.
- [DRIRE-RA 91] DRIRE Rhône-Alpes, *Traitement des déchets industriels en Rhône Alpes*, Lyon : DRIRE Rhône Alpes, 1991, 23 p.
- [Ermine 93] J.L. Ermine, *Génie Logiciel et génie cognitif pour les systèmes à base de connaissance, Volume 1*, Paris : Technique et documentation, Lavoisier, 1993, 184 p.
- [Finet 91] C. Finet, "L'incinération des déchets et son adaptation à la réglementation européenne", *TSM - l'Eau*, 1991, n°1, p.16-20.
- [Galaup 96] S. Galaup et C. Baudoin, "Droit et politique des déchets industriels analyse comparative de six stratégies nationales en Europe", *Déchets science et techniques*, 1996, n° 1, p.4-8.
- [Garcin 93] J.L. Garcin et P. Girod, *Code pratique des déchets*, Paris : Le Moniteur, 1993, 319 p.
- [Gardais 90] D. Gardais, *Environnement et électricité, les procédés électriques de traitement des rejets industriels*, Collection Electra, Avon : DOPEE 85, 1990, 701 p.
- [Gaujous 93] D. Gaujous, *La pollution des milieux aquatiques*, Paris : Technique & Documentation, 1993, 212 p.
- [Geldron 95] A. Geldron, "Inventaire des DIS", *La Lettre de l'Ademe, Déchets industriels spéciaux*, Paris : Ademe, sept 1995, p.14-15.
- [Gernath 91] E. Gernath, "Purification des bains fluonitriques de décapage des aciers inoxydables", *Galvano-organo traitements de surface*, dec 1991, n°621, p. 1130-1132.
- [Grange] D. Grange et Y.Pellet, "Système de purification et de recyclage des bains pour le chromage ou l'anodisation", documentation commerciale, Andrézieux Bouthéon, Société Matériel Perrier, 1993, 11 p.
- [Grange 94] D. Grange, "Traitement de surface : gestion de l'eau en production, thème électrolyse", Paris : Office International de l'Eau, SMP, 1994, 26 p.
- [Harpet 96] C. Harpet, "Le déchet, matière à réflexion", *Déchets, sciences et techniques*, 1996, n°1, p.11-12.

Références bibliographiques

- [Huchon 87] J. Huchon, M. Mietton-Peuchot et F. Quemeneur, "Séparation par membrane", *Procédés électriques de séparation*, ed. S. Lefeuvre, Avon : DOPEE85, 1987, p. 19-73.
- [IFEN 93] INSTITUT FRANCAIS DE L'ENVIRONNEMENT, "Le cadre conceptuel des observatoires de l'environnement", *Séminaire Observatoires, Orléans, 25-26 novembre 1993*, 28 p.
- [Jeanneret 90] G. Jeanneret, "Extraction et recyclage des métaux lourds et précieux", *Surfaces*, 1990, n°218, p.22-28.
- [Lachevre 95] J.P. Lachevre, "Nouveaux procédés de traitement des effluents industriels provenant des ateliers de traitement de surface", *Récents progrès en Génie des procédés*, 1995, Vol. 9, n° 43, p. 37-42.
- [Lacourcelle] L. Lacourcelle, "Information à l'usage du concepteur, évolution du bain", *Galvano-Organo*, Fiche technique n°20, 1990, encart, 2p.
- [Lamy 95] sous la direction de C. London, *Lamy Environnement, les déchets* , Paris : Lamy SA, 1995. non paginé.
- [Leduc 96] M. Leduc, *Industries du traitement de surface : contribution à la réduction de la pollution* , Diplôme d'études approfondies, Saint-Etienne : EMSE-INSA de Lyon, juillet 1996, 50 p.
- [Legrand 83] B. Legrand, *Rapport fait au nom de la commission de contrôle des services publics responsables de l'application des dispositions concernant les déchets industriels toxiques, créée en vertu de la résolution adoptée par le sénat le 20 décembre 1983*, Paris : Sénat, 1984, N°408,146 p.
- [Leroy 94] J.B. Leroy, *Les déchets et leur traitement*», Collection Que sais-je ?, Paris : Presses universitaires de France, 1981 révisé 1994, 127 p.
- [Lévine 89] P. Lévine et J.C. Pomerol, *Systèmes interactifs d'aide à la décision et systèmes experts*, Paris : HERMES, 1989, 335 p.
- [Lieurade 95] H.P. Lieurade et G. Richard, "Veille, conseils et diagnostics", *CETIM-Informations*, Février 1995, n°142, p. 2-5.
- [Linnhoff 93] F. Linnhoff, "Utilisation de la technique d'évaporation sous vide dans l'atelier de galvanoplastie", *Surfaces*, 1993, n°239, p.33-40.
- [London 96] C. London, "La notion juridique de déchet ou quelques interrogations d'ordre sémantique", *Déchets, sciences et techniques*, 1996, n°1, p.8-10.

