



HAL
open science

Réduction des impacts environnementaux des ateliers de traitement de surface : application de stratégies de production plus propre et plus sûre

Gaëlle Raymond

► To cite this version:

Gaëlle Raymond. Réduction des impacts environnementaux des ateliers de traitement de surface : application de stratégies de production plus propre et plus sûre. Sciences de l'environnement. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2009. Français. NNT : 2009EMSE0044 . tel-00786001

HAL Id: tel-00786001

<https://theses.hal.science/tel-00786001>

Submitted on 7 Feb 2013

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

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

N°d'ordre : 554 SGE

THÈSE

présentée par

Gaëlle RAYMOND

pour obtenir le grade de
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Sciences et Génie de l'environnement

RÉDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES
ATELIERS DE TRAITEMENT DE SURFACE – APPLICATION DE
STRATÉGIES DE PRODUCTION PLUS PROPRE ET PLUS SÛRE

soutenue à Saint-Étienne, le 8 décembre 2009

Membres du jury

Président :	Jacques MÉHU	Professeur, INSA, Lyon
Rapporteurs :	Jacques BRÉGEON	Professeur, École Centrale, Paris
	Daniel FROELICH	Professeur, ENSAM, Chambéry
Examineur(s) :	Jean CANTET	Directeur de recherche, Anjou Recherche, Paris
Directeur(s) de thèse :	Valérie LAFOREST	Chargée de recherche (HDR), EMSE, Saint-Etienne
	Éric PIATYSZEK	Chargé de recherche, EMSE, Saint-Etienne
Invité(s) éventuel(s) :	Jean Marc MÉRILLOT	Chef de service, ADEME, Angers
	Roger FRAISSE	Chef d'entreprise, Sury le Comtal
	Sébastien FRAISSE	Chef d'entreprise, Sury le Comtal

Spécialités doctorales :

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables :

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS
 A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS
 G. THOMAS Professeur – Centre SPIN
 B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN
 J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE
 E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I
 O. BOISSIER Professeur – Centre G2I
 JC. PINOLI Professeur – Centre CIS
 P. BURLAT Professeur – Centre G2I
 Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BENABEN	Patrick	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
BERNACHE-ASSOLANT	Didier	PR 0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 2	Informatique	G2I
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	G2I
BOUDAREL	Marie-Reine	MA	Génie Industriel	DF
BOURGOIS	Jacques	PR 0	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BRODHAG	Christian	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	G2I
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 0	Génie des Procédés	DF
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DECHOMETS	Roland	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DELAFOSSE	David	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	G2I
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Mécanique & Ingénierie	SMS
DRIVER	Julian	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FEILLET	Dominique	PR 2	Génie Industriel	CMP
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
FORTUNIER	Roland	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	CR	Génie des Procédés	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	G2I
GOEURIOT	Dominique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GOEURIOT	Patrice	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUILHOT	Bernard	DR	Génie des Procédés	CIS
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
INAL	Karim	MR	Microélectronique	CMP
KLÖCKER	Helmut	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et Ingénierie	SMS
LI	Jean-Michel	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
LONDICHE	Henry	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
MOLIMARD	Jérôme	MA	Mécanique et Ingénierie	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 1	Image, Vision, Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFNICKI	Konrad	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	DF
THOMAS	Gérard	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
VALDIVIESO	François	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VAUTRIN	Alain	PR 0	Mécanique & Ingénierie	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	MR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR 1	Génie industriel	CIS

Glossaire :

PR 0 Professeur classe exceptionnelle
 PR 1 Professeur 1^{ère} catégorie
 PR 2 Professeur 2^{ème} catégorie
 MA(MDC) Maître assistant
 DR (DR1) Directeur de recherche
 Ing. Ingénieur
 MR(DR2) Maître de recherche
 CR Chargé de recherche
 EC Enseignant-chercheur
 IGM Ingénieur général des mines

Centres :

SMS Sciences des Matériaux et des Structures
 SPIN Sciences des Processus Industriels et Naturels
 SITE Sciences Information et Technologies pour l'Environnement
 G2I Génie Industriel et Informatique
 CMP Centre de Microélectronique de Provence
 CIS Centre Ingénierie et Santé

Dernière mise à jour le : 22 juin 2009

REMERCIEMENTS

R comme Recherche au centre SITE. En premier lieu, je souhaite vivement remercier M. Didier Graillot, directeur du centre SITE de l'ENSM-SE, pour m'avoir accueillie dans son équipe pendant ces trois ans mais également pour les réunions d'analyse multicritère qui ont contribué grandement à cette thèse.

E comme Encadrement. Je tiens à faire part de ma gratitude à Mme Valérie Laforest, chargée de recherche à l'ENSM-SE et directrice de recherche de cette thèse, pour avoir veillé à son bon déroulement, pour la qualité de son encadrement et sa patience, Je lui sais gré de m'avoir accordé sa confiance, et apporté son soutien.

Ma profonde reconnaissance va à M. Éric Piatyszek, chargé de recherche à l'ENSM-SE, co-directeur de thèse, pour son aide précieuse, la pertinence de ses remarques et sa grande disponibilité. Je le remercie d'avoir contribué à me faire progresser durant ces trois ans.

E comme Examineurs : Je désire remercier M. Jacques Méhu, professeur à l'INSA de Lyon et M. Jean Cantet, directeur de recherche d'ANJOU Recherche pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

R comme Rapporteurs : Mes remerciements vont également à M. Jacques Brégeon, Professeur à l'École Centrale de Paris et M. Daniel Froelich, Professeur à l'ENSAM de Chambéry, de me faire l'honneur d'en être les rapporteurs.

C comme Cluster de recherche de la région Rhône Alpes. Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien financier de la Région Rhône Alpes, et plus particulièrement l'appui du Cluster Environnement. Cette thèse faisant partie de l'appel à projets ADEME 2005, je remercie également M. Jean Marc Mérillot, directeur de recherche de l'ADEME pour son expertise dans ce travail.

I comme Industriels. Ce projet de thèse n'aurait pu être mené à bien sans une étroite collaboration avec messieurs Roger, Sébastien et Christian Fraisse, André Dupuy et M^{elle} Delphine Tissot, mes interlocuteurs principaux dans les entreprises SFTS, La Boule OBUT et GALVALOIRE. Je les remercie pour le temps qu'ils m'ont accordé.

E comme Équipe : J'adresse mes remerciements à toute l'équipe du centre SITE pour leur accueil et cette chaleureuse ambiance qui anime le centre. Les précieux conseils de Zahia Mazer, les encouragements de Florence Dujardin et les bons moments passés avec les doctorants (Caroline, Aurélie, Ibtissam, Mamy, et bien d'autres...) et amis de passage (Ying, Hanan,...) ont contribué à la réussite de ce travail. Merci à Henry Londiche et Georges Karagiannis pour les corrections très utiles apportées à ce manuscrit, Enfin, j'associe Gabrielle Bruyas, et Alain Mounier du 6^{ème} à ces remerciements pour les discussions chaleureuses.

M comme Massenet Fourneyron. Mes sincères remerciements vont également à Mme Brigitte Mondon, M. Michel Cauchois, M. Nicolas Ingrao et M^{elle} Laetitia Fournier, professeurs, ainsi qu'à Mme Christine Bavuso, adjoint technique de laboratoire de l'atelier de pratiques scientifiques du collège Massenet Fourneyron avec qui j'ai pu partager tant de joies et de déceptions. Je remercie également les élèves de l'atelier pour leur motivation, leur implication et leur gentillesse renouvelée des lundis après-midi.

E comme Entourage. J'adresse un grand merci à ma famille pour son soutien sans faille. Merci tout particulièrement à mes sœurs Mathilde, Dominique, et Mirella qui ont su m'encourager, et me conseiller. Je dédie ce manuscrit à mes mères, Jeanne pour son amour à qui j'offre cette réussite et cette revanche sur la vie, et Henrilia pour sa présence dans ma vie et à qui je dois tant. Je remercie aussi Cindy, Vanessa, Bantcha et Laurence pour leur amitié sincère.

Né pouvant estimer, Ariel tout ce que je te dois, je te remercie tout simplement pour ta présence inestimable dans ma vie.

T comme Tous. Merci à tous...

RÉSUMÉ

Les industriels ont de plus en plus souvent recours à des pratiques de production plus propre. Ces pratiques, nombreuses et variées, sont génératrices de multiples effets bénéfiques. Néanmoins, l'impact global de leur mise en œuvre sur l'entreprise peut être difficilement appréhendable. Afin d'aider les industriels d'une part, à évaluer les impacts liés à la mise en œuvre de ces pratiques, et d'autre part, dans le choix de l'implantation de pratiques de production plus propre et plus sûre, une méthodologie qui repose sur une approche globale de la gestion de cette implémentation en vue d'obtenir un outil de Production Plus Propre et Plus Sûre (4PS) est proposée. Cette méthodologie a été développée pour le secteur du traitement de surface.

La structuration de cette méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS s'appuie sur une arborescence à 4 niveaux (système, sous-systèmes, critères, indicateurs) élaborée grâce à une analyse systémique (modèle MADS) et fonctionnelle de l'installation. Les critères sont pondérés en utilisant la méthode hiérarchique multicritère. Sur la base des 15 critères de 4PS identifiés, deux méthodes distinctes mais complémentaires ont été élaborées :

- Une méthode de diagnostic qui permet de rendre compte d'une situation, d'aider à la prise de décision, et de mesurer les progrès et évolutions suite à la mise en place d'une pratique de production plus propre. Dans ce but, la méthode s'appuie sur l'utilisation de 38 indicateurs de 4PS alimentant les 15 critères précédemment définis.
- Une méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS qui fait ressortir, dans un panel de 86 pratiques tirées du BREF traitement de surface (STM), les pratiques les plus adaptées à l'entreprise en utilisant la méthode d'analyse multicritère ELECTRE I.

La validation de la méthodologie, réalisée par le biais de 4 cas d'étude, montre d'une part sa facilité de mise en œuvre et son applicabilité à différents types d'ateliers de traitement de surfaces. D'autre part, ces études de cas valident l'utilité d'une telle méthodologie, notamment au travers du retour positif des industriels.

En dernier lieu, la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS contribue ainsi à répondre à la problématique des Meilleures Techniques Disponibles en aidant les industriels dans leur mise en place et dans le cadre de la révision du BREF STM.

Mots clés : Production Plus Propre et Plus Sûre, Analyse Systémique, Analyse multicritère, Traitement de surfaces.

ABSTRACT

Cleaner production practices are increasingly used in industrial applications. These numerous and various practices generate multiple benefits. However, the overall impact resulting from their implementation on the company cannot be easily apprehended. A methodology providing a global management approach is proposed, in order to help corporate managers in setting up cleaner and safer production practices and in the assessment of the impacts related to their implementation. A Cleaner and Safer Production (CSP) process is also obtained through this approach. This methodology has been developed into the metal finishing industry.

The structure of the methodology for assessment of CSP practices impacts is based on a 4 level tree (system, subsystems, criteria, indicators). It was developed through a systemic (MADS model) and functional analysis of the industrial establishment. The criteria were weighted by the use of a multi-criteria analysis method (AHP). The 15 CSP criteria identified are the foundation of two distinct but complementary methods developed in this methodology:

- A CSP practices' impacts diagnosis method, which helps to take the situation into account, to support decision making, and to measure progress after cleaner production practice implementation. For that purpose, the method relies on the use of 38 CSP indicators, feeding the 15 previously defined criteria.
- A CSP practices decision aid method which highlights, in a panel of 86 practices identified into the metal finishing BREF, these that are best suited to the company by using the multi-criteria analysis method (ELECTRE I).

The validation of the methodology, carried out through 4 industrial case studies, has shown that it can be easily set up into different types of metal finishing workshops. Moreover, these case studies help validate the usefulness of such a methodology, particularly through the corporate managers' positive feedback.

Hence, our methodology contributes to answering the Best Available Techniques issue by assisting corporate managers in the choice of the above mentioned processes. Furthermore, the use of this methodology could be helpful for BAT's knowledge improvement in preparation for BREF re-examination.

Key words: Cleaner Production, Systemic analysis, Multi-criteria Analysis, Metal finishing

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xi
Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xv
Liste des abréviations	xvii
GLOSSAIRE	xix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I PARTIE I : CONTEXTE ET OBJECTIFS	7
I.1 Contexte industriel du traitement de surfaces	9
I.1.1 Généralités sur le secteur du traitement de surfaces	9
I.1.2 Pollutions et risques	11
I.1.3 La réglementation appliquée au secteur du traitement de surfaces.....	15
I.1.4 Conclusion sur le traitement de surface	18
I.2 La production plus propre et son application dans le secteur du traitement de surface.....	19
I.2.1 Le concept de production plus propre.....	19
I.2.2 Applicabilité au secteur du traitement de surface	25
I.3 État des lieux des méthodes d'évaluation des impacts environnementaux.....	31
I.3.1 Terminologie.....	31
I.3.2 Classification des méthodes d'évaluation existantes	32
I.3.3 Adaptabilité des méthodes	34
I.4 Synthèse et objectifs.....	36
II PARTIE II : REVUE DES OUTILS MÉTHODOLOGIQUES	39
II.1 Introduction.....	41
II.2 Entreprises, Systémique et Risques	42
II.2.1 L'entreprise, un système complexe.....	42
II.2.2 La modélisation d'entreprise.....	44
II.2.3 Management des risques	48
II.2.4 Conclusion	52
II.3 L'indicateur, un outil d'information	53
II.3.1 Généralités sur les indicateurs.....	53
II.3.2 Élaboration des systèmes d'indicateurs	57
II.3.3 Analyse structurelle.....	58
II.3.4 Conclusion	62
II.4 L'aide à la décision	63
II.4.1 Introduction à l'aide à la décision	63
II.4.2 Fondements et éléments méthodologiques	64
II.4.3 Panorama des méthodes d'analyse multicritère	66
II.4.4 Synthèse sur l'aide à la décision	76
II.5 Synthèse de la revue des outils méthodologiques.....	77
III PARTIE III: DÉMARCHE D'ÉLABORATION D'UNE MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES IMPACTS DES PRATIQUES DE 4PS	79
III.1 Introduction.....	81
III.2 De la structuration des critères de 4PS.....	82
III.2.1 Réflexions préliminaires	82
III.2.2 Modélisation systémique de l'entreprise et de son environnement	85

III.2.3	Élaboration de critères de 4PS	88
III.2.4	Synthèse sur la structuration des critères	96
III.3	... À la méthode de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS	98
III.3.1	Recherche d'indicateurs de 4PS.....	98
III.3.2	Utilisation de l'analyse structurelle pour identifier les relations d'influence entre les indicateurs	102
III.3.3	Définition et organisation des indicateurs.....	106
III.3.4	Conclusion sur la méthode de diagnostic des impacts.....	112
III.4	À la méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS.....	113
III.4.1	Recherche et sélection des pratiques de 4PS	114
III.4.2	Évaluation des pratiques de production plus propre vis-à-vis des critères	114
III.4.3	Étude de la robustesse	123
III.4.4	Conclusion	128
III.5	Conclusion sur la démarche d'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS	129
IV	PARTIE IV : DÉMARCHE D'UTILISATION ET VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE AU TRAVERS DE CAS D'ÉTUDE.....	132
IV.1	Démarche d'utilisation de la méthodologie et des outils d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS.....	134
IV.1.1	Démarche générale d'utilisation la méthodologie	134
IV.1.2	Démarche de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS	135
IV.1.3	Démarche d'aide à la décision dans le choix d'une pratique de 4PS.....	141
IV.1.4	Synthèse de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS.....	144
IV.2	Validation des méthodes et outils proposés	145
IV.2.1	Validation de la méthode de diagnostic des impacts	145
IV.2.2	Validation de l'outil d'aide à la décision	155
IV.2.3	Conclusion	159
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	161
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	167
	ANNEXES.....	178