Références bibliographiques

- [Lumbroso 92] R. Lumbroso, "Point sur l'application industrielle des résines échangeuses d'ions dans les traitements de surfaces", *SURVERT, Journées d'étude environnement, traitements de surfaces et technologies*, Paris : Ampère, 1992, p. 64-88.
- [MATHERON 94] J.P. Matheron, *Comprendre Merise, outils conceptuels et organisationnels*, Paris : Eyrolles, 1994, 265 p.
- [Mayeux 96] V. Mayeux et Y. Perrodin, "Ecocompatibilité des déchets : vers une prise en compte de la notion d'impact pour l'élimination et la valorisation des déchets", *Déchets, sciences et techniques*, 1996, n° 3, p. 10-18.
- [Maystre 94] L.Y. Maystre et al., *Déchets urbains, nature et caractérisation*, Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 1994, 220 p.
- [Min. Env 85] *Traitement de surface : dépollution à la source*, *Cahiers Techniques de la Direction de la Prévention des Pollutions*, 1985, n°18, 112 p.
- [Min. Env 82] *Guide pour l'élimination et la valorisation des déchets industriels*, *Cahiers Techniques de la Direction de la Prévention des Pollutions*, 1982, n°8, 154 p.
- [MIN.ENV 93] *Cartographie de la pollution industrielle*, Neuilly : Ministère de l'environnement, Direction de la prévention des pollutions et des risques, 1993, 89 p.
- [MIN.ENV 94] *Recensement des sites et sols pollués, Etat au 30 septembre 1994*, Neuilly : Ministère de l'environnement, Direction de la prévention des pollutions et des risques, 1994, 277 p.
- [Munier] B. Munier, "Décision", *Encyclopaedia Universalis*, édition de 1995, corpus 7, 1995, pp. 74-80.
- [Navarro 94] A. Navarro et al. "Gestion et traitement des déchets", *Techniques de l'ingénieur, traités généralités et construction*, A8660-C4260, 1994, 32 p.
- [Navarro 95] A. Navarro et al. "Gestion des Déchets", *Lamy environnement, Les déchets*, LAMY, 1995, études 205 à 265, non paginé.
- [NF X30-200] Norme Française X30-200, *Système de management environnemental*, Paris : AFNOR, 1993, 11 p.
- [Nicolazo 94] J.L. Nicolazo, *Les agences de l'eau*, Paris : Pierre Johanet et fils éditeurs, 1994, 207 p.
- [O.F.E.F.P. 87] *Traitement et solidification des résidus de l'incinération*, n° 62. Berne : OFEFP, 1987, 65 p.

Références bibliographiques

- [Peters 84] R.W. Peters, Y.Ku and D.Bhattacharyya, "The effect of chelating agents on the removal of heavy metals by sulfide précipitation", *proceedings of the 16th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*, 1984, p.289-317.
- [Peters 85] R.W. Peters, Y. Ku, and D. Bhattacharyya, "Evaluation of recent treatment techniques for removal of heavy metals from industrial wastewaters", *AIChE Symposium Series, Separation of Heavy Metals*, 1985, vol. 81, n°243, p.165-203
- [Pierrat 94] A. Pierrat, "La régénération des solvants industriels usés", *L'eau, l'industrie, les nuisances*, 1994, n° 178, p.59-61.
- [Pourbaix 63] M. Pourbaix, *Atlas d'équilibres électrochimiques à 25 degrés*, Centre belge d'étude de la corrosion CEBELCOR, Paris : Gauthier-Villars et cie éditeur, 1963, 644 p.
- [PREDIRA] *Plan Régional pour l'Élimination des Déchets Industriels en Rhône-Alpes*, Charbonnières-les-bains : Conseil régional Rhône-Alpes, 1993, 33 p.
- [R.E.C.O.R.D. 94] F. Colin, J. De Graeve, C. Roulph, J. Vialle, *Déontologie de la métrologie en environnement : contraintes et limites de la métrologie appliquée aux déchets*, Villeurbanne : association R.E.C.O.R.D. 1994, 441 p., Rapport final du contrat n° 93-103.
- [Rialhe 93] A.Rialhe, R. Lumbroso, "Régénération d'une solution de décapage sulfurique du fer par électro-électrodialyse", *Galvano-Organo Traitement de surface*, dec. 1993, n°641, p. 1079-1086.
- [ROUSSEAU 93] P. Rousseau, *Évaluation comparative de l'impact environnemental global du cycle de vie des produits*, Thèse de doctorat en Gestion et Traitement des Déchets, Villeurbanne : INSA de Lyon, 1993, 276 p.
- [Simon 80] Herbert Simon, *Le nouveau management, la décision par les ordinateurs*, Paris : ECONOMICA, 1980, 159 p.
- [Soares 94] Roberto Soares, *Conception et évaluation d'un système à base de connaissances pour l'élimination de déchets*, thèse de doctorat en Gestion et Traitement des Déchets, LAEPSI, Villeurbanne : INSA de Lyon, 1994, 193 p.
- [Thompson 94] Michael Thompson, "Blood, sweat and tears", *Waste Management and Research*, 1994, vol 12, N° 3, p. 199-205
- [Tyteca 94] Daniel Tyteca, "On the measurement of environmental performance in firms - Literature review and productive efficiency approach", *Resources for the future*, Washington, DC, 1994, 36 p. , Discussion paper 94-28.

Références bibliographiques

- [UNEP 85] *Treatment and disposal methods for waste chemicals*, International Register of Potentially Toxic Chemicals, Programme environnement des Nations Unies, Genève : ONU, 1985, 303 p. , Publication n° E. 85. III.D.2.
- [Vogel 88] C. Vogel, *Génie cognitif*, Paris : Masson, 1988, 196 p.
- [WMTADS] Los Alamos National Laboratory, *DOE Mixed Waste Technical Analysis*, juillet 1996, <http://mwir.lanl.gov/>, [consulté en mars 1997]
- [Wrzecian 83] M. Wrzecian, *Recueil de formules de galvanoplastie*, Paris : éditions Galvano-Organico, 1983, 181 p.

Références réglementaires

- Loi 92-646 du 13-jul-92** : Modification de la loi 75-633 du 15-07-75 sur l'élimination des déchets et la récupération des matériaux, JO du 14-jul-92
- Loi 90-1130 du 19-déc-90** : Création de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie J.O. du 22-déc-90
- Loi 84-103 du 16-fév-84** : Modification de la loi 75 633 du 15 juillet 1975 : J.O. du 17-fév-84
- Loi 80-531 du 15-jul-80** : Economies d'énergie et utilisation de la chaleur J.O. du 26-jul-80
- Loi 76-663 du 19-jul-76** : Installations classées pour la protection de l'environnement, J.O. du 20-jul-76
- Loi 75-633 du 15-jul-75** : Elimination des déchets et récupération des matériaux : J.O. 16-jul-75
- Loi 64-12-45 du 16-déc-74** : Régime de répartition des eaux et lutte contre la pollution
- Loi 74-908 29-oct-74** : Economies d'énergie J.O. du 31-oct-74
- Loi 74-415 du 13-mai-74** : Contrôle d'émissions polluantes dans l'atmosphère et utilisation d'énergie
- Loi 61-842 du 02-avr-61** : Lutte contre la pollution atmosphérique et les odeurs
- Instruction technique** : Protocole provisoire d'évaluation des déchets massifs et solidifiés (diponible sur demande auministère de l'environnement)