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des principaux objectifs du traitement de surface	9
Figure 2 : Structure générale d'une chaîne de traitement de surface.....	10
Figure 3 : Chaîne d'un atelier de traitement de surface.....	10
Figure 4 : Répartition des déchets générés par l'activité du traitement de surface	12
Figure 5: Origine du transfert de la pollution	13
Figure 6 : Positionnement des différents concepts	20
Figure 7: Stratégies de production propre adapté de	22
Figure 8 : L'amélioration continue appliquée à la production propre	22
Figure 9 : Débit d'eau de lavage nécessaire selon la fonction de rinçage utilisée avec $R_d = 2000$ et $e = 5L/h$	27
Figure 10: Approche « Site » versus Approche « Produits »	33
Figure 11 : Positionnement de 15 méthodes d'évaluation des impacts dans le domaine industriel.....	34
Figure 12 : Le tout n'est pas la somme des parties.....	42
Figure 13: Schéma de représentation d'un système	42
Figure 14: Le modèle MADS	50
Figure 15 : Structure de la méthode MOSAR	51
Figure 16 : Iceberg de l'information d'après Jesinghaus (1999).....	55
Figure 17 : Adaptation du modèle Opération-Information-Décision aux processus de décision.....	56
Figure 18 : Plan d'influence/ dépendance directe.....	60
Figure 19 : Stabilité du système de variables	61
Figure 20 : Schéma de la problématique de choix α	65
Figure 21 : Schéma de la problématique de tri β	65
Figure 22 : Schéma de la problématique de rangement γ	66
Figure 23 : Approches opérationnelles et méthodes.....	67
Figure 25 : Structuration hiérarchique de la MHM	70
Figure 24 : Démarche de mise en œuvre de la méthode hiérarchique multicritère	70
Figure 26: Démarche de mise en œuvre de la méthode ELECTRE I.....	73
Figure 27 : Adaptation de l'échelle au poids du critère.....	73
Figure 28 : Exemple du graphe de surclassement dans le cas d'une délocalisation.....	75
Figure 29 : Démarche d'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts de 4PS.....	81
Figure 30: Modèle MADS adapté à la problématique de 4PS.....	84
Figure 31: Démarche classique bottom-up d'élaboration d'un tableau de bord d'indicateurs	83
Figure 32: Démarche top-down d'élaboration de la méthodologie	85
Figure 33: Sous-systèmes de l'environnement de l'atelier impactés par l'implémentation d'une pratique de 4PS.....	88
Figure 34: Systèmes et sous-systèmes pouvant être impactés par des pratiques de 4PS.....	88
Figure 35: Décomposition en structure hiérarchique de notre système.....	92
Figure 36: Priorités relatives attribuées aux sous-systèmes et critères de 4PS.....	94
Figure 37: Structure de la méthode d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS au niveau des critères ...	97
Figure 38: Plan des influences/dépendances directes des indicateurs de production plus propre et plus sûre	103
Figure 39: Plan des influences/dépendances indirectes du système d'indicateurs de 4PS.....	104
Figure 40: Structure de la méthode d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS au niveau des indicateurs	109

Figure 41: Structure de la méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS	115
Figure 42: Graphe de surclassement de la solution basique pour la stratégie Valorisation.....	121
Figure 43 : Domaine de validité des différents noyaux selon le seuil de concordance	124
Figure 44: Domaine de validité des différents noyaux selon le seuil de discordance	124
Figure 45: Évolution du noyau avec la sévèrisation des seuils de concordance et de discordance	125
Figure 46: Plages de validité des noyaux avec la variation des poids des critères	126
Figure 47 : Structure des méthodes proposées	130
Figure 48: Schéma de la démarche d'utilisation de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS.....	134
Figure 49: Extrait de la fiche de recueil des données	136
Figure 50 : Exemple de profil d'impact d'une entreprise.....	137
Figure 51 : Aperçu du tableau de bord de diagnostic des impacts de pratiques de 4PS.....	139
Figure 52 : Exemple de profil d'impact de l'entreprise en amont et en aval de l'implémentation	140
Figure 53: Extrait de l'outil informatique d'aide au choix	142
Figure 54 : Tableau d'établissement des relations de surclassement.....	143
Figure 55 : Profil d'impact de la société A.....	146
Figure 56 : Profil d'impact de la société B.....	151
Figure 57: Profil d'impact de la société C.....	153
Figure 58 : Graphe de surclassement obtenu pour le cas d'étude Résines	156
Figure 59 : État des lieux de l'atelier avant et après la mise en place d'une résine échangeuse d'ions	157
Figure 61 : Schéma récapitulatif de la démarche et des outils associés	164

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principaux types de traitements de surface.....	11
Tableau 2 : Principaux polluants générés par les ateliers de traitement de surface.....	12
Tableau 3 : Typologie des évènements français répertoriés dans le traitement de surface	15
Tableau 4 : Textes réglementaires en vigueur pour le traitement de surface	16
Tableau 5: Valeurs limites de teneur en polluant des effluents	18
Tableau 6 : Niveaux de gestion des déchets	23
Tableau 7 : Exemples d'aides de l'agence de l'eau Rhône - Méditerranée - Corse	25
Tableau 8: Rapports de dilution optimaux en fonction du type de bain	26
Tableau 9 : Produits de substitution existants pour différents types de bains	26
Tableau 10 : Exemple de techniques de valorisation applicables au traitement de surface	28
Tableau 11 : Exemples de technologies de substitution	28
Tableau 12: Tableau de comparaison des méthodes de modélisation d'entreprises.....	48
Tableau 13 : Définitions des niveaux d'information	54
Tableau 14 : Critères de qualité d'un bon indicateur.....	57
Tableau 15 : Exemple de tableau des performances pour l'acquisition d'un véhicule.....	65
Tableau 16 : Tableau récapitulatif des méthodes d'analyse multicritères étudiées	69
Tableau 17 : Tableau d'attribution des poids issus de la MHM	71
Tableau 18 : Matrice carrée de comparaison des éléments : Exemple d'application	71
Tableau 19: Détermination du ratio de cohérence I_C : Exemple d'application.....	72
Tableau 20 : Matrice des jugements dans le cas du choix de la ville pour une délocalisation industrielle	74
Tableau 21: Adaptation de la méthode MOSAR.....	85
Tableau 22: Extrait de la grille d'identification des critères de 4PS par le biais des systèmes sources de danger	89
Tableau 23 : Critères de 4PS identifiés	90
Tableau 24: Avis des experts pour le critère approvisionnement vis-à-vis du critère production.....	93
Tableau 25: Exemple de calcul des vecteurs de priorités VP pour le critère opérations	93
Tableau 26 : Exemple de calcul de l'indice de cohérence pour le critère opérations.....	95
Tableau 27 : Indices de cohérence des jugements	95
Tableau 28: Exemple d'indicateurs identifiés en fonction des sources	98
Tableau 29: Identification d'indicateurs à partir du cas d'étude « remplacement de la passivation au chrome VI par une passivation au chrome III »	99
Tableau 30: Grille de notation des critères de sélection d'indicateurs pertinents	100
Tableau 31: Extrait de la matrice de sélection des indicateurs par criblage	101
Tableau 32: Extrait de la matrice finale obtenue	102
Tableau 33 : Comparaison des indicateurs les plus influents en fonction des différents classements	105
Tableau 34: Caractéristiques anticorrosion	108
Tableau 35: Structuration et formalisation des indicateurs	110
Tableau 36 : Extrait des évaluations qualitatives des pratiques de production propres.....	116
Tableau 37: Système de notation utilisé pour transcrire les évaluations qualitatives en semi-qualitatives...	117
Tableau 38: Amplitude de l'échelle en fonction du poids du critère.....	117
Tableau 39 : Note numériques en fonction des échelles considérées	118
Tableau 40 : Exemple d'application pour la pratique substitution des couches de passivation au chrome (VI) par des revêtements de conversion au chrome (III).....	118

Tableau 41: Matrice des jugements semi- qualitative pour l'aide à la décision dans le choix d'une pratique de 4PS de type "Valorisation".....	119
Tableau 42: Matrice des jugements quantitative pour l'aide à la décision dans le choix d'une pratique de 4PS de type "Valorisation".	119
Tableau 43 : Exemple d'évaluation quantitative réalisée par deux individus	120
Tableau 44 : Évaluations quantitatives de quelques pratiques	123
Tableau 45 : Résultats de la variation des échelles pour la stratégie Valorisation	127
Tableau 46 : Évaluations qualitatives de deux pratiques incomparables.....	143
Tableau 47 : Différences entre ateliers de traitements de surfaces intégrés et façonniers.....	149
Tableau 48 : Précautions prises pour le calcul des indicateurs.....	151
Tableau 49 : Poids attribués aux critères pour l'étude de cas résines.....	155

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

4PS	Production Plus Propre et Plus Sûre
ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
CEA	Commissariat d'Études Atomiques
COV	Composés Organiques Volatils
DBO₅	Demande biologique en oxygène
DCE	Directive Cadre Eau
DCO	Demande chimique en oxygène
EDF	Électricité De France
ENS	Évènement non souhaité
EPI	Équipement de Protection Individuelle
fd_r	fonction de rinçage
GES	Gaz à Effet de Serre
I_c	Indices de coherence
IC	Impact du critère
IPC	Impact pondered du criteria
IPPC	Integrated Prevention Pollution and Control
ISO	International Standard Organisation
MADS	Méthodologie d'Analyse des Dysfonctionnements dans les Systèmes
MASIT	Multicriteria Analysis for Sustainable Industrial Technologies
MHM	Méthode Hiérarchique Multicritère
MOSAR	Méthode organisée systémique d'analyse des risques
MTD	Meilleures Techniques Disponibles
REACH	enRegistrement, Évaluation et Autorisation des substances CHimiques
TSM	Traitement de Surfaces des Métaux
VP	Vecteur de priorité
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

GLOSSAIRE

ACV :	L'Analyse du Cycle de Vie est un outil utilisé pour évaluer les effets associés à un produit, procédé ou activité
Amélioration continue :	« Processus d'enrichissement du système de management environnemental pour obtenir des améliorations de la performance environnementale globale en accord avec la politique environnementale de l'organisme » [ISO 14001, 2004]. « Amélioration continue des politiques, des programmes, et du rendement, prenant en considération les progrès techniques, les connaissances scientifiques, les besoins des clients et les attentes de la collectivité » [AGORA 21 <i>et al.</i> , 2002].
Analyse des risques :	L'analyse des risques consiste à les identifier et à comprendre les mécanismes conduisant à leur concrétisation dans le but de réduire leur probabilité d'occurrence et/ou leur gravité. Cette étude doit aboutir à la mise en place de mesures permettant de réduire leur apparition ou leurs conséquences sur l'homme au travail, les matériels de production, les produits, les populations extérieures à notre domaine d'étude ainsi que les écosystèmes pour tendre le plus possible à une maîtrise des risques [PÉRILHON, 2006].
Bains de traitement:	Bains dans lesquels se produisent les réactions chimiques qui permettent de modifier l'état de la surface des pièces.
Bioaccumulation :	Accumulation de substance toxique dans les organismes vivants.
BREF :	Les brefs sont les documents de référence européens sur les meilleures techniques disponibles (MTD). Ils sont le résultat des échanges d'information à l'échelle européenne réunissant des représentants de la profession, des experts, des organisations environnementales non gouvernementales et les États membres. Il existe 33 brefs synthétisant les MTD par secteur d'activités (27) ainsi que ceux utilisables quelque soit le secteur d'activité (6).
Commensurable	Se dit d'une grandeur qui a, avec une autre grandeur, une commune mesure – comparable [ROBERT, 2001]. Des critères incommensurables sont incomparables.
Complexité :	Émerge d'une organisation par la variété de ses éléments et par les interactions entre ceux-ci [AGORA 21 <i>et al.</i> , 2002].
Critères :	Éléments en fonction desquels une décision doit être prise [AGORA 21 <i>et al.</i> , 2002].
Cuve	Récipient de grande capacité contenant le bain de traitement ou de rinçage
Danger :	La propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique pouvant provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement [TIXIER, 2002].
Défaillance :	Cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise [AGORA 21 <i>et al.</i> , 2002].
Démétallisation :	Opération destinée à retirer une couche métallique par voie chimique
Diagnostic environnemental :	État des lieux de la situation d'une entreprise vis-à-vis de ses impacts sur l'environnement, de la réglementation et des enjeux environnementaux [AGORA 21 <i>et al.</i> , 2002].
Écosystème :	Selon la Convention pour la Diversité Biologique « le complexe dynamique formé de

communautés de plantes, d'animaux, et de micro-organismes et de leur environnement non vivant qui, par leur interaction, forment une unité fonctionnelle [AGORA 21 *et al.*, 2002].

Effet avec seuil : Effet nocif pour la santé (ou danger) qui ne se manifeste qu'au-delà d'une certaine dose ou concentration d'exposition [DOR *et al.*, 2005].

Effet sans seuil : Effet nocif pour la santé (ou danger) qui se manifeste quelle que soit la dose ou concentration d'exposition si elle est non nulle [DOR *et al.*, 2005].

Émission : Le rejet direct ou indirect, à partir de sources ponctuelles ou diffuse de l'installation, de substances, de vibrations, de chaleur ou de bruit dans l'air, l'eau ou le sol [AGORA 21 *et al.*, 2002].

End of pipe : Un traitement "end-of-pipe" est un traitement de fin de chaîne de type curatif (station d'épuration)

Entraînement : Il s'agit du débit de liquide entraîné d'un bain à l'autre par les pièces traitées (L/m²). Il est noté *e* et varie en fonction des caractéristiques de la pièce, du temps d'égouttage, et des paramètres du bain [LAFOREST, 1999]

Environnement : Milieu dans lequel un organisme fonctionne, incluant l'air, l'eau, la terre, les ressources naturelles, la flore, la faune les êtres humains et leurs interrelations [ISO 14001, 2004].

Étude d'impact : Imposée en France pour l'élaboration des demandes d'autorisation à exploiter, elle doit permettre, pour chacun des grands types de pollution (eau, air, bruit, déchets) de connaître la situation avant la mise en service de l'installation, ses caractéristiques et ses effets directs sur l'environnement, les mesures prises pour en atténuer les effets et la situation prévisible après mise en service [DRIRE, 2006].

Étude de danger : Étude qui expose les dangers que peut représenter l'installation en cas d'accident en décrivant les accidents susceptibles d'arriver, leurs causes, leur nature et leurs conséquences. D'autre part, elle doit justifier les mesures propres à réduire la probabilité et les effets d'un accident, déterminés sous la responsabilité du demandeur [DRIRE, 2006].

Fonction de rinçage : Ensemble des rinçages associés à un même bain de traitement.

Impact environnemental : Toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des activités, produits ou services d'un organisme [ISO 14001, 2004].

MTD : Le stade de développement le plus efficace et avancé des activités et de leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique de techniques particulières à constituer, en principe, la base des valeurs limites d'émission visant à éviter et, lorsque cela s'avère impossible, à réduire de manière générale les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble. Par:

- «techniques», on entend aussi bien les techniques employées que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt,
- «disponibles», on entend les techniques mises au point sur une échelle permettant de les appliquer dans le contexte du secteur industriel concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables, en prenant en considération les coûts et les avantages, que ces techniques soient utilisées ou produites ou non sur le territoire de l'État membre intéressé, pour autant que l'exploitant concerné puisse y avoir accès dans des conditions raisonnables,
- «meilleures», on entend les techniques les plus efficaces pour atteindre un niveau général élevé de protection de l'environnement dans son ensemble [IPPC, 1996]

Nuisance :	Notion subjective attachée au confort humain, à des perceptions esthétiques ou culturelles [AGORA 21 <i>et al.</i> , 2002].
Pollution :	L'introduction directe ou indirecte par l'activité humaine, de substances, de vibrations, de chaleur ou de bruit dans l'air, l'eau et le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité de l'environnement, d'entraîner des détériorations aux biens matériels, une détérioration ou une entrave à l'agrément de l'environnement ou à d'autres utilisations légitimes de ce dernier [IPPC, 1996]
Portant / cadre	Montage de forme rectangulaire portant généralement un grand type de pièces
Processus :	Succession de phénomènes liés entre eux et produisant dans le temps un résultat déterminé [AGORA 21 <i>et al.</i> , 2002].
Production plus propre	L'application continue d'une stratégie environnementale préventive intégrée aux processus, produits et services afin d'améliorer leur efficacité écologique et réduire les risques pour les humains et l'environnement [UNEP, 2001]
Production plus propre et plus sûre	Pour tendre vers une Production non seulement Plus Propre mais également Plus Sûre cela nécessite la connaissance des impacts et de ces risques associés à l'implémentation d'une pratique de production plus propre
Rapport de dilution	Le rapport de dilution Rd est un indicateur de la qualité de rinçage. Rd s'exprime par le rapport de la concentration d'une espèce dans le bain de traitement, et la concentration de la même espèce dans de rinçage associé [LAFORÉST, 1999].
Risque accidentel :	Risque industriel accidentel est le risque que font courir les installations industrielles à leur voisinage, en cas d'accident [DRIRE, 2006].
Risque chronique :	Le risque « chronique » est lié à l'exposition pendant une durée importante à des faibles doses, en marche normale du site industriel [DRIRE, 2006]
Vecteur de priorité	Résultat du processus de discrimination des éléments d'un niveau n de la hiérarchie par rapport à l'élément du niveau directement supérieur. Synonyme : Priorités relatives, Poids, Importance relative [SAATY, 1984].

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les pressions provoquées par les activités industrielles sur l'environnement ne sont plus à démontrer. L'observation de graves problèmes d'eau, de changements climatiques ou encore l'apparition de nouvelles maladies ont conduit, dès les années 60, à la prise de conscience du public des problèmes environnementaux. Dans le rapport Brundtland publié en 1987, la Commission mondiale sur l'environnement et le développement avertit du danger de ces changements planétaires qu'entraîne l'activité humaine incontrôlée : *«Il nous faut absolument prendre conscience de ces nouvelles réalités – que personne ne peut fuir- et il nous faut les assumer»* [BRUNDTLAND, 1988]. En France comme en Europe, la multiplication des recherches scientifiques, des communications internationales ou locales (Conférence de Rio en 1992, Sommet de Johannesburg en 2002, Grenelle de l'environnement en 2008...) ainsi que des textes législatifs (Directive européenne IPPC, Arrêté ministériel du 30 juin 2006, Directive Cadre Eau, Directive européenne REACH) démontrent une volonté grandissante de prise en compte de ces considérations environnementales. La législation française et européenne concernant les activités industrielles établissent des règles permettant de prévenir la pollution et de réparer les dommages causés à l'environnement par les entreprises. La directive IPPC par exemple, encourage les industriels à mettre en œuvre des bonnes pratiques en interne et des procédés propres tout en minimisant les coûts pour l'industrie, via le concept de Meilleure Techniques Disponibles (MTD). En outre, des mesures visant à promouvoir le développement d'activités industrielles plus respectueuses de l'environnement et l'adoption de pratiques de production plus propre sont également proposées (Aide financière et technique des agences de l'eau ou encore de l'ADEME).