Instruction technique du 22-jan-80 : Mise en décharge des déchets industriels J.O. du 21-fév-80

Directive CEE 92/3/Euratom du 03-fév-92 : Surveillance et contrôle des transferts de déchets radioactifs entre Etats membres ainsi qu'à l'entrée de la Communauté, J.O.C.E. du 12-fév-92

Directive CEE 91/689 du 12-déc-91: Déchets dangereux, J.O.C.E. du 31-déc-91

Directive CEE 91/156 du 18-mar-91 : Piles et accumulateurs contenant certaines matières dangereuses J.O.C.E. du 26-mar-91

Directive CEE 84/631 du 06-déc-84 : Transferts frontaliers de déchets dangereux J.O.C.E. du 13-déc-84

Directive CEE du 06-avr-76 : Elimination des chlorobiphényles et polychloroterphényles J.O.C.E. du 26-avr-76

Directive CEE 75/442 du 15-jul-75 : Déchets, J.O.C.E. du 25-jul-75

Décret n° 97-517 du 15 mai 1997 relatif à la classification des déchets dangereux, J.O. du 23 mai 1997

Décret 93-140 du 03-fév-93 : Plans d'élimination des déchets autres que les déchets ménagers et assimilés J.O. du 04-fév-93

Décret du 27-août-92 : Publication de la convention sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et leur élimination, faite à Bâle le 22 mars 1989, J.O. du 02-sep-92

Décret 92-798 du 18-août-92 : Modification et complément au décret n°90-267 du 23 mars 1990 relatif à l'importation, à l'exportation et au transit des déchets générateurs de nuisances, J.O. du 19-août-92

Décret 90-267 du 23-mar-90 : Importation, exportation et transit des déchets générateurs de nuisances, J.O. du 27-mar-90

Décret 87-59 du 02-fév-87 : Mise sur le marché, utilisation et élimination des chlorobiphényles et polychloroterphényles J.O. du 04-fév-87

Décret 85-217 du 13-fév-85 : Contrôle des produits chimiques, J.O. du 17-fév-85

Décret 77-1133 du 21-sep-77 : Application de la loi 76-663 sur les installations classées pour la protection de l'environnement et de l'article 1 de la loi 64-1245 J.O. du 08-oct-77

Décret 77-974 du 19-août-77 : Informations à fournir au sujet des déchets générateurs de nuisances

Références bibliographiques

Décret du 20-mai-53 : Nomenclature des activités classées pour la protection de l'environnement, J.O. du 20-jun-53

Décision de la CE 93/3/CE du 20-déc-93 : Liste des déchets en application de l'article 1er point a) de la directive 75/442/CEE du Conseil relative aux déchets, J.O.C.E. 07-jan-94

Circulaire ministérielle du 16-mar-93 : Conditions d'application des arrêtés ministériels relatifs aux stockages de certains déchets industriels, J.O. du 30-mar-93

Circulaire ministérielle 92-13 du 19-fév-92 : Installations classées : études déchets

Circulaire ministérielle 91-59 du 16-jul-91 : Elimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse

Circulaire ministérielle 90-98 du 28-déc-90 : Installations classées pour la protection de l'environnement. Etudes déchets.

Circulaire ministérielle du 24-mar-89 : Centres de traitement de déchets industriels. Contrôles inopinés

Circulaire ministérielle du 09-jan-89 : Dépôts de déchets toxiques ou dangereux et rôle des pouvoirs publics

Circulaire ministérielle 12-86 du 11-mar-86 : Installations classées pour la protection de l'environnement - Arrêté type relatif aux PCB et PCT

Circulaire ministérielle du 24-oct-85 : Production de déchets industriels. Amélioration des études d'impact et de dangers. Dispositions à imposer aux producteurs de déchets.

Circulaire ministérielle du 30-sep-85 : Installations utilisant ou mettant en oeuvre des polychlorobiphényles (PCB) J.O. du 06-fév-86

Circulaire ministérielle du 30-août-85 : Installations de transit, regroupement et prétraitement de déchets industriels J.O. du 17-déc-85

Circulaire ministérielle du 07-août-85 : Cessation d'activité et remise en état des lieux

Circulaire ministérielle du 04-jun-85 : Contrôle des circuits d'élimination des déchets générateurs de nuisance

Circulaire ministérielle du 16-oct-84 : Mise en décharge des déchets industriels

Circulaire ministérielle du 26-jun-80 : Collecte, élimination et valorisation des déchets industriels

Avis du 16-mai-85 : Nomenclature des déchets, J.O. du 16-mai-85

Arrêté du 10 octobre 1996 : Installations spécialisées d'incinération et installations de coïncinération de certains déchets industriels spéciaux, J.O. du 16 octobre 1996.

Références bibliographiques

Arrêté du 18-fév-94 : Modification de l'arrêté du 18 décembre 1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour des installations existantes J.O. du 26-avr-94

Arrêté du 01-mar-93 : Prélèvement et consommation d'eau - Rejets de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation J.O. du 28-mar-93

Arrêté du 18-déc-92 : Stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés : installations existantes J.O. du 16-avr-93

Arrêté du 18-déc-92 : Stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés : installations nouvelles J.O. du 30-mar-93

Arrêté du 16-jul-91 : Elimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse J.O. du 02-oct-91

Arrêté du 23-mar-90 : Documents et formalités nécessaires à l'importation, à l'exportation et au transit de déchets générateurs de nuisances, J.O. du 27-mar-90

Arrêté du 01-mar-90 : Programme de réduction, en vue de sa suppression, de la pollution provoquée par les déchets de l'industrie du dioxyde de titane J.O. du 27-avr-90

Arrêté du 29-sep-87 : Utilisation des polychlorobiphényles et polychloroterphényles, J.O. du 27-déc-87

Arrêté du 26-sep-85 : Ateliers de traitements de surfaces, J.O. du 16-nov-85

Arrêté du 04-jan-85 : Contrôle des circuits d'élimination des déchets générateurs de nuisances J.O. du 16-fév-85

Arrêté du 05-jul-83 : Importation des déchets toxiques et dangereux, J.O. du 02-août-83