Bien que le respect de l'environnement soit de plus en plus considéré par les industriels comme un argument commercial et un facteur concurrentiel permettant de maîtriser les pressions réglementaires, économiques, fiscales et sociales, ceux-ci engagent relativement peu d'actions de mise en œuvre des pratiques de production plus propre [GAULT, 2009] [GONDRAN, 2001]. Cela peut s'expliquer à la fois par une méconnaissance de leurs impacts environnementaux mais également par la faible disponibilité d'outils d'évaluation des impacts et d'aide à la décision pour le choix de pratiques de production propre. En effet, la Production Plus Propre a généralement un impact positif notamment en termes de diminution de la consommation de matières premières, et d'énergie et de minimisation des émissions et de la production de déchets. Néanmoins, l'introduction de nouvelles stratégies de production peut engendrer des modifications importantes au sein d'une entreprise. Comment alors évaluer les impacts liés à l'implémentation de pratiques de production propre afin que celles-ci soient des pratiques de Production à la fois Plus Propre mais également Plus Sûres (4PS)?

De plus, les industriels semblent privilégier les performances économiques comme base sur laquelle repose des actions en faveur de l'environnement [KABONGO, 2004] [GONDRAN, 2001]. Or le choix de pratiques de production plus propre nécessite la prise en compte d'autres aspects (par exemple : les conditions de travail, les clients, l'organisation, ...) afin de minimiser les impacts et les risques liés à ces pratiques et de maîtriser l'outil de production. Une seconde question oriente donc cette recherche: Comment favoriser l'intégration de la Production Propre et Plus Sûre au sein des entreprises en apportant une aide au choix de pratiques adaptées?

Nous nous proposons dans cette thèse de répondre à ces problématiques. Ce travail a été développé pour le secteur du traitement de surface.

La première partie du mémoire est consacrée à la description du contexte et à la définition des objectifs de cette thèse. Dans un premier temps nous nous attachons à décrire le contexte industriel dans lequel la thèse a été développée en insistant sur les principaux enjeux et contraintes réglementaires du secteur du traitement de surface. Nous abordons ensuite le concept de production propre et sa mise en œuvre dans les PME. Le foisonnement des pratiques de production propre, ainsi qu'un manque de connaissance des impacts liés à ces pratiques sera ainsi mis en évidence. Le troisième chapitre de cette partie s'intéresse aux méthodes d'évaluation environnementales existantes. Il permet de montrer la non-adéquation de ces méthodes pour l'évaluation des impacts liés aux pratiques de production plus propre et plus sûre ainsi que leurs limites pour le secteur du traitement de surfaces. Nous terminons cette partie en démontrant l'intérêt de l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des impacts liés à la mise en place de pratiques de production plus propre et plus sûre.

La seconde partie du mémoire de thèse intitulée « Revue des outils méthodologiques » a pour objectif de positionner les différents concepts, thèmes, méthodes, qui ont contribué à l'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts de pratiques de production plus propre et plus sûre (4PS). Cette partie se compose de cinq chapitres. Après un bref chapitre introductif, le second chapitre s'intéresse à la notion de systémique ainsi qu'à la modélisation d'entreprise. Le troisième traite des indicateurs et de la construction de tableaux de bord. Le chapitre 4 est un état de l'art de l'aide à la décision et de l'analyse multicritère. Et enfin le dernier chapitre de cette partie synthétise les différents thèmes abordés qui contribueront à répondre à la problématique.

Dans la troisième partie nous proposons la démarche d'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts de pratiques de 4PS. Cette méthodologie se décline en une méthode de diagnostic et une méthode d'aide à la décision dont les bases reposent sur l'identification et l'élaboration de critères de 4PS. Ce travail, basé sur le modèle systémique d'analyse des risques MADS ainsi que la méthode d'analyse multicritère MHM fait l'objet du chapitre III.2. Le chapitre suivant s'intéresse à la construction de la méthode de diagnostic. Cette méthode utilise des indicateurs de 4PS pour quantifier les impacts, et renseigner les critères précédemment identifiés. Il a donc été nécessaire dans ce chapitre d'identifier, de sélectionner et de formaliser ces indicateurs dans le but d'aboutir à la création d'un tableau de bord. Le quatrième chapitre, traite quant à lui de la construction de la méthode d'aide à la décision. Basée sur la démarche de la méthode d'analyse multicritère ELECTRE I, la méthode développée dans ce chapitre utilise les critères de 4PS en tant que critère de choix d'une pratique de production propre adaptée. Ce chapitre montrera l'application de la méthode ELECTRE I pour l'aide au choix de pratiques de production plus propre et plus sûre. Une conclusion synthétique terminera cette partie sur la démarche de construction de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS.

La quatrième et dernière partie de ce mémoire a pour objectif de présenter et de valider la méthodologie, les méthodes et les outils qui ont été créés durant cette thèse. Le premier chapitre est un chapitre descriptif sur la démarche d'utilisation de la méthodologie et des outils qui lui sont associés. Le second chapitre montre comment a été validée la méthodologie proposée à travers de cas d'études concrets. Les limites y seront également discutées.

La conclusion de ce mémoire permettra de faire le point sur l'ensemble du travail effectué et proposera les perspectives de recherche.

PARTIE I : CONTEXTE ET OBJECTIFS

Partie I : Contexte et objectifs

Chapitre I.1 : Contexte industriel du traitement de surfaces

I.1 Contexte industriel du traitement de surfaces

I.1.1 Généralités sur le secteur du traitement de surfaces

I.1.1.1 Situation économique de l'activité

Le traitement de surfaces a pour objectif la modification de la surface des matériaux en vue de leur conférer des propriétés adaptées à des conditions d'utilisation données. Cette modification se réalise par un ensemble d'opérations chimiques, électrochimiques, thermiques ou encore mécaniques. Les traitements de surfaces ont un rôle fondamental dans la protection préventive des pièces métalliques ou plastiques. En effet les deux principales propriétés conférées à la surface des matériaux, anticorrosion et anti-usure (Figure 1), correspondent dans le monde à un coût annuel de près de 122 milliards d'euros [AERMC, 2002].

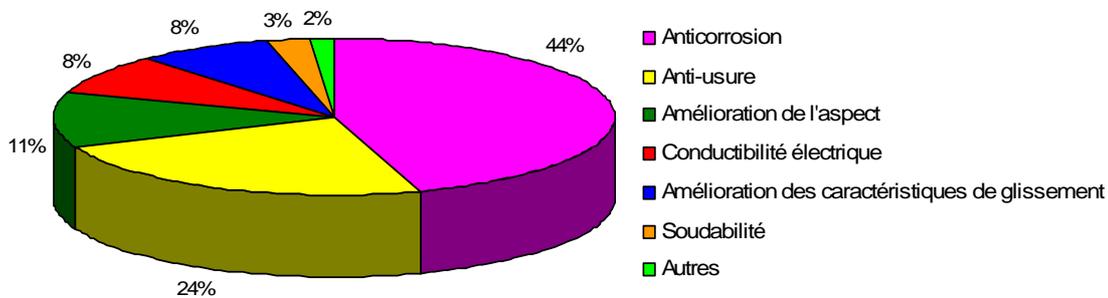


Figure 1 : Répartition des principaux objectifs du traitement de surface

L'activité du traitement de surfaces comprend une trentaine de techniques réparties en cinq grandes familles. Il s'agit des revêtements par voie humide et voie sèche (représentant 43% du secteur), des peintures (31% du secteur), des traitements dits de conversion, des traitements thermochimiques, et des traitements mécaniques [AERMC, 2002]. Par la suite nous nous intéresserons exclusivement aux revêtements par voie humide.

Le traitement de surfaces est mis en œuvre dans des secteurs aussi variés que ceux de l'automobile, des télécommunications, de l'aéronautique, du bâtiment, de la bijouterie, du matériel médical, ou encore de la quincaillerie. En France, à l'exclusion des peintures industrielles, le secteur compte 60000 salariés travaillant dans 4500 ateliers. Ces ateliers sont repartis en ateliers intégrés à une unité de production pour 70% d'entre eux, et en ateliers façonniers travaillant en sous-traitance (30%). Bien que les entreprises, majoritairement des PME, couvrent la totalité du territoire français, il n'en demeure pas moins que l'Ile de France et la région Rhône-Alpes se partagent un tiers des effectifs. En France, le chiffre d'affaire global du marché des traitements et revêtements des métaux était estimé en 2007 à 2 milliards d'euros dont 80% dans des ateliers intégrés et 20% chez les façonniers [SESSI, 2007]. Malgré l'importance de ce chiffre d'affaires, l'existence d'un décalage entre l'offre et la demande (un grand nombre d'installations de traitement de surfaces par rapport au nombre de clients), et les délocalisations des entreprises sont à l'origine du déclin de ce secteur d'activités en Europe. Cela a pour conséquence la constante nécessité d'innovation technique, d'amélioration des performances et de prise en compte du facteur environnemental dans le but de continuer à répondre aux besoins des clients et de se conformer aux exigences réglementaires [AERMC, 2002].

I.1.1.2 Description de l'atelier de traitement de surfaces par voie aqueuse

La chaîne de production d'un atelier de traitement de surfaces est constituée d'un enchaînement de bains de traitement et de bains de rinçage (Figure 2 et 3).

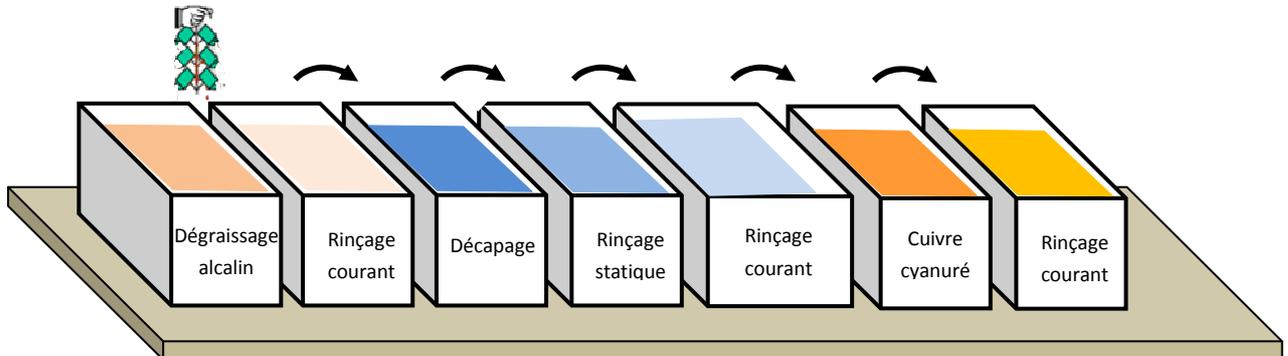


Figure 2 : Structure générale d'une chaîne de traitement de surface



Figure 3 : Chaîne d'un atelier de traitement de surface

Les pièces à traiter passent successivement dans chaque bain afin de subir le traitement désiré. L'enchaînement nécessaire au traitement complet d'une pièce constitue une gamme de production. Une gamme est composée de bains de préparation des surfaces en vue de l'élimination des éléments gênants sur la pièce (dégraissage, décapage, polissage), de bains de revêtement ou traitement de conversion qui ont pour objectif d'apporter à la pièce de nouvelles propriétés de surface (zingage électrolytique, nickelage, cuivrage, phosphatation) et de bains de rinçage (Tableau 1) [LAFORST, 1999] [MAHIEU, 1985].

Tableau 1 : Principaux types de traitements de surface [ADEME, 2007] [BREF STM, 2005] [GARDES, 2001] [WERY, 1998] [WERY, 2001]

Catégorie	Type de traitement	Caractéristiques de l'activité
Prétraitements et inter-traitements	Dégraissage	Traitement chimique ou électrolytique qui a pour rôle de rendre la surface propre afin d'assurer le bon déroulement des opérations ultérieures et par la même, de garantir la qualité du produit fini.
	Décapage	Traitement ayant pour objectif d'éliminer les oxydes formés au cours des différentes étapes du traitement de l'acier. Il agit en général par dissolution chimique de la surface de la pièce métallique notamment à l'aide d'acides chlorhydrique, sulfurique, nitrique, phosphorique ou fluorhydrique en fonction du métal à décaper.
	Démétallisation	Elle permet d'éliminer la couche superficielle de métal sur la pièce par traitement chimique ou électrolytique.
	Neutralisation	La neutralisation a pour but de stopper la réaction chimique après traitement. Elle s'effectue en milieu acide ou basique.
Revêtement de la surface	Argenture, dorure, cadmiage, chromage, zingage, ...	Il s'agit de dépôts chimiques par immersion dans des solutions métalliques acides ou basiques ou des revêtements électrolytiques par réduction d'un cation métallique à la surface des pièces.

Ces différents traitements sont réalisés soit [GARDES, 2001]:

- Manuellement (l'opérateur déplace les pièces à traiter de cuve en cuve)
- En semi-automatique (les pièces sont déplacées à l'aide d'un pont roulant actionné par l'opérateur)
- En automatique (l'opérateur n'intervient que très ponctuellement).

Les bains de rinçage ont trois rôles principaux:

- ➔ ils visent à rendre la surface des pièces propres en vue d'un futur traitement par des produits chimiques,
- ➔ à limiter la pollution du bain suivant par entraînement en diluant le film liquide et
- ➔ à arrêter l'effet chimique en vue de la manipulation des pièces.

Les bains de rinçage sont en général, placés directement après le bain de traitement, et sont de même nature que ces derniers mais avec des concentrations en produits chimiques beaucoup plus faibles. Un enchaînement de bains de rinçage est appelé fonction de rinçage.

I.1.2 Pollutions et risques

I.1.2.1 Pollutions des ateliers de traitement de surface

Le traitement de surface par voie aqueuse est un secteur d'activité très polluant. En effet, la pollution aqueuse provenant de ce secteur représente 30 à 40% de celle provenant de l'ensemble des industries [LAFORST, 1999]. Les rejets du traitement de surfaces sont de nature solide, liquide ou gazeuse et se classent en deux catégories selon leur destination [DEBRAY, 1997]:

- ➔ Les effluents sont les rejets liquides et gazeux, rejetés directement dans le milieu naturel

- ➔ Les déchets, sont les résidus liquides ou solides provenant de bains concentrés et pouvant faire l'objet d'un traitement en centre agréé de traitement des déchets ou en centre de stockage des déchets dangereux. Ils sont classés en quatre catégories (Figure 4):
- Les déchets de traitement de la pollution (par exemple les boues d'hydroxydes métalliques, les résines échangeuses d'ions usagées)
 - Les déchets provenant des postes de préparation et de revêtement de surface (huiles issues du dégraissage, poussières générées par le décapage manuel...),
 - Les solvants et les déchets contenant des solvants,
 - Les déchets minéraux (acides et bases résiduelles).

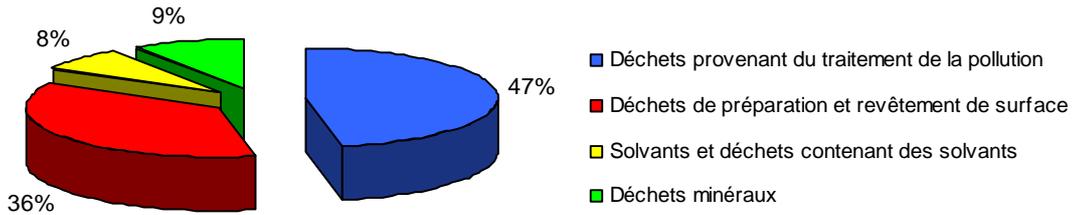


Figure 4 : Répartition des déchets générés par l'activité du traitement de surface [ADEME, 2007]

Sur la Figure 4, il convient de remarquer que près de la moitié de ces déchets n'est pas générée par l'activité elle-même mais plutôt par les mesures visant à réduire la pollution en fin de chaîne.

I.1.2.1.1 Nature des polluants

La pollution générée par les ateliers de traitement de surfaces par voie aqueuse est de nature très diversifiée. En effet elle est issue de différentes fonctions de traitement qui elles-mêmes dépendent de l'objectif à atteindre et des réactifs mis en jeu [DEBRAY, 1997]. Les principaux polluants sont des réactifs usés mais également les produits de leur réaction. Le Tableau 2 ci-dessous présente les différents types de polluants contenus dans les boues et bains de traitement de surface outre les acides et les bases :

Tableau 2 : Principaux polluants générés par les ateliers de traitement de surface [ADEME, 2007]

Polluants	Origine
Matières organiques	Huiles, graisses, solvants, mouillants, brillanters...
Composés Organo-halogénés	Huiles chlorées, solvants de dégraissage et solvants de peinture...
Matières en suspension	Hydroxydes métalliques, carbonates, poussières...
Métaux (Chrome, Zinc, Cuivre, Nickel, aluminium, Fer, Cadmium, Étain)	Préparation de surface, dépôt chimique, dépôt électrolytique, conversion, anodisation, traitement thermique, démétallisation...
Cyanures : CN ⁻ , SCN ⁻	Dégraissage, dépôt, traitement thermique, ...
Matières phosphorées	Dégraissage, phosphatation, traitement thermique, brillantage, nickelage chimique...
Matières azotées : NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NO ₂	Dégraissage, décapage, dépôt, phosphatation, traitement thermique, gravure, brunissage...
Fluorures	Décapage, passivation, polissage, dépôt...
Autres sels : Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , K ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , ...	Divers

Les polluants issus de l'activité du traitement de surface impactent les milieux naturels récepteurs et cela, de différentes manières. La pollution métallique pose un problème

particulier, car les métaux ne sont pas biodégradables. Il en résulte une bio-accumulation des métaux dans les organismes vivants [CNRS, 2009]. La pollution organique dont la décomposition nécessite une certaine quantité d'oxygène appauvrit le milieu naturel. Les cyanures représentent un danger pour l'homme et l'environnement car ils peuvent entraîner l'intoxication (inhalation de cyanure d'hydrogène), et des effets néfastes à long terme sur le milieu aquatique [BONNARD *et al.*, 2006]. Enfin, la présence de nitrites, phosphates et fluorures dans les effluents, favorise la croissance des végétaux aquatiques entraînant une prolifération d'algues microscopiques et conduisant à l'eutrophisation des cours d'eau.

Le secteur du traitement de surface est considéré comme une faible source d'émissions dans l'atmosphère et par conséquent participe peu aux impacts globaux [BREF STM, 2005]. Cependant certaines émissions peuvent être localement importantes. Elles sont composées de poussières provenant des opérations de préparation mécanique des pièces, de composés chimiques tels que NO_x, HCl, provenant de l'évaporation des bains de décapage, de composés organiques volatils (COV) provenant des bains de dégraissage, ou encore de chrome et de cyanure pour certains bains de traitement.

I.1.2.1.2 Provenance de la pollution

Différents phénomènes sont à l'origine du transfert de pollution (Figure 5):

- L'entraînement
- L'évaporation
- Les surverses
- Les fuites

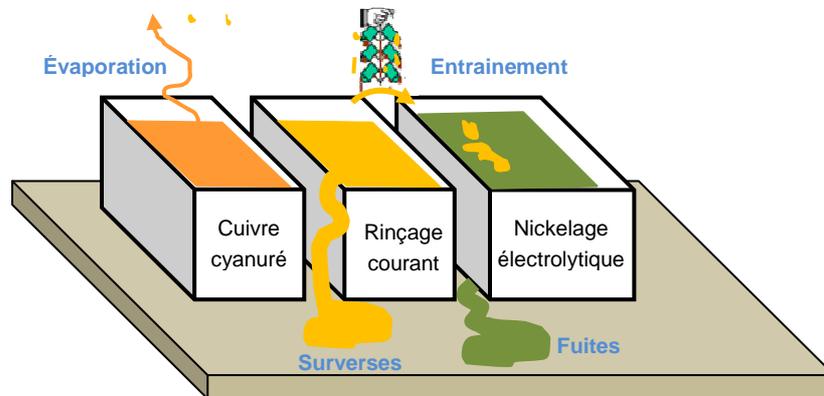


Figure 5: Origine du transfert de la pollution

L'entraînement constitue le principal vecteur de pollution dans une chaîne de traitement de surfaces. Il s'agit de la quantité de liquide par unité de surface qui est transférée d'un bain à un autre par l'intermédiaire des pièces et des portants. Le volume entraîné peut être calculé par la relation suivante :

$$e = \frac{(C_{BRf} - C_{BRi}) \times V_{BR}}{C_{BT} \times S} \quad (\text{Équation 1})$$

avec :

- e : volume entraîné (L/m²)
- V_{BR} : volume du bain de rinçage (L)
- C_{BRf} : concentration finale dans le bain de rinçage (mg/L)
- C_{BRi} : concentration initiale dans le bain de rinçage (mg/L)
- C_{BT} : concentration dans le bain de traitement (mg/L)

S : surface entraînant de la pièce et du portant (m²)

La quantité entraînée varie suivant le type de portant (par attache ou par tonneau). Laforest (1999) montre que les portants de type tonneau contribuent plus au phénomène d'entraînement à cause des rétentions dues aux bacs constituant les tonneaux. De plus, la viscosité et la concentration chimique du bain, sa tension superficielle, sa température mais également la façon de travailler contribuent à l'entraînement [CARPP, 2002]. Cet entraînement a pour conséquence directe une pollution du bain suivant ce qui conduit à une augmentation de la pollution à traiter dans les effluents, de la consommation d'eau et de matières premières. Il est donc nécessaire que la fonction de rinçage choisie permette d'obtenir une qualité de rinçage nécessaire avec une consommation d'eau minimale.

Le transfert de pollution est également dû à l'évaporation des produits chimiques, à la vidange des bacs de traitement et de rinçage statique, ainsi qu'aux surverses et projections générées lors de l'immersion des pièces dans les bacs [LAFOREST, 1999].

I.1.2.2 Risques dans les ateliers de traitement de surface

L'activité du traitement de surface représente un danger potentiel pour les hommes au travail, les écosystèmes, les populations ainsi que les enjeux matériels du fait notamment de l'utilisation de produits chimiques toxiques [GARDES, 2001].

Les risques sont associés aux types de bacs (nature des substances), à la nature des opérations, ainsi qu'aux conditions de mise en œuvre.

En fonctionnement normal de l'installation, le principal risque concerne la santé des travailleurs (risque chronique). Il est essentiellement dû à la présence de produits chimiques dont les mécanismes d'action sont l'intoxication, les allergies et le développement de cancers. Il existe trois voies de pénétration dans l'organisme qui sont la voie cutanée, l'inhalation et l'ingestion [BOUVIER *et al.*, 1998]. D'autres risques plutôt imputables aux conditions générales de l'installation (encombrement au sol, éléments placés en hauteur, vétusté...) sont également courants en fonctionnement normal de l'installation (chute de l'opérateur, brûlure, chute d'équipements, ...)

En cas d'accident, d'autres types de risques sont à prendre en compte (risque accidentel). Une étude de l'accidentologie des établissements pratiquant des activités de traitement de surface conduite par Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR) du Ministère de l'écologie et du développement durable a permis de réaliser une typologie des accidents les plus fréquents. Cette étude a été réalisée à partir de 166 cas d'accidents concernant les ateliers de traitement de surfaces en France survenus entre le 1^{er} janvier 1992 et le 31 décembre 2001. Cette typologie est présentée dans le Tableau 3 suivant [DUMONT, 2008]:

Tableau 3 : Typologie des évènements français répertoriés dans le traitement de surface

Type d'accident	Proportion des cas ayant eu ce type d'accident.
Incendie	34%
Rejet de substances dangereuses	70%
Explosion	1,2%
Effet domino	3,6%
Projection, Chute d'équipement	3%
Presque accident	4,8%
Pollution chronique aggravée	7,2%

Ce tableau montre que les types d'accidents les plus récurrents dans le secteur du traitement de surface sont principalement le rejet de substances dangereuses et l'incendie.

- ➔ Le rejet intempestif de substances dangereuses conduit à une pollution environnementale des sols et des cours d'eau. Ces rejets sont liés en général à la fuite des baignoires, des canalisations, et des rétentions.
- ➔ L'incendie est un risque majeur car il peut être à l'origine de l'émission de gaz toxiques, du rejet de matières polluantes et peut être suivi ou précédé d'une explosion. Cette dernière, bien que peu récurrente peut induire des projections, des brûlures, voire la destruction des bâtiments [BOUVIER *et al.*, 1998]. Les incendies peuvent être provoqués par des réactions intempestives de type exothermique, ou générant des gaz ou les deux simultanément. Ces réactions dépendent de l'existence de produits chimiques incompatibles et de leur mélange.

Dans l'objectif de faire face à ces enjeux environnementaux et à ces risques, une réglementation a été élaborée.

I.1.3 La réglementation appliquée au secteur du traitement de surfaces

La réglementation environnementale en vigueur pour le secteur du traitement de surface est à la fois thématique (eau, air, déchets) et intégrée (législation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), directive européenne IPPC¹...) [LAFOREST *et al.*, 2006]. Le Tableau 4 présente les principaux textes en vigueur en précisant le type de réglementation (thématique / intégrée) ainsi que la zone géographique d'application (France / Europe). En effet, si 80% du droit français relatif à l'environnement dérive des réglementations européennes, la législation des ICPE organise le contrôle des activités polluantes et dangereuses en France. Pour cela une nomenclature est publiée dans le journal officiel de la république française et est revisitée périodiquement pour être adaptée aux évolutions technologiques et industrielles.

¹ Integrated Pollution Prevention and Control

Tableau 4 : Textes réglementaires en vigueur pour le traitement de surface

Identification du texte réglementaire	Date	Description	Thématique	Intégrée
<p>Code de l'environnement Livre I, Titre I^{er}, Articles L511-1 à L517-2 (JORF du 21 septembre 2000)</p>	<p align="center">2000</p>	<p>Classification des ICPE selon la nature du risque chimique ou la branche d'activité. Trois régimes de classification sont définis :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ soumises à déclaration (D) <i>« ne présentent pas de graves dangers ou des inconvénients mais doivent cependant respecter les prescriptions édictées par le préfet pour assurer la protection des intérêts visés »</i> ➔ soumises à autorisation (A) <i>« les installations qui présentent de graves dangers ou inconvénients pour les intérêts visés à l'article L. 511-1. »</i> <p>L'autorisation d'exploiter fixe les dispositions à respecter par l'exploitant pour assurer la protection de l'environnement. Ce document est délivré par le préfet après instruction par l'inspection des ICPE, les services administratifs, une enquête publique, et le Conseil Départemental d'Hygiène [DRIRE, 2006]. Les ateliers dont le volume des bains est supérieur à 1500L sont soumis à autorisation.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ soumises à autorisation et servitude d'utilité publique (AS) <i>« Lorsqu'une demande d'autorisation concerne une installation classée [...] susceptible de créer, par danger d'explosion ou d'émanation de produits nocifs, des risques très importants pour la santé ou la sécurité des populations voisines et pour l'environnement, des servitudes d'utilité publique peuvent être instituées » [AIDA, 2009].</i> 		<p align="center">× France</p>
<p>Arrêté ministériel du 30 décembre 2002 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations existantes (JORF du 16 avril 2003).</p>	<p align="center">2002</p>	<p>Précise sous quelles conditions seront acceptées, en centre de stockage, les boues d'épuration des bains de traitement de surfaces ainsi que les résines échangeuses d'ions saturées <i>« Les déchets admissibles ... sont des déchets industriels spéciaux ultimes, c'est-à-dire des déchets résultant ou non du traitement des déchets, qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment »</i></p>	<p align="center">× France</p>	
<p>Arrêté du 29 juin 2004 relatif au bilan de fonctionnement. (JORF 15 août 2004).</p>	<p align="center">2004</p>	<p>Oblige les exploitants de certaines activités industrielles à fournir tous les 10 ans un bilan de fonctionnement de leur installation basé sur <i>« la comparaison de la situation de l'installation en terme de performance, aux performances associées aux MTD »</i>. Ce document, réalisé par l'exploitant, présente de manière détaillée les techniques de production mises en œuvre dans l'installation, les techniques de réduction d'émission, leur comparaison avec les MTD, et les propositions argumentées d'amélioration de la réduction des impacts de l'installation.</p>		<p align="center">× France</p>
<p>Arrêté ministériel du 30 juin 2006 relatif aux ateliers de traitement de surfaces au titre de la rubrique 2565 (JORF du 5 septembre 2006).</p>	<p align="center">2006</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fixe le cadre réglementaire de référence aux ateliers de traitement de surfaces soumis à autorisation. Définit les prescriptions techniques minimales applicables, afin de <i>« prévenir et limiter au niveau le plus bas possible les pollutions, déchets, nuisances et risques liés à leur exploitation » [LOI 2006, 2006].</i> - Régit les rejets aqueux des ateliers en définissant des seuils de concentration des polluants, une consommation maximale de 8 L /m² de surface traitée / fonction de rinçage, ou encore des règles d'auto surveillance, d'aménagement et d'exploitation des 		<p align="center">× France</p>

Partie I : Contexte et objectifs

Chapitre I : Contexte industriel du traitement de surfaces

		installations. - Préconise l'utilisation des MTD ² pour son application « <i>L'installation est réalisée et exploitée en se fondant sur les performances des meilleures techniques disponibles économiquement acceptables</i> ».		
Directive IPPC relative à la Prévention et au Contrôle Intégré de la Pollution n°2008/1/CE (JOUE du 29 janvier 2008).	2008	- Prévoit les mesures visant à éviter et à réduire les émissions des activités « <i>afin d'atteindre un niveau élevé de protection de l'environnement considéré dans son ensemble</i> » [IPPC, 1996] - Soumet les installations de traitement de surface dont le volume des cuves est supérieur à 30 m ³ à une procédure d'autorisation. - Fondée sur l'approche intégrée pour la délivrance des autorisations d'exploitation, sur l'utilisation des meilleures techniques disponibles MTD pour la réduction des impacts environnementaux des installations, et sur une flexibilité au regard des spécificités locales.		× Europe
Arrêté ministériel relatif à la limitation du bruit émis dans l'environnement des ICPE (JORF du 27 mars 1997)	1997	L'installation est construite, équipée et exploitée de façon que son fonctionnement ne puisse être à l'origine de bruit « <i>susceptible de compromettre la santé ou la sécurité du voisinage ou de constituer une nuisance pour celui-ci</i> »	× France	
Directive cadre sur l'eau n°2008/105/CE (JOUE du 24 décembre 2008)	2008	- Établit un cadre politique communautaire dans le domaine de l'eau : « <i>un cadre pour la protection des eaux intérieures de surface, des eaux de transition, des eaux côtières et des eaux souterraines qui prévient toute dégradation supplémentaire, préserve et améliore l'état des écosystèmes aquatiques [...] vise à renforcer la protection de l'environnement aquatique</i> » [AIDA, 2009]. - Promeut une utilisation durable de l'eau	× Europe	

L'analyse du Tableau 4 montre qu'il y a un foisonnement des textes réglementaires qui concernent l'activité du traitement de surface. Parmi eux, l'arrêté du 30 juin 2006 relatif aux ateliers de traitements de surfaces au titre de la rubrique 3565 est le texte le plus important. Plus encore, il constitue la transposition en droit français de la directive européenne IPPC.

Ce texte sévérise les exigences réglementaires concernant les rejets par rapport à l'arrêté précédent (du 26 septembre 1985). En effet, la lecture du Tableau 5 montre que:

- ➔ le nombre de paramètres pris en compte par l'arrêté a augmenté passant de 17 paramètres réglementés à 23 paramètres. Par exemple le mercure, l'argent, l'azote ou encore les composés organiques halogénés AOX sont des polluants dont on tient nouvellement compte.
- ➔ une distinction est faite, pour les polluants non métalliques, entre rejets directs et raccordés à un réseau urbain. Les valeurs limites sont assouplies en rejets raccordé. Par exemple, la valeur limite de la DCO est supérieure en rejet raccordé à celle du rejet direct.

² Le stade de développement le plus efficace et avancé des activités et de leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique de techniques particulières à constituer, en principe, la base des valeurs limites d'émission visant à éviter et, lorsque cela s'avère impossible, à réduire de manière générale les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble. Par:

- «techniques», on entend aussi bien les techniques employées que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt,

- «disponibles», on entend les techniques mises au point sur une échelle permettant de les appliquer dans le contexte du secteur industriel concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables, en prenant en considération les coûts et les avantages, que ces techniques soient utilisées ou produites ou non sur le territoire de l'État membre intéressé, pour autant que l'exploitant concerné puisse y avoir accès dans des conditions raisonnables,

- «meilleures», on entend les techniques les plus efficaces pour atteindre un niveau général élevé de protection de l'environnement dans son ensemble [IPPC, 1996]

➔ l'arrêté prend en compte des flux de polluants, c'est à dire que la consommation spécifique limitée à 8 L/m²/fdr, peut être dépassée dans certains cas pour des teneurs en polluants inférieures aux valeurs limites. Cependant, et dans le but d'éviter la dilution des rejets, cette consommation est toujours régie.

Tableau 5: Valeurs limites de teneur en polluant des effluents [LOI 2006, 2006] [LOI, 1985]

PARAMETRES	Valeurs limites en 1985 (mg/L)	Valeurs limites en rejet direct ou rejet raccordé en 2006 (mg/L)		CONDITIONS SUR LE FLUX
		Valeurs limites en rejet direct	Valeurs limites en rejet raccordé	
Ag	/		0,5	Si le flux est supérieur à 1 g/j.
Al	5		5,0	Si le flux est supérieur à 10 g/j.
As	/		0,1	Si le flux est supérieur à 0,2 g/j.
Cd	0,2		0,2	/
Cr VI	0,1		0,1	/
Cr III	3		2	Si le flux est supérieur à 4 g/j.
Cu	2		2	Si le flux est supérieur à 4 g/j.
Fe	5		5	Si le flux est supérieur à 10 g/j.
Hg	/		0,05	/
Ni	5		2	Si le flux est supérieur à 4 g/j.
Pb	1		0,5	/
Sn	2		2	Si le flux est supérieur à 4 g/j.
Zn	5		3	Si le flux est supérieur à 6 g/j.
MES	30	30	30	Si le flux est supérieur à 60 g/j.
CN (aisément libérables)	0,1	0,1	0,1	/
F	15	15	15	Si le flux est supérieur à 30 g/j.
Nitrites	1	20	/	Si le flux est supérieur à 40 g/j.
Azote global	/	50	150	Si le flux est supérieur à 50 kg/j.
P	10	10	/	Si le flux est supérieur à 20 g/j (direct).
	/	/	50	Si le flux est supérieur à 100 g/j (raccordé).
DCO	150	300	600	/
Indice hydrocarbure	5	5	5	Si le flux est supérieur à 10 g/j.
AOX	/	5	5	Si le flux est supérieur à 10 g/j.
Tributylphosphate	/	4	4	Si le flux est supérieur à 8 g/j.

I.1.4 Conclusion sur le traitement de surface

Ce premier chapitre a mis en évidence le contexte particulier du secteur du traitement de surfaces. Il s'agit en effet d'un secteur d'activité qui, malgré un marché très important et varié se trouve à l'heure actuelle dans une situation de déclin en Europe.

L'utilisation de produits chimiques pour le revêtement des pièces en fait un secteur problématique vis-à-vis des considérations environnementales mais également vis à vis des risques inhérents à l'activité. Cette réalité est génératrice d'une réglementation thématique et intégrée du secteur. Celle-ci, se sévérant graduellement, l'utilisation de technologies de plus en plus performantes, propres et sûres semble indispensable à l'atteinte des objectifs de ces textes réglementaires.

I.2 La production plus propre et son application dans le secteur du traitement de surface

L'augmentation du prix des matières premières, l'augmentation de la population mondiale ainsi que la diminution des énergies fossiles, est à l'origine de la prise de conscience de la nécessité de produire autrement afin de répondre aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs [BRUNDTLAND, 1988]. Chaussade (2007) en fait le constat : « *On n'a pas le choix ! Étant donné qu'on ne peut stopper la croissance qui est une nécessité absolue pour vivre, il faut donc une productivité du travail ainsi que des ressources fortes. Cela passe par la minimisation des matières premières, la réutilisation des déchets....* » [CHAUSSADE, 2007]. C'est dans ce contexte qu'est apparu le concept de production propre.

I.2.1 Le concept de production plus propre

I.2.1.1 Généralités

Le terme de technologie propre est pour la première fois apparu en 1975. Il désigne « *Les techniques de production modernisées, moins polluantes, plus économiques et conformes à la législation* » [MAES, 1996]. Précurseur en matière de législation environnementale, la France dès la circulaire du 18 juin 1979, englobe sous ce terme « *Toutes les actions préventives permettant la révision et la remise en cause du concept de production et de transformation en vue d'éviter une perte, une nuisance et un danger* » [LAFOREST *et al.*, 2000].

En 1989, le concept de production plus propre a clairement été défini par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) comme étant: « *L'application continue d'une stratégie environnementale préventive intégrée aux processus, produits et services afin d'améliorer leur efficacité écologique et réduire les risques pour les humains et l'environnement* » [UNEP, 2001]. Il semble important de souligner dans cette définition trois caractéristiques de la production propre :

- **Préventive** : La production propre, contrairement à l'approche « End of Pipe » se focalise sur la prévention de la pollution et des déchets : « *il convient de prévenir et de corriger « par priorité à la source », les atteintes à l'environnement en utilisant les meilleures techniques disponibles* » article L.110-1 du code de l'environnement [AIDA, 2009].
- **Intégrée** : la production propre s'applique au niveau des processus de production, des produits mais aussi des services. Cela implique au niveau des processus de production l'économie des matières premières et de l'énergie, le non recours aux matières premières toxiques ainsi que la réduction en quantité et en toxicité de tous les déchets générés. Au niveau des produits la production propre vise la réduction des impacts durant toute leur durée de vie. Enfin elle préconise l'introduction de considérations environnementales dans l'offre de services [VAN BERKEL, 2002a].

- **Continue** : La production propre se veut en évolution constante avec les connaissances techniques.

D'autres concepts liés au concept de production propre nécessitent d'être abordés (Figure 6) :

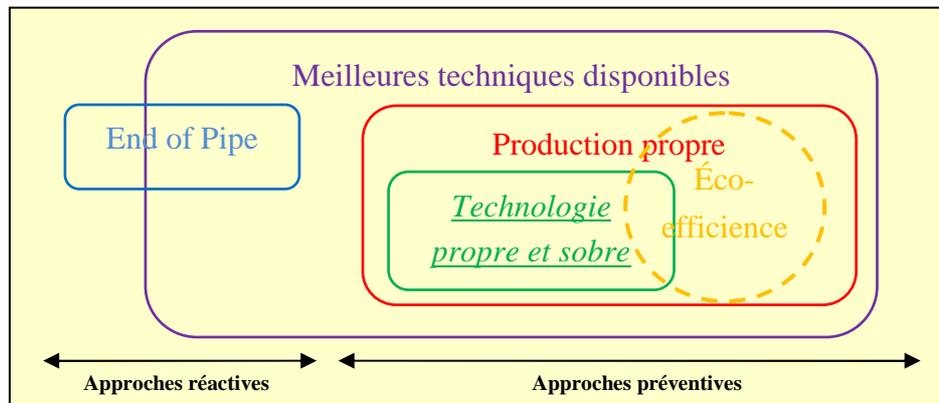


Figure 6 : Positionnement des différents concepts (adapté de [VAN BERKEL, 2002b])

Le terme de **Technologie Propre et Sobre**, est quelque fois rencontré dans la littérature. Ce terme vise «*les méthodes de fabrication ou procédé utilisant le plus rationnellement possible les matières premières et l'énergie tout en réduisant la quantité des effluents polluants, des déchets, ou rebuts produits lors de la fabrication ou pendant l'utilisation du produit*» [ARIST, 2008]. Le mot «*sobre*» implique une certaine rationalité de la production plus propre. Il s'agit néanmoins d'une sous-catégorie de la production plus propre : celle-ci s'intéressant à la fois aux technologies mais également à la manière de les mettre en œuvre.

Les **Meilleures Techniques Disponibles** sont en réalité les procédures et les procédés éprouvés industriellement qui sont les moins impactant pour l'environnement à un coût économiquement viable. L'annexe IV de la directive IPPC prévoit une liste de 12 considérations qui définissent les MTD en termes de performances environnementales parmi lesquelles on peut citer [IPPC, 1996]:

- Techniques produisant peu de déchets
- Utilisation de substances moins dangereuses
- Développement des techniques de récupération et de recyclage des substances émises et utilisées dans le procédé et des déchets, le cas échéant
- Nécessité de prévenir ou de réduire à un minimum l'impact global des émissions et des risques sur l'environnement
- Nécessité de prévenir les accidents et d'en réduire les conséquences sur l'environnement.

Les MTD ont été répertoriées dans des documents appelés "BREF" (Best available techniques REFerence documents) par secteur d'activité et par thématique transversale. Cependant, les MTD s'appliquent tant à la réduction à la source qu'à l'approche de fin de chaîne. Par conséquent, le concept de production propre est inclus dans l'approche MTD.

L'**éco-efficience**, concept défini par le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) en 1992, est atteint par la production de produits et de services à prix compétitifs qui satisfont les besoins humains et apportent une qualité de vie, tout en réduisant progressivement les impacts écologiques ainsi que la consommation des ressources durant leur cycle de vie. L'éco-efficience est donc un concept complémentaire à la production plus propre mais ayant pour objectif l'efficacité économique tout en améliorant l'environnement,

tandis que la production plus propre a pour objectif d'améliorer l'environnement, tout en engrangeant des bénéfices économiques [VAN BERKEL, 2002b].

I.2.1.2 Mise en œuvre de la production plus propre

I.2.1.2.1 Les stratégies de mise en œuvre

La production propre est mise en œuvre au moyen de huit stratégies (Figure 7) [UNEP, 2001] [VAN BERKEL, 2002a] :

- **Les bonnes pratiques** : Adoption de mesures de gestion et des mesures opérationnelles appropriées afin de prévenir les fuites, les déversements accidentels de polluants, faire respecter les instructions opérationnelles existantes... .
- **Le meilleur contrôle des procédés** : Modification des procédures opérationnelles, des modes d'emploi du matériel, des méthodes d'établissement des relevés pour améliorer l'efficacité des procédés et réduire à la fois les déchets et les émissions.
- **Le remplacement d'intrants** : Substitution des matières premières par des matières moins polluantes, moins rares, moins énergivores, moins génératrices d'impacts, par des matériaux renouvelables ou ayant une durée de vie utile plus longue dans les processus de fabrication.
- **La modification des procédés** : Modification du matériel de fabrication et des systèmes d'alimentation existants pour améliorer le rendement des procédés et réduire déchets et émissions.
- **La valorisation sur place** : Réutilisation des flux dans le même procédé ou dans un autre procédé pour une application utile.
- **La valorisation des sous produits** : Les sous produits utiles peuvent être vendu comme matière première. Ils doivent être directement valorisables sans transformation entre la sortie de l'entreprise et la nouvelle utilisation.
- **Le changement de technologies** : Remplacement de la technologie, de l'ordre des opérations, des méthodes de synthèse pour réduire les émissions et les déchets pendant la fabrication.
- **La modification du produit** : Modifier les caractéristiques du produit pour minimiser son impact sur l'environnement durant son cycle de vie (fabrication, pendant et après son utilisation)

Comme le montre la Figure 7 la mise en œuvre de ces stratégies permet pour une majorité d'entre-elles d'optimiser le procédé existant. D'autres stratégies modifient radicalement le cœur du système de production en remplaçant la technologie de production. Plus la stratégie est positionnée à droite sur la figure, plus les coûts liés à sa mise en place sont conséquents.

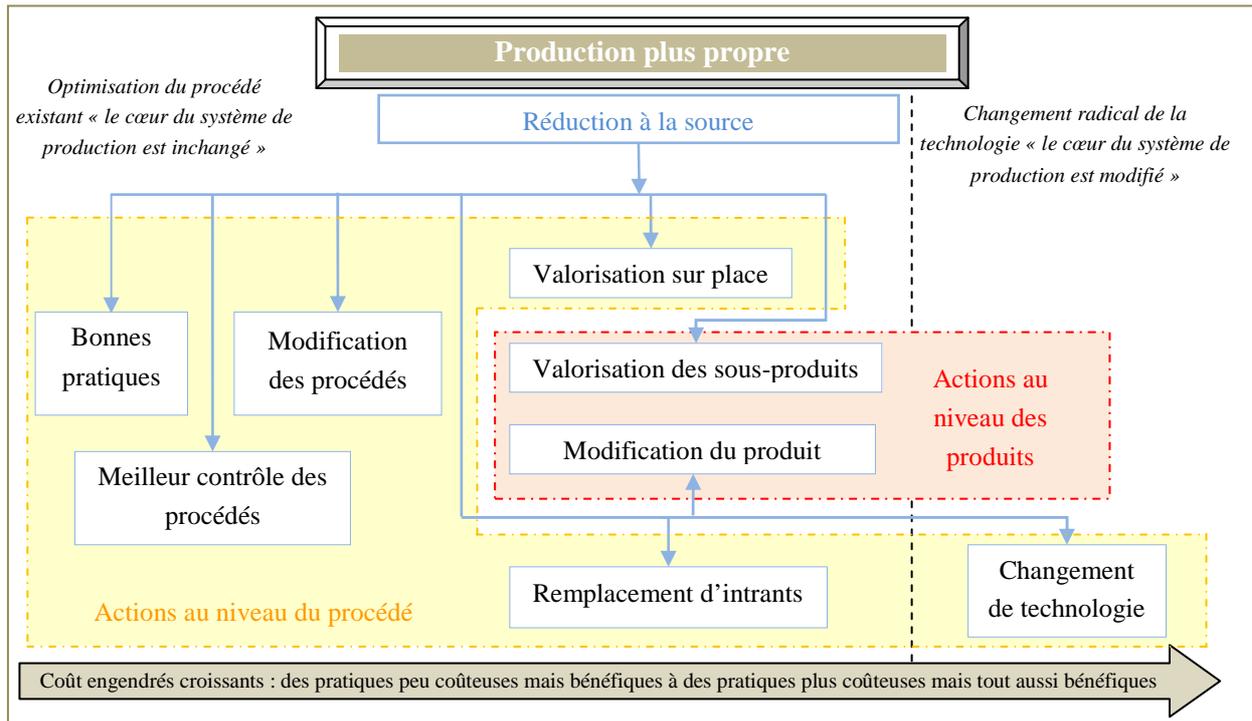


Figure 7: Stratégies de production propre adapté de [LAFOREST *et al.*, 2005a] [CARPP, 2002]

La mise en œuvre de la production plus propre nécessite d’avoir une approche structurée [LAFOREST, 2008]. Plusieurs types de programmes de production plus propre visant à améliorer cette implémentation ont vu le jour. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer à titre d’exemple le programme proposé par le PNUE qui est basé sur un cercle vertueux de l’amélioration continue [UNEP, 2001] (Figure 8).

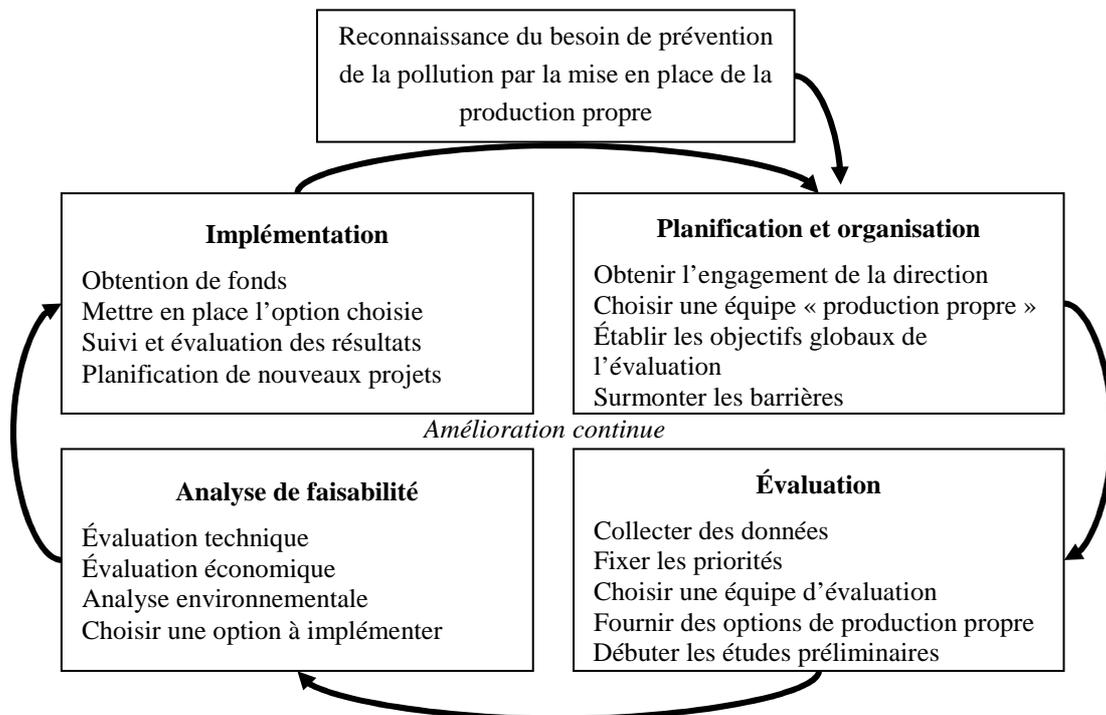


Figure 8 : L’amélioration continue appliquée à la production propre

I.2.1.2.2 Contexte réglementaire de mise en œuvre

La prise de conscience au niveau mondial, lors de la conférence des Nations Unies sur l'environnement humain de 1972, de la nécessité de préserver globalement l'environnement, fut le point de départ de nombreux débats internationaux faisant de la protection de l'environnement une priorité. Mais c'est au cours du Sommet de la Terre réuni à Rio de Janeiro en 1992, qu'il y a eu un véritable élan décisif dans cette direction avec notamment la reconnaissance de la nécessité d'appliquer les principes de précaution³ et de prévention et de développer et transférer les technologies propres « *pour protéger l'environnement, des mesures de précaution doivent être largement appliquées par les États [...] l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement* ».

Au niveau européen, bien que les premières actions en faveur de l'environnement aient vu le jour au début des années 1970, c'est le traité de Maastricht qui a conféré à l'environnement le rang de "politique européenne". Cette politique a par la suite évolué, passant progressivement d'un ensemble de législations minimales et thématiques, à une stratégie globale et intégrée. L'un des textes forts issus de cette stratégie intégrée est la directive européenne IPPC de 1996 qui préconise la prévention et l'application des MTD et, par conséquent, implicitement, l'application de la production propre.

En France, la quasi-totalité des textes législatifs relatifs à l'environnement en vigueur, découlent de règlements et directives européens. C'est au travers de ces textes, d'études à caractère réglementaire tels que les études déchets ou les bilans de fonctionnement décennaux que les industriels doivent justifier de la mise en œuvre de technologies propres.

- ➔ L'étude déchet a été imposée de manière réglementaire dans la circulaire ministérielle du 28 décembre 1990 aux installations classées pour la protection de l'environnement [AIDA, 2009]. Cette étude se veut incitatrice de la réduction de la production des déchets ainsi que de leur toxicité. Elle encourage également les efforts de valorisation et de traitement des déchets dans le but d'envoyer uniquement les déchets ultimes en décharge [LAFOREST *et al.*, 2006]. Elle comporte trois volets :
- Un état des lieux descriptif des déchets générés par l'installation (désignation quantité, composition...)
 - Une étude technico-économique des solutions alternatives. Cette étude est basée sur cinq niveaux de gestion des déchets proposés au Tableau 6.

Tableau 6 : Niveaux de gestion des déchets

Niveau de gestion	Définition
Niveau 0	Élimination complète des déchets dans le cas d'impact important sur l'environnement et la santé humaine
Niveau 1	Réduction à la source de la quantité et de la toxicité de déchets produits en général à l'intérieur de l'unité de production
Niveau 2	Recyclage ou valorisation des sous-produits de fabrication (valorisation matière ou énergétique)
Niveau 3	Traitement ou prétraitement des déchets
Niveau 4	Mise en décharge ou enfouissement en centre d'enfouissement technique

↑ Plus prioritaire

Moins prioritaire

³ Principe selon lequel « l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable » Article L110-1 du Code de l'environnement [AIDA, 2009].

Les niveaux 1 et 2 correspondent au concept de production propre.

- La validation des filières d'élimination de déchets retenue. L'industriel doit justifier qu'il n'est techniquement pas possible à un coût économiquement acceptable d'opter pour un niveau de gestion inférieur à celui qu'il utilise.

Par conséquent l'étude déchet constitue un instrument d'incitation des industriels à la mise en place de stratégies de production propre dans les entreprises.

➔ L'article 2 de l'arrêté ministériel du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des ICPE soumises à autorisation, préconise l'adoption de la production propre : « *les installations sont conçues de manière à limiter les émissions polluantes dans l'environnement, notamment par la mise en œuvre de technologies propres, le développement de techniques de valorisation, [...] et la réduction des quantités rejetées* » [AIDA, 2009].

➔ L'arrêté du 29 juin 2004 relatif au bilan de fonctionnement prévu par l'article 17-2 du décret 77-1133 du 21 septembre 1977 impose aux ICPE la réalisation d'un bilan de décennal fonctionnement [AIDA, 2009]. Ce document obligatoire vise le réexamen des conditions de fonctionnement des installations classées et la réactualisation de l'arrêté préfectoral d'autorisation à exploiter en fonction des changements substantiels ou de pollutions accidentelles survenues.

Les ateliers de traitement de surfaces dont le volume des baignoires de traitement est supérieur à 30 m³ sont soumis à ce bilan de fonctionnement décennal. Pour cela, l'exploitant doit présenter de manière détaillée les techniques de production mises en œuvre dans l'installation et les techniques de réduction d'émissions en les comparant aux MTD. De plus, l'exploitant se doit de faire des propositions argumentées de mesures de correction et d'amélioration envisagées en ce qui concerne la réduction des émissions et l'utilisation rationnelle de l'énergie [LAFORREST *et al.*, 2006].

Ces textes montrent que l'État dispose de moyens de pression réglementaire pour favoriser la mise en place de la production propre au sein des entreprises. Néanmoins il existe également des mesures incitatives.

➔ La loi n°64-1245 du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution est à l'origine de la création d'agences financières de bassins⁴ plus communément connues sous l'appellation d'Agence de l'eau. Ces établissements publics de l'État sont chargés entre autres de susciter et de faciliter financièrement et techniquement des actions de lutte contre la pollution des eaux. Pour cela elles appliquent le principe pollueur-payeur⁵ dans le but d'apporter un soutien dans la mise en œuvre d'actions visant à réduire l'impact des activités industrielles sur les milieux aquatiques (actions visant à réduire ou supprimer les pollutions chroniques, réduire les rejets de PME, prévenir les risques de pollution accidentelle, optimiser l'usage des ressources en eau existantes). Le Tableau 7 propose quelques exemples d'aides financées par l'agence de l'eau Rhône - Méditerranée - Corse [EAURMC, 2009].

⁴ On entend par « bassin » des groupements de bassins hydrographiques français qui sont au nombre de 6 (Adour - Garonne ; Artois - Picardie ; Loire - Bretagne ; Rhin - Meuse ; Rhône - Méditerranée - Corse ; Seine - Normandie)

⁵ Le principe pollueur-payeur selon lequel « *les frais résultants des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportées par celui-ci* » est défini à l'article L110-1 du Code de l'environnement [AIDA, 2009].

Tableau 7 : Exemples d'aides de l'agence de l'eau Rhône - Méditerranée - Corse

Type d'actions	Type d'intervention	Taux de subvention
Réduction et suppression des pollutions chroniques	Études préalables aux travaux	50%
	Mise en place de dispositifs d'auto-surveillance	30%
	Travaux de réduction des pollutions classiques et toxiques (technologies propres , séparation des réseaux...)	30%
Réduction des rejets	Études, animation soutien aux structures porteuses	50%
	Communication	50%
Prévention des pollutions accidentelles	Bassins de confinement, aires de stockage sélectif des déchets	Études 50% Travaux 30%
Optimisation de l'usage des ressources en eau	Développement de technologies économes en eau , recyclage de l'eau de refroidissement	50%

I.2.2 Applicabilité au secteur du traitement de surface

Intéressons nous maintenant à l'application de ces stratégies de production propre dans le secteur du traitement de surfaces.

I.2.2.1 Description des stratégies

→ **Les bonnes pratiques** visent essentiellement l'amélioration de l'existant. Ces pratiques sont en général des mesures génériques applicables à différents secteurs d'activités. Pour l'activité du traitement de surface, il peut s'agir de mesures :

- de stockage (zones appropriées et à l'abri des intempéries, récipients appropriés...)
- d'inventaire (étiquetage et enregistrement des matériaux, gestion des stocks...)
- de manipulation (procédures écrites de maintien des baignoires, personnel spécifique...)
- de sensibilisation du personnel (fermeture des robinets, port des EPI...)
- opérationnelles (couvertures des baignoires chaudes non utilisées, entretien préventif des équipements, mise en place de débitmètres, de détecteurs de seuil haut...)

→ **Le meilleur contrôle des procédés** est atteint principalement par la détermination des conditions optimales de fonctionnement des baignoires [LAFORREST, 1999]. En considérant l'entraînement (e) comme la source la plus significative de perte de matière première et indirectement d'eau, ainsi que la principale cause de la plus grande partie des eaux résiduaires et déchets, la minimisation de cet entraînement est donc fondamentale [CARPP, 2002].

La pollution par l'entraînement peut être limitée en optimisant les paramètres de rinçage tels que l'agitation, la durée du rinçage, les débits ou encore les rapports de dilution (Rd) [LEVEILLARD *et al.*, 2006]. Ce dernier est un indicateur de la qualité des rinçages. Le Tableau 8 suivant présente quelques rapports de dilution optimaux en fonction du type de bain mis en œuvre [LAFORREST, 1999] [CARPP, 2002].

Partie I : Contexte et objectifs

Chapitre I.2 : La production plus propre et son application dans le secteur du traitement de surfaces

Tableau 8 : Rapports de dilution optimaux en fonction du type de bain

Type de bains	Rapport de dilution Rd
Préparation (dégraissage, décapage)	500 à 5000
Bains de dépôt multicouche (Cu, Ni, Cr...)	5000 à 10000
La plupart des bains de dépôt	5000 à 10000
Après la passivation au Chrome VI	1000 à 2000
Bains de phosphatation et d'oxydation anodique d'aluminium	2000 à 5000
Rinçages finaux critiques	>10000

Pour la majorité des entreprises du secteur, ces paramètres (entraînement et Rd) sont malheureusement indéterminés, ce qui entraîne en général des débits de lavage très supérieurs à ceux nécessaires [CARPP, 2002].

Une diminution de l'entraînement peut également être obtenue en modifiant certaines propriétés des bains (ajout de tensioactifs) et en tenant compte de la forme et de la rugosité des pièces [LEVEILLARD *et al.*, 2006].

→ **Le remplacement d'intrant** (substitution des matières premières) est l'une des alternatives couramment employées pour diminuer la génération de flux de pollution. En effet, les procédés de préparation des pièces ou ceux de traitement utilisent bien souvent des matières hautement toxiques. Or il existe des matières basées sur des produits chimiques plus respectueux de l'environnement donnant de bons résultats. Le Tableau 9 présente quelques exemples de produits de substitution existants [CARPP, 2002] [BREF STM, 2005].

Tableau 9 : Produits de substitution existants pour différents types de bains

Bain	Produit courant	Produit de substitution	Action du produit
Dégraissage	Solvants chlorés (trichloroéthane, trichloroéthylène)	Mélanges terpéniques (p-cymène) ; Hydrofluoroéthers	Biodégradables
	Produits dégraissants à base d'EDTA	Produits à base de gluconate de sodium	Meilleure précipitation des métaux complexés
Décapage	Acide chlorhydrique	Acide sulfurique	Contrôle de l'attaque du métal
Chromage	Produits à base de chrome hexavalent	Produits à base de chrome trivalent	Diminue la toxicité
Cuivrage	Bains cyanurés	Bains acides ou alcalins	Diminue la toxicité
Zingage	Zingages alcalins cyanurés	Zingages acides ou alcalins non cyanurés	Diminue la toxicité

→ **La modification des procédés** dans le secteur du traitement de surface passe principalement par la modification des fonctions de rinçage dans le but de diminuer la consommation d'eau tout en assurant la qualité de ces rinçages. En effet la structure de ces rinçages a une influence directe sur la quantité d'eau mise en jeu (Figure 9) [LAFORREST, 1999]. Les rinçages courant simples (cuve alimentée en continu en eau propre) peuvent être remplacés par des rinçages en cascade dans lesquels l'eau circule à contre courant du sens de passage des pièces. La modification de la structure des rinçages permet de réduire drastiquement le débit d'eau de lavage nécessaire par rapport à un rinçage courant simple (débit d'eau réduit de 97,6% avec un rinçage cascade double et de 99,3% avec un rinçage cascade triple).

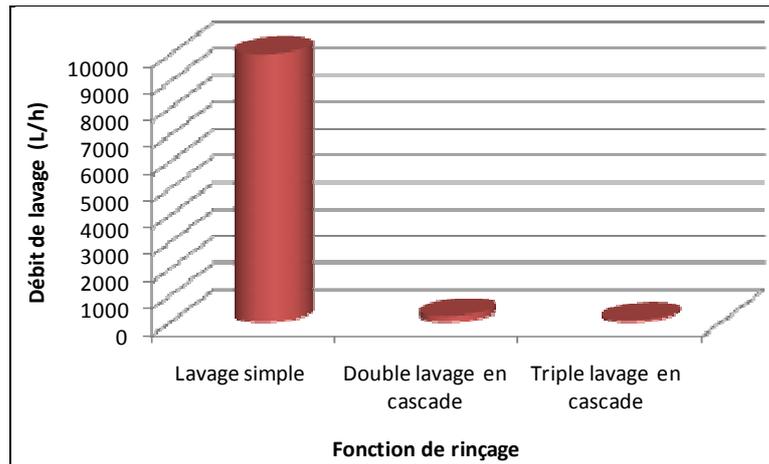


Figure 9 : Débit d'eau de lavage nécessaire selon la fonction de rinçage utilisée avec $R_d = 2000$ et $e = 5L/h$

D'autres types de lavage comme le rinçage éco (rinçage de la pièce avant et après le bain de traitement) qui permet de diviser par deux la concentration du flux entraîné si ce bain n'est jamais vidangé ou encore des rinçages par aspersion (eau pulvérisée sur les pièces sous forme de douchette ou spray qui accroît la qualité des rinçages) peuvent être mis en place.

→ Les stratégies de **valorisation des sous produits** et la **valorisation sur place** ont été regroupées sous le terme de **valorisation**. Cette dernière peut être mise en œuvre par l'utilisation de procédés de valorisation. Il existe une très grande variété de procédés qui peuvent être classés en cinq groupes principaux :

- les techniques électrochimiques dans lesquelles l'électricité permet d'oxyder ou de réduire les espèces dissoutes dans le but de régénérer un flux ou d'en extraire les métaux valorisables (électrolyse, électro-floculation)
- les techniques membranaires dans lesquelles une membrane perméable permet de séparer, sous l'effet d'un gradient de pression, les particules en fonction de leur taille (ultra, micro, et nano-filtration, osmose inverse)
- les techniques électro-membranaires qui couplent les propriétés migratoires de l'électrolyse et les propriétés sélectives des techniques membranaires (électrodialyse, électro-électrodialyse, électrolyse à membrane bipolaire)
- les techniques d'échange qui utilisent les affinités entre certains ions pour adsorber ou échanger les ions polluants d'un effluent contre d'autres ions non polluants (résines échangeuse d'ions, résines adsorbantes)
- et les autres méthodes qui sont des méthodes mécaniques ou qui jouent sur des paramètres physico-chimiques comme la différence de densité, de volatilité ou de coefficient de partage (centrifugation, extraction liquide/ liquide, évaporation, séparateur gravitaire...)

Le Tableau 10 donne des exemples d'application de ces procédés dans le secteur du traitement de surfaces [BREF STM, 2005] [CARPP, 2002] [MUIRAS *et al.*, 1995].

Partie I : Contexte et objectifs

Chapitre I.2 : La production plus propre et son application dans le secteur du traitement de surfaces

Tableau 10 : Exemple de techniques de valorisation applicables au traitement de surface

Bain	Procédé	Groupe	Action
Dégraissage	Ultrafiltration	Technique membranaire	Sépare les huiles et recycle les produits actifs des bains de dégraissage
	Centrifugation	Méthode mécanique	Sépare de façon mécanique deux phases ayant des densités différentes
Décapage	Électro-électrodialyse	Technique électro-membranaire	Purifie les bains de décapage à l'acide sulfurique en concentrant cet acide
	Retardation ionique par résine échangeuse d'ions	Technique d'échange	Fixe les chlorures contenus dans les bains de décapage à l'acide chlorhydrique. La régénération de la résine permet l'obtention d'acide chlorhydrique pur
Bains de traitement	Électrolyse	Technique électrochimique	Récupère les métaux dissous par dépôt à la cathode
	Évaporation	Méthode physico-chimique	Récupération d'eau condensée et valorisation énergétique de la vapeur

➔ **Le changement de technologie** est une remise en cause complète de l'outil de production. Le Tableau 11 propose quelques exemples de technologies de substitution envisageables pour diminuer voir stopper les flux de pollution [BREF STM, 2005] [MUIRAS *et al.*, 1995].

Tableau 11 : Exemples de technologies de substitution

Bain	Procédé	Action
Prétraitement	Laser	Nettoie sans contact en utilisant des impulsions lumineuses
	Décapage par projection de carboglace	Projeté sous haute pression des billes de glace sur la surface à nettoyer
	Dégraissage biologique	Réduction en continu les impuretés des bains par l'action de bactéries
Traitement	Dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur	Déposition des couches à partir d'une phase gazeuse
	Traitement de conversion de type implantation ionique	Implantation d'atomes ionisés dans un solide par bombardement sous vide

➔ **La modification des produits** est une stratégie très peu usitée dans ce secteur. En effet, les traiteurs de surfaces suivent en général un cahier des charges spécifié par le client notamment pour les ateliers façonniers. « *Les concepteurs sont les acteurs principaux dans la modification du produit* » [DAOUD, 2009]. De ce fait nous ne tiendrons, par la suite, plus compte de cette stratégie.

Cette section montre la variété des pratiques de production plus propre qui peuvent être mises en place dans le secteur du traitement de surfaces. Le contexte réglementaire européen (directive IPPC) et français (étude déchets, bilan décennal de fonctionnement...) insistent sur la nécessité de produire plus propre et oblige tant par des mesures incitatives que des mesures punitives à la mise en œuvre de mesures préventives et de technologies propre. Or, si la réglementation a des objectifs de résultat, elle ne propose pas forcément les moyens de les atteindre. Les références bibliographiques n'ont pas montré l'existence de méthodes pour le choix de ces pratiques. Les industriels sont donc bien souvent démunis pour l'implémentation de pratiques de production propre dans leurs entreprises.

I.2.2.2 Impacts et caractéristiques de la production plus propre

Il est indéniable que la mise en place de ces différentes stratégies de production plus propre engendre un impact positif sur l'entreprise et son environnement. Ainsi, Maes (1996) constate par une enquête auprès de 587 installations appartenant à divers secteurs d'activité, les effets positifs suivants [MAES, 1996]:

- La réduction de la pollution de l'eau de 95% et de l'air de 5%
- Des économies d'eau de 65%, d'énergie de 8% et de matières premières de 67%
- La valorisation des déchets dans l'usine ou à l'extérieur (26%)
- La réduction des risques d'accidents de 21%
- L'amélioration des conditions de travail (20%)

Nombre de ces effets ont été confirmés par d'autres études [VAN BERKEL, 2002a] [UNNIKRISHNAN *et al.*, 2006]. Par exemple, Giannetti *et al.* (2008) montrent que la mise en œuvre de pratiques de production propre dans une PME de dorure sur bijoux, a abouti à la réutilisation des chutes de métaux, contribuant ainsi à une réduction de 42% des déchets métalliques. D'autres effets comme la diminution de 35% de la consommation des eaux de rinçage du procédé de dorure électrolytique ou encore de 36% de l'énergie consommée par ce procédé ont été constatés après la mise en place de nouvelles procédures de contrôle et de vidange des baignoires [GIANNETTI *et al.*, 2008]. Cet exemple illustre parfaitement le type de répercussions très favorables sur la diminution de la consommation des matières et d'énergie ainsi que sur la génération de flux de pollution qui peuvent être atteints dans le secteur du traitement de surface, par l'utilisation des bonnes pratiques et un meilleur contrôle des procédés. Il est intéressant de noter que la production propre a également des effets favorables sur d'autres perspectives tels que l'emploi (augmentation moyenne des emplois de 18% [RENNINGS *et al.*, 2001]) ou encore la vie de l'entreprise (Dépassement d'habitudes routinières, réexamen des procédés et des procédures) [CARPP, 2002].

Pourtant l'utilisation de pratiques de production propre génère également d'autres types de répercussions moins favorables que les précédentes. Prenons le cas du remplacement des intrants qui semble être une action souvent intéressante, il est indispensable de faire preuve de prudence afin que la qualité du produit ne soit pas modifiée et qu'ainsi la diminution des déchets soit effective. Par exemple, un des problèmes liés à l'utilisation de la forme trivalente du chrome au lieu de l'hexavalente est la formation de dépôts sombres à la surface de la pièce baignée ce qui diminue la qualité souhaitée du produit.

Le principal objectif qu'est la réduction de la consommation d'eau peut être atteint par la modification des fonctions de rinçage. Cette modification permet également de limiter l'entraînement, vecteur majeur de pollution. Néanmoins des contraintes d'ordonnement fonctionnel peuvent être des freins à l'implantation des procédés (manque de place, problème de mise en œuvre des rinçages par aspersion) [LAFOREST *et al.*, 2000].

Laforest (1999) montre les multiples avantages de la valorisation des effluents liquides pour les industriels du traitement de surfaces tels que la réduction des coûts d'élimination, le respect des contraintes réglementaires ou encore l'amélioration de l'image de l'entreprise. Elle pointe cependant du doigt l'hétérogénéité des critères de choix de ces technologies qui limite leur mise en œuvre.

En dernier lieu le changement de technologie est une alternative radicale qui entraîne des coûts assez élevés voire même une réorientation dans la stratégie de l'entreprise (nécessité de formation des opérateurs, nouveaux clients, nouvelles contraintes réglementaires...).

Toutes ces constatations font émerger une caractéristique importante de la production propre : son aspect multi-impact. Cette variété d'impacts possibles s'observe dans les résultats qui concernent à la fois les bénéfices environnementaux, les gains au niveau du processus de production ou encore l'hygiène et la sécurité pour les aspects positifs. En ce qui concerne les aspects négatifs, l'implémentation de pratiques de production propre est génératrice de risques pour l'industriel (remise en cause de la qualité des produits, perte de parts de marché, augmentation des contraintes réglementaires par exemple).

Une autre caractéristique de la production plus propre qui ressort de cette analyse est le caractère tant quantitatif (consommation d'eau, et d'énergie...) que qualitatif (qualité du produit, image de l'entreprise...) de ces impacts.

Ainsi, la mise en œuvre de l'une de ces stratégies nécessite la connaissance de ces multiples impacts et de ces risques associés pour aller vers une Production non seulement Plus Propre mais également Plus Sûre (4PS).

Comment alors évaluer, estimer les différents impacts liés à l'implémentation de ces nouvelles stratégies de production plus propre ? Les méthodes actuelles d'évaluation des impacts environnementaux sont elles adaptées à l'évaluation des impacts et des risques générés par les stratégies de 4PS ? Le chapitre suivant tente de répondre à cette dernière question.

I.3 État des lieux des méthodes d'évaluation des impacts environnementaux

La nécessité de disposer d'outils pour évaluer les impacts environnementaux est d'une importance grandissante [GONZALÈS, 2008]. Ce chapitre a pour objectif d'identifier les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux existantes et de déterminer si elles sont adaptées à l'évaluation des impacts des pratiques de production plus propre et plus sûre. Dans un premier temps nous aborderons la terminologie afin de saisir l'objectif des méthodes existantes. Puis nous ferons le point sur les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux les plus représentatives en présentant leurs avantages et leurs limites. Dans le troisième paragraphe nous nous efforcerons de mettre en évidence le manque d'adéquation de ces outils pour l'évaluation des impacts de l'implémentation de pratiques de production plus propre et plus sûre dans une entreprise.

I.3.1 Terminologie

Il semble en tout premier lieu indispensable d'apporter quelques précisions sur les termes employés. En effet, pour répondre aux besoins de prise en compte de l'environnement, divers outils et méthodes d'évaluation des impacts environnementaux ont été développés ces dernières années, dans tous les domaines. Il peut s'agir de méthodes de diagnostic, d'évaluation ou encore d'audit. Le petit Robert (2001) définit ces termes comme suit :

- Diagnostic : « Détermination d'un état d'après ses symptômes »
- Évaluation : « Action d'évaluer, de déterminer la valeur et l'importance d'une chose »
- Audit : « Mission d'examen et de vérification de la conformité (aux règles de droit, de gestion) d'une opération, d'une activité particulière ou de la situation générale d'une entreprise »

Personne (1998) propose une signification différente de ces termes lorsqu'ils sont employés dans l'environnement industriel actuel :

- Les méthodes de diagnostic sont utilisées pour établir un premier contact entre l'entreprise et l'environnement. Généralement basées sur des questionnaires à choix multiples, elles permettent de dresser un état des lieux qualitatif de l'entreprise.
- Les méthodes d'évaluation vont plus loin que le diagnostic en répondant à un besoin de mise en place de plans d'actions pour améliorer les facteurs d'impacts⁶ de l'entreprise. Basées sur des données brutes de terrain, elles cherchent à identifier les dysfonctionnements du système de production et à associer des solutions techniquement, environnementalement et financièrement viables.
- Les méthodes d'audit évaluent de manière cyclique la conformité d'une entreprise aux exigences d'un référentiel choisi. Elles s'adressent donc à des entreprises déjà engagées dans un système de management environnemental.

⁶ Personne (1998) définit le facteur d'impacts comme la cause de l'atteinte de l'écosystème (substance polluante rejetée ou prélèvement de ressource...)

Suite à ces définitions, seules les méthodes de diagnostic et d'évaluation des impacts environnementaux seront considérées. La mise en œuvre des méthodes d'audit nécessite que les entreprises auditées aient déjà engagé une démarche intégrée de management environnemental, ce qui n'est pas tout le temps le cas dans le secteur du traitement de surface. De plus elles requièrent les compétences d'un auditeur certifié externe à l'entreprise, entraînant par conséquent un coût plus important pour l'industriel. Ces méthodes ne sont donc pas adaptées.

I.3.2 Classification des méthodes d'évaluation existantes

Sans toutefois être exhaustif, un inventaire des méthodes de diagnostic et d'évaluation des impacts environnementaux est proposé.

Cet inventaire découle d'une étude bibliographique identifiant 71 méthodes d'évaluation environnementale (toutes disciplines confondues). Dans ce mémoire seulement vingt de ces méthodes ont été sélectionnées et analysées. En effet les auteurs se sont uniquement intéressés aux méthodes applicables aux entreprises. De plus, les méthodes de monétarisation des impacts ont été écartées puisque comme il a été vu, les impacts liés à l'implémentation de pratiques de 4PS ne sont pas forcément mesurables en terme financier (amélioration des conditions de travail, fédération du personnel dans un projet commun...).

Chaque méthode a été caractérisée à l'aide des 7 attributs suivants :

- Intitulé de la méthode
- Objectifs visés par cette méthode
- Type d'approche (Quel est l'objet étudié ?)
- Type d'impact étudié (effet de serre, biodiversité, etc....)
- Les avantages et inconvénients de la méthode
- Le type d'utilisation pressentie
- Les références

Pour ne pas surcharger ce mémoire, le tableau de synthèse de ces méthodes est présenté en **ANNEXE 1**.

L'analyse des méthodes de diagnostic et d'évaluation montre que les outils peuvent être classés selon trois caractéristiques :

- ➔ La première caractéristique importante est son **angle d'approche**. Il peut s'agir soit d'une approche « site » ou d'une approche « produit ». L'approche « site » a une dimension spatiale et temporelle puisqu'elle concerne le site de production ou le territoire concerné [PERSONNE, 1998]. L'approche « produit » cherche quand à elle à prendre en compte l'impact environnemental dès sa conception [HARSCOET, 2007]. La Figure 10 visualise ces deux approches [BIAU, 2007].

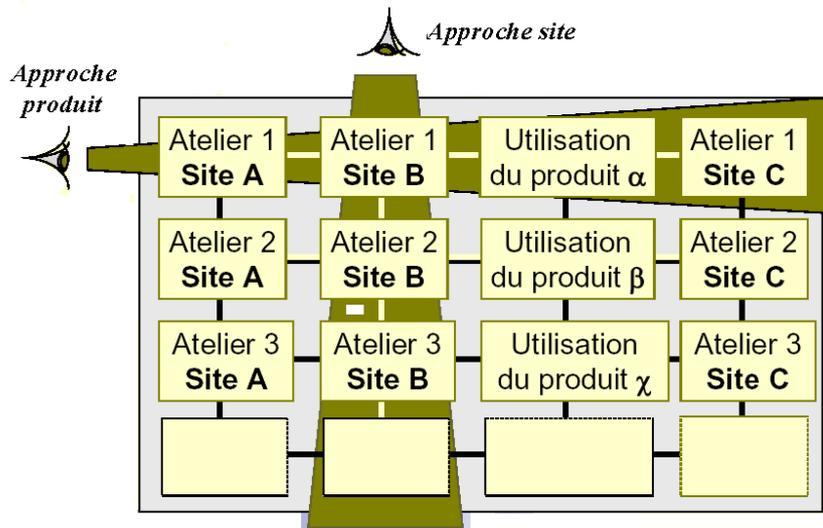


Figure 10: Approche « Site » versus Approche « Produits »

La méthode *Eco-indicators* est un exemple d'approche produit puisqu'elle fait l'inventaire des impacts d'un produit sur son cycle de vie. Un exemple d'approche site est celui de la méthode *Safe Climate* qui cherche à comptabiliser les émissions de CO₂ dans toute une organisation.

- ➔ La seconde caractéristique est la **nature des impacts étudiés**. Les impacts peuvent être globaux ou locaux. Les impacts globaux concernent l'échelle planétaire (Gaz à effet de serre, biodiversité, eutrophisation par exemple) tandis que les impacts locaux concernent l'environnement proche (consommation de ressources, efficacité énergétique, rejets...). Les méthodes *CORINAIR* et *Scan Rwin* étudient respectivement les impacts globaux et les impacts locaux. *CORINAIR* s'intéresse aux effets des polluants atmosphériques (smog, qualité de l'air...) tandis que *Scan Rwin* concerne la surveillance des consommations énergétiques. Toutefois un cas particulier semble intéressant à relever : la méthode MASIT (Multicriteria Analysis for Sustainable Industrial Technologies) dont la nature des impacts étudiés concerne à la fois des impacts locaux et globaux. Cette méthode qui résulte d'une collaboration entre l'ADEME, le CEA, ECOBILAN et EDF se propose de comparer une technologie émergente à une technologie de référence au long de leur cycle de vie. MASIT intègre à la fois des critères locaux (« toxicité », « écotoxicité », « atteinte à la biodiversité », « production de déchets »), et des critères globaux (« d'épuisement des ressources non renouvelables » et « d'effets globaux⁷ ») [BENOIT, 2002].
- ➔ Le troisième aspect intéressant est la **prise en compte d'un impact unique ou de multiples impacts**. Par exemple le *GreenHouse Gaz protocole* (GHG) a une approche mono-impact puisqu'il ne s'intéresse qu'à l'impact sur l'effet de serre exprimé en tonnes équivalent carbone. L'*Analyse du Cycle de Vie* qui estime les impacts potentiels d'un produit sur l'effet de serre, l'eutrophisation ou encore la destruction de la couche d'ozone, est une méthode multi-impacts [GONDRAN, 2001].

En conclusion, les trois principales caractéristiques des méthodes de diagnostic et d'évaluation des impacts environnementaux sont illustrées sur la Figure 11 qui positionne

⁷ À l'échelle de la planète (changement climatique, désertification...)

quelques méthodes selon la nature des impacts concernés, l'aspect mono ou multi-impacts et enfin l'approche Site ou Produit adoptée (pour la clarté de la figure, seules 15 des 20 méthodes sont positionnées).

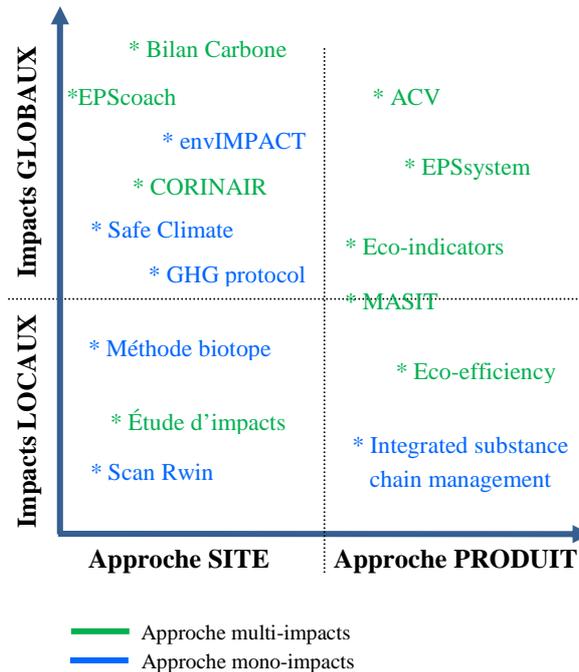


Figure 11 : Positionnement de 15 méthodes d'évaluation des impacts dans le domaine industriel

I.3.3 Adaptabilité des méthodes

I.3.3.1 Adaptabilité des méthodes au secteur du traitement de surfaces

- Comme l'illustre la Figure 11, certaines méthodes d'évaluation environnementales s'intéressent aux impacts globaux. Elles ne permettent donc pas d'évaluer les impacts environnementaux des ateliers de traitement de surface puisque ce secteur contribue peu aux impacts globaux [BREF STM, 2005].
- D'autres méthodes sont basées sur une approche orientée produit. Elles consistent en général, en un inventaire des entrants et des sortants d'un système de produits le long de son cycle de vie. Le traitement de surfaces est un secteur d'activité « charnière » puisqu'il intervient en finition des produits des autres secteurs d'activités. Il en résulte une multiplicité des produits concernés mais également une multiplicité des traitements possibles. Il se pose alors les difficultés classiques liées à l'affectation des flux dans les inventaires : « Comment affecter tel ou tel intrant à un produit plutôt qu'à un autre, dès lors que le processus de production ne débouche pas sur un produit unique? » [CASEAU, 2002]. De plus, bien que ces méthodes permettent de comptabiliser les impacts au long du cycle de vie d'une technologie pour en faciliter le choix [BENOIT, 2002] [WEIDENHAUPT *et al.*, 2000], elles nécessitent beaucoup d'informations qui ne sont pas toujours facilement accessibles et sont coûteuses en termes de temps [EL BOUAZZAOU, 2008]. Sur la base de ces constats, les méthodes

d'évaluation basées sur une approche produit semblent inadaptées pour l'évaluation rapide et simple des impacts environnementaux des ateliers de traitement de surfaces.

I.3.3.2 Adaptabilité des méthodes à l'évaluation des impacts liés aux pratiques de production plus propre

- Sur l'ensemble des méthodes d'évaluation des impacts environnementaux présentées, seules trois méthodes s'intéressent aux impacts locaux en ayant une approche « site ». Les méthodes Biotope et Scan Rwin, sont basées sur une approche mono-impact. Or les méthodes mono-impacts ne considèrent qu'un seul aspect; par exemple l'effet sur la biodiversité pour la méthode biotope. Dans un contexte de développement durable et de mise en œuvre de la 4PS il est de plus en plus nécessaire d'associer des critères économiques et sociaux à l'évaluation des impacts environnementaux [BENOIT, 2002] [ROUSSAT, 2007]. Ces méthodes sont donc à écarter pour l'évaluation des impacts environnementaux des pratiques de production propre.

- La méthode « Étude d'impacts » est la seule qui s'intéresse à la fois aux impacts locaux, en ayant une approche site et concernant de multiples impacts. Cette étude, imposée en France de manière réglementaire dans le code de l'environnement (Livre V - Titre I^{er}) pour l'élaboration des demandes d'autorisation à exploiter des ICPE, doit permettre pour chacune des thématique de pollution (eau , air, bruit, déchets...) de connaître la situation avant la mise en service de l'installation, ses caractéristiques et ses effets directs sur l'environnement, les mesures prises pour en atténuer les effets et la situation prévisible après mise en service [Agora 21 et al., 2002] [AIDA, 2009]. Bien que cette étude permette d'appréhender les divers impacts environnementaux de l'entreprise, elle reste essentiellement descriptive et qualitative (pas de quantification des impacts). Par conséquent cette étude n'est pas adaptée à l'évaluation des impacts des pratiques de 4PS qui sont à la fois qualitatifs et quantitatifs.

L'état des lieux des méthodes d'évaluation existantes montre la non-existence de méthodes adaptées à la fois à l'évaluation de l'ensemble des impacts liés aux pratiques de production propre (approche multi-impacts et aspects qualitatifs et quantitatif) et à la complexité du secteur du traitement de surfaces (impacts locaux et approche site). Ce constat fait émerger la nécessité de développer une nouvelle méthode de diagnostic/ d'évaluation des impacts liés à la mise en œuvre de pratiques de 4PS.

I.4 Synthèse et objectifs

Cette première partie du mémoire a permis de révéler les problèmes et enjeux de l'activité du traitement de surfaces. En effet, ce secteur, qui a pour but de modifier la surface des matériaux, est un secteur en prise directe avec les préoccupations environnementales. La complexité de ces problèmes environnementaux est accrue par la diversité des produits chimiques utilisés, des applications qui en sont faites, des régions, des objectifs des entreprises, ou encore des attentes des clients. En outre, ce secteur est soumis à une réglementation environnementale de plus en plus contraignante.

La prise de conscience mondiale de la nécessité de conjuguer développement économique, social et protection de l'environnement a conduit à la naissance du concept de production plus propre. Les institutions incitent les industriels à investir dans des procédés plus propres. Dans le secteur du traitement de surfaces, trois objectifs principaux sont visés lors de la mise en place des stratégies de production propre :

- Réduction de l'entraînement
- Minimisation de la consommation d'eau
- Amélioration du procédé de fabrication

Or les stratégies de production plus propre sont nombreuses. Il en résulte que le choix d'une stratégie de production propre adaptée n'est pas toujours trivial et nécessite la prise en compte de nombreux critères. Cette première partie montre qu'il n'existe pas à proprement parler, de méthodes visant à les aider dans le choix de stratégies de production propre.

De plus la mise en application de ces stratégies de production propre engendre de multiples impacts (sanitaire, financier, environnemental, sécuritaire). Or dans le chapitre III, l'étude non exhaustive, des méthodes actuelles permettant d'évaluer les impacts environnementaux montre la non-existence d'outils adaptés à la fois à l'évaluation de l'ensemble des impacts liés aux pratiques de production propre (approche multi-impacts et aspects qualitatifs et quantitatifs) et à la complexité du secteur du traitement de surfaces (impacts locaux et approche site).

Pour palier à ce manque, il paraît nécessaire d'orienter cette recherche vers un nouvel outil d'évaluation plus approprié à l'activité du traitement de surfaces et permettant d'avoir une vision globale de l'ensemble des impacts générés lors de l'implémentation de pratiques de production propre dans les ateliers. Les caractères « estimant » mais aussi « suggérant » de l'évaluation permettent à la fois de faire un état des lieux des impacts, tout en associant des actions visant à les réduire. Notre tâche a consisté à concevoir, élaborer, expérimenter et valider une méthodologie d'évaluation des impacts de pratiques de Production Plus Propre mais également Plus Sûre (4PS). Selon Pingaud (2005), la méthodologie peut être définie comme « *un ensemble de méthodes⁸ qui contribuent à résoudre un problème en les utilisant selon les règles établies* ».

⁸ Une méthode est une technique de résolution de problèmes caractérisée par un ensemble de règles bien définies qui conduisent, pour le problème considéré, à une résolution correcte [MEGARTSI, 1997]

La méthodologie d'évaluation des impacts s'applique au travers de deux méthodes distinctes :

- Une méthode de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS
- Une méthode d'aide au choix de ces pratiques de 4PS.

Dans la deuxième partie de ce mémoire, nous nous attacherons à décrire les bases méthodologiques qui ont conduit à l'élaboration de ces outils, outils qui seront développés dans la troisième partie.

PARTIE II : REVUE DES OUTILS MÉTHODOLOGIQUES

II.1 Introduction

Les chapitres précédents ont été consacrés à la présentation du contexte du traitement de surface et du concept de production propre (chapitre I.1 et I.2), à l'analyse des méthodes d'évaluation environnementales existantes (chapitre I.3) et finalement à la définition des objectifs de cette thèse (chapitre I.4). Ces chapitres ont permis de mettre en évidence la nécessité d'une nouvelle méthodologie d'évaluation des impacts qui tienne compte à la fois de l'ensemble des impacts liés à ces pratiques (approche multi-impacts) mais également des spécificités du secteur du traitement de surfaces (approche site et impacts locaux).

L'objectif de cette partie est donc de mettre en avant les bases qui ont permis la conception, la réalisation et l'expérimentation de la méthodologie d'évaluation des impacts de pratiques de production plus propre et plus sûres. Il s'agit ainsi de décrire les modèles et les méthodes qui ont inspiré la construction de la méthodologie.

La première articulation de cette partie (II.2) est consacrée à la description des bases systémiques et des outils de modélisation d'entreprises. Étant donné la nécessité de l'adoption d'une approche « site » pour l'évaluation des impacts des pratiques de 4PS, l'intérêt pour les méthodes de modélisation d'entreprises est évident. De plus, pour la prise en compte des risques liés à l'implémentation de pratiques de 4PS, une brève étude sur le management des risques fait l'objet de cette section.

Afin d'évaluer l'impact sur l'entreprise et son environnement lors de la mise en place d'une pratique de 4PS, des indicateurs permettant de quantifier les effets de cette modification seront utilisés. Le chapitre suivant (II.3) cherche par conséquent à décrire ce que sont les indicateurs. Cette section est également consacrée à la description d'un outil d'analyse structurelle permettant d'établir les relations entre ces indicateurs.

Le troisième chapitre (II.4) s'intéresse à l'aide à la décision. L'utilisation de ces méthodes est nécessaire pour répondre au second objectif soulevé dans la problématique de cette thèse : aider les industriels dans le choix de pratiques de production propre adaptées au contexte de leur entreprise. Nous présenterons donc dans cette section la démarche générale de l'aide à la décision ainsi que quelques méthodes d'analyse multicritère.

Une synthèse de ces outils fera l'objet du chapitre II.5.

II.2 Entreprises, Systémique et Risques

II.2.1 L'entreprise, un système complexe

II.2.1.1 Le système : définition et notions

La notion de système se retrouve dans un nombre croissant et varié de domaines et de disciplines : le système solaire, le système nerveux, ou encore le système d'exploitation sont des termes couramment employés. Selon Bertalanffy (1968), un des fondateurs de la théorie générale des systèmes, le concept de système réside dans le contraste entre la totalité et la somme. Concrètement cela signifie qu'un système ne peut être réductible à ses parties mais qu'il faut considérer l'agencement de ces parties et leurs interrelations [SAUVANT, 2003] [REPETTI, 2004]. Un système est donc un ensemble organisé d'éléments liés par des relations et constituant un tout (Figure 12) [ROBERT, 2001].

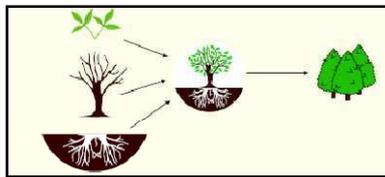


Figure 12 : Le tout n'est pas la somme des parties [CHARPULAT, 2007a]

Le système n'existe que s'il possède à la fois une structure, une activité, un environnement passif ou actif avec lequel il interagit, une évolution dynamique, des finalités dont l'une est le maintien de son organisation et une frontière fonctionnelle ou structurelle limitant le système. Si la frontière autorise le passage de flux matériels, énergétiques, ou informatifs, le système est dit ouvert. Les éléments du système sont liés par un réseau à travers lequel transitent des flux de matières et d'informations. Il existe de nombreuses relations entre les divers éléments telles que les interactions (action entre les éléments), les rétroactions (actions régulatrices de sens contraire), la récursivité (auto-accelération du système en fonction de son état et de sa finalité) [LE MOIGNE, 1977]. La Figure 13 permet de visualiser toutes ces caractéristiques.

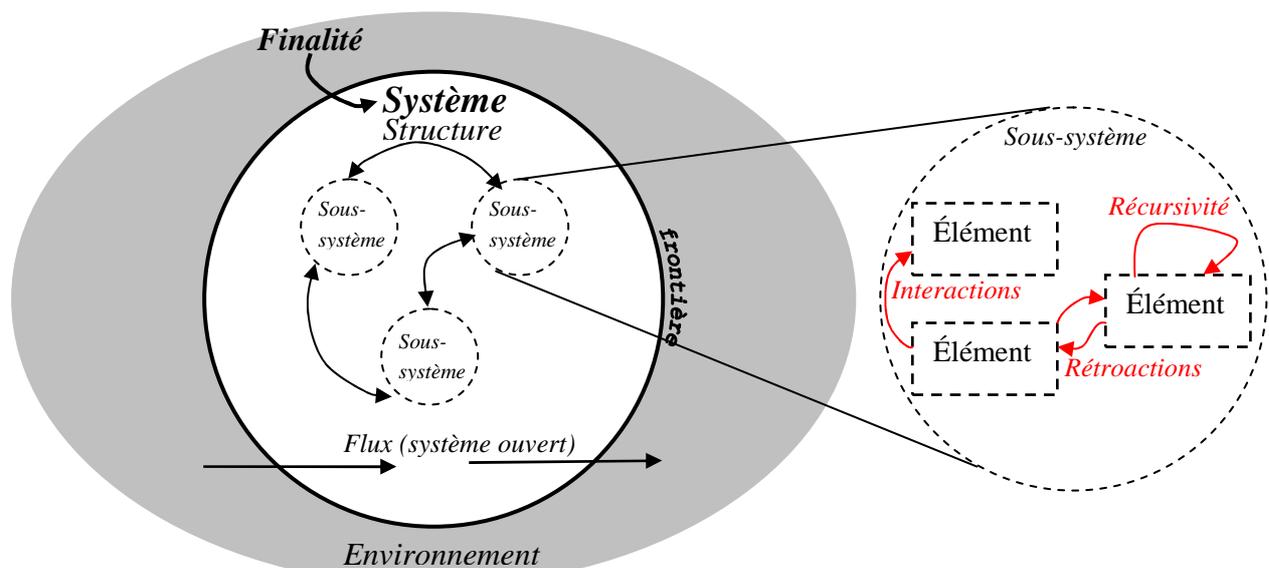


Figure 13: Schéma de représentation d'un système [DESTHIEUX, 2005]

II.2.1.2 Le système Entreprise

L'approche systémique peut être appliquée à l'analyse de l'organisation et du fonctionnement des entreprises. Barthélémy (2000) affirme « *une entreprise est une combinaison dynamique de ressources humaines techniques et financières concourant, par le biais de son organisation, qui se manifeste et s'applique par sa communication, à la réalisation de ses objectifs fondamentaux* » [BARTHÉLÉMY *et al.*, 2000]. L'entreprise est un système à part entière :

- L'entreprise possède sa propre **structure**. Les entreprises peuvent adopter différents types de structures comme par exemple la structure fonctionnelle traditionnelle qui repose sur les différentes fonctions exercées au sein de l'organisation (fonction de production, commerciale, financière, ressources humaines...) [POURCEL *et al.*, 2005].
- L'entreprise a pour **activité** sa production de biens ou de services destinés au marché.
- L'entreprise est immergée dans un **environnement** actif. L'environnement de l'entreprise est constitué de partenaires économiques (actionnaires, concurrents) et sociaux (marché de l'emploi, riverains), du milieu naturel environnant (cours d'eau, zone protégées), d'institutions (monde de la recherche, administration)...etc.
- La **frontière** du système entreprise peut être matérialisée par ses murs. Étant donnée que l'entreprise échange avec son environnement puisque d'une part, les ressources de l'entreprise sont directement puisées de son environnement (les capitaux, le personnel, l'énergie, ou encore les matières premières...) et d'autre part, l'environnement reçoit les flux sortants de l'entreprise (produits finis, pollutions, rémunérations...), le système entreprise est donc un système ouvert [DASSENS, 2007].
- La maximisation du profit est traditionnellement considérée comme la **finalité** du système Entreprise. Néanmoins d'autres objectifs peuvent être poursuivis. Ainsi les coopératives et certaines entreprises publiques ont pour but de rendre service à la collectivité (entreprise publique) ou à une communauté particulière de travailleurs ou de consommateurs (coopérative).
- L'entreprise est constituée d'un ensemble de ressources (les machines, les hommes, le capital...) nécessaires à son fonctionnement, et formant un véritable **réseau**. Les nombreuses interactions entre ces différentes ressources font émerger la notion d'entreprise.
- L'entreprise évolue pour s'adapter à son environnement en perpétuelle évolution. Darras (2004) souligne par exemple l'**évolution** des relations contractuelles entre les entreprises (donneurs d'ordre/fournisseurs, entreprise en partenariat...) qui se veut génératrice de multiples changements organisationnels aux frontières des entreprises. L'entreprise évolue également en interne (embauche de personnel, développement de nouveaux produits...)

Ainsi l'entreprise constitue bien un système complexe ayant des mécanismes impliquant un très grand nombre d'interactions entre des phénomènes vivants et non vivants (Huang et al., 1998) cité par [DESTHIEUX, 2005]. Pour faire face à cette complexité, la modélisation d'entreprise a émergée.

II.2.2 La modélisation d'entreprise

II.2.2.1 Généralités sur la modélisation d'entreprise

La modélisation d'entreprise a pour but de « *développer et de promouvoir des méthodes, des techniques, des modèles et des outils permettant de maîtriser le comportement de l'entreprise dans le temps* » [MATHIEU, 2004]. La finalité de la modélisation est variée. En effet on peut vouloir simplifier, analyser, synthétiser, expliquer, prévoir, optimiser, simuler, former, décrire, décider, ou encore identifier un phénomène, un secteur d'investigation [SAUVANT, 2003]. Pingaud (2003) définit le modèle par « *une représentation d'une abstraction de la réalité exprimée dans un langage* ». La modélisation ne peut donc être dissociée de l'image mentale de l'observateur. Celui-ci conçoit son modèle en fonction de sa propre construction mentale, de ses connaissances, du contexte dans lequel baigne l'objet qu'il cherche à modéliser [BRAESCH *et al.*, 1995]. Par conséquent « *La transmission n'est pas neutre* » [LE MOIGNE, 1987]. Il en résulte que le modèle recouvrera une partie des propriétés réelles du système mais également des propriétés intrinsèques au modèle [PERILHON, 2006].

Durant ces vingt dernières années, l'utilisation de la modélisation d'entreprise s'est révélé être un choix judicieux dans une optique d'obtention d'une meilleure efficacité de l'organisation de l'entreprise, et d'amélioration de ses performances. Une diversité d'outils de modélisation et de méthodes ont été développées soit par des entreprises souhaitant optimiser l'organisation de leurs processus et activités, soit par des chercheurs visant à améliorer la représentation de l'entreprise [LUPAN *et al.*, 2006] [VALLESPER *et al.*, 2003] [CHARPULAT, 2007a]. Deux types d'approche de modélisation sont rencontrés :

- Approche analytique ou cartésienne
- Approche systémique

II.2.2.2 Différentes approches de modélisation

II.2.2.2.1 L'approche analytique

Dans les années 1970, a prévalu une approche analytique ou cartésienne de la modélisation des entreprises. Cette approche considère les différentes fonctions de l'entreprise, qu'elle décompose de façon hiérarchique en un ensemble de sous-fonctions, jusqu'à atteindre un niveau de décomposition suffisamment simple pour la compréhension. L'approche analytique est simple d'utilisation, car elle procède selon une démarche naturelle pour résoudre un problème et permet de saisir plus facilement les besoins des utilisateurs. En effet la hiérarchie est le premier outil fondamental de l'esprit humain. L'approche analytique permet donc de comprendre les systèmes complexes en faisant appel à la logique humaine. Le principal inconvénient de l'approche analytique est qu'elle est en général mal adaptée à la description des relations non hiérarchiques qui peuvent exister entre les éléments. D'autre part, l'utilisation de blocs fonctionnels peut générer la redondance des données modélisées [PÉPIOT, 2005].

Deux principales méthodes relevant de cette approche sont la méthode SADT (Structured Analysis and Design Technique)/IDEF_x⁹, et PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture).

⁹ IDEF_x (Integrated computer aided manufacturing DEFinition method) regroupe 5 méthodes complémentaires de SADT

II.2.2.2.2 La modélisation systémique

À partir des années 80, l'approche systémique a émergé. D'après la Revue Internationale de Systémique (1987) citée par [DESTHIEUX, 2005] la modélisation systémique regroupe « *les démarches théoriques, méthodologiques et pratiques relatives à l'étude de ce qui est reconnu comme trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste et qui pose des problèmes de frontière, de relations internes et externes, de structures, de loi, ou de propriétés émergentes* ». Il s'agit donc d'un langage de modélisation de la réalité ayant