Liste des figures

<i>Plan schématique de la thèse</i>	17
<i>Figure I-1 : définition fonctionnelle des déchets</i>	23
<i>Figure I-2 : cycle de vie du déchet</i>	26
<i>Figure I-3 : cycle énergétique du verre^[Navarro 95]</i>	30
<i>Figure I-4 : Carte des centres collectifs de traitement</i>	36
<i>Figure I-5 : Evolution de la redevance pollution pour l'agence de l'eau Loire Bretagne (les matières inhibitrices sont essentiellement les métaux lourds, le cyanure, les phénols)</i>	43
<i>Figure I-6 : structure du serveur WMTADS</i>	60
<i>Figure II-1 : Caractérisation et évaluation d'une action^[IFEN 93]</i>	79
<i>Figure II-2 : Liens entre catégories de déchets et filières de traitement représentatifs de la finalité des filières</i>	87
<i>Figure II-3 : Association entre catégories de déchets et filières de traitement résultant de l'approche réglementaire, exemple des sables de fonderie.</i>	91
<i>Figure II-4 : Flux de matière au sein d'une filière de traitement</i>	96
<i>Figure II-5 : Extrait de la classification des déchets mise en place dans notre système d'aide à la décision.</i>	105
<i>Figure II-6 : Sélection de la liste de centres susceptibles de traiter le déchet après une identification incomplète</i>	106
<i>Figure II-7 : Constitution de la liste de solutions candidates et élimination des solutions incompatibles en fonction des critères d'acceptation</i>	107
<i>Figure II-8 : Entité filière.</i>	109
<i>Figure II-9 : Entité centre de traitement et ses relations avec d'autres entités du modèle* .</i>	110
<i>Figure II-10 : Relations de conventionnement</i>	110
<i>Figure II-11 : Entités et relations en rapport avec les textes réglementaires</i>	111
<i>Figure II-12 : Relations entre la classification des déchets et les deux niveaux de la nomenclature française.</i>	112
<i>Figure II-13 : paramètres numériques</i>	113
<i>Figure II-14 : Paramètres symboliques</i>	114
<i>Figure II-15 : Relations entre les critères, les paramètres et les seuils ou les valeurs acceptables.</i>	114
<i>Figure II-16 : Relation entre les types de déchets, les critères d'admission et les solutions de traitement (centres et filières)</i>	115
<i>Figure II-17 : Relation entre les types de déchets, les critères d'admission et les éléments de réponse (textes et remarques)</i>	115
<i>Figure II-18 : Déroulement schématique d'une session d'aide à la décision</i>	116
<i>Figure II-19 : Correspondance entre la classification arborescente des déchets et la nomenclature française, exemple des solvants halogénés.</i>	117
<i>Figure II-20 : Identification du déchet au moyen de la nomenclature française des déchets.</i>	127
<i>Figure II-21 : Identification des déchets au moyen de la classification arborescente.</i>	127
<i>Figure II-22 : Introduction des données numériques concernant le déchet.</i>	129
<i>Figure II-23 : Résultats des calculs effectués par l'outil (volume de fumée V_f, M/V_f)</i>	130
<i>Figure II-23 : Renseignements supplémentaires</i>	131

Figure II-24 : écran de résultat à l'issu d'une session	131
Figure II-25 : Carte des centres de traitement sélectionnés	132
Figure II-26 : résultat modifié après passage du chlore à 3%	133
Figure II-27 : écran de modification des liens entre catégories de déchets et centres de traitement.	134
Figure II-28 : exemple de critère d'acceptation (ici pour la cimenterie Lafarge à Frangey)	134
Figure III-1 : Flux de matière au sein d'une unité de production faisant apparaître le traitement interne et les différentes destinations des produits qu'il génère.	138
Figure III-2 : structure classique d'un atelier de traitement de surface	146
Figure III-3 : flux de matière au sein d'une chaîne de traitement de surfaces	147
Figure III-4 : exemple de station de traitement d'effluents nécessitant une opération d'oxydoréduction avant rejet	150
Figure III-5 : flux des données dans la première partie du module de diagnostic	166
Figure III-6 : phénomènes pris en compte dans le calcul des facteurs d'entraînement et des facteurs de dilution	167
Figure III-7 : Solubilité des ions Al^{3+} et Cd^{2+} en fonction du pH	177
Figure III-8 : détermination des zones de précipitation des ions métalliques sur un graphe représentant la concentration en métaux M_i par rapport au pH	178
Figure III-9 étapes du calcul des quantités de réactifs pour une dépollution classique	180
Figure III-10 : lien support de la base de solution potentielles*	182
Figure III-11 : Structure des données intervenant dans l'identification d'une technique de récupération	189
Figure III-12 : structure de données relatives aux techniques de transformation applicables à la régénération des bains.	195
Figure III-13 : Description de la chaîne de traitement de surface	198
Figure III-14 : Proposition d'une formulation classique de bain pour une fonction de nickelage	199
Figure III-15 : Introduction et de modification la composition des bains	200
Figure III-16 : Identification des paramètres des bains incompatibles avec un rejet dans le milieu naturel en fonction de la réglementation.	201
Figure III-17 : Différentes étapes proposées pour la détoxification classique des bains et détermination des quantités de réactifs à mettre en oeuvre.	202
Figure III-18 : procédés de valorisation applicables au bain de cuivrage acide tirés de la base de cas.	203
Figure III-19 : exemple d'application de l'électrodialyse à un bain de cuivrage acide tiré de la base d'exemples.	203
Figure AII-7-1 : Composition des produits dans le cas de la distillation d'un mélange avec formation d'azéotrope	276
Figure AII-7-2 : Domaine d'utilisation de différents types d'évaporateurs ^[BRETON 88]	277
Figure AIII-2-1 : Rendements d'électrolyse en fonction de la concentration de métal en solution (sous forme de complexes cyanurés) ^[Grange 94]	293
Figure AIII-2-2 : principe d'utilisation des résines échangeuses d'ions pour la régénération d'un bain chromique (les pointillés correspondent à la régénération de la résine)	298
Figure AIII-2-3 : Principe des échanges dans une membrane cationique	299
Figure AIII-2-4 : Principe de fonctionnement d'une cellule d'électrodialyse	300

Figure AIII-2-5 : principe de l'électrolyse à membrane	301
Figure AIII-2-6 : principe de l'osmose directe et de l'osmose inverse.	302
Figure AIII-2-7 : Techniques de séparation en fonction du type de particules retenues ^[ADIT 96]	304
Figure AIII-2-8 : schéma de principe d'un évaporateur sous vide ^[Linnhoff 93]	305

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Classification des filières de traitement des déchets d'après Alain Navarro (1994)	34
Tableau I-2 : Nomenclature des filières (de traitement externe) conventionnées par l'agence de l'eau Artois Picardie	35
Tableau I-3 : Quantités de DIS traités dans les centres collectifs ^[ADEME 95]	37
Tableau I-4 : différences entre les sources documentaires étudiées.	53
Tableau II-1 : Liste des filières considérées	77
Tableau II-2 : Renseignements disponibles dans réglementation nationale	89
Tableau II-3 : critères d'admission des déchets en centres d'incinération en fonction des filières proposées	94
Tableau II-4 : Paramètres pris en compte dans les critères d'acceptation des déchets en centres de traitement	99
Tableau III-1: familles de déchets générés par le traitement de surfaces	145
Tableau III-2 : seuils de rejet autorisés par l'arrêté du 26 septembre 1985	148
Tableau III-3: évolution normale d'un bain de nickelage composé de sulfate de nickel, chlorure de nickel et acide borique après dépassivation chlorhydrique et rinçage insuffisant ^[Lacourcelle] . (* Les phénomènes d'apport dépendent naturellement de la qualité des bains précédents. Sans indication, il est impossible de les prévoir. Ici, le chlore provient d'un entraînement du chlore présent dans le bain précédent au même titre qu'une partie de l'évolution du pH.)	165
Tableau III-4 : techniques applicables à la récupération des composants d'un bain de traitement	189
Tableau III-5 : procédés appliqués à la régénération de bains contaminés	191
Tableau III-6 : procédés appliqués à la compensation de l'épuisement de bains	191
Tableau III-7 : exemples de données liant des techniques de valorisation aux composants des bains de traitement de surface dans la "base des transformations possibles" (nous ne présentons pas dans ce tableau les critères, qui peuvent être constitués de plusieurs conditions)	195
Tableau AII-4-1 : catégories de déchets admissibles en CET de classe I	251
Tableau AII-4-2 : catégories de sables de fonderie et filières d'élimination ou de valorisation autorisées.	256
Tableau AII-7-1 : taux de transfert des métaux dans les résidus solides ^{[OFEFP 87],[FINET 91]}	272
Tableau AII-7-2 : Inefficacité η (%)	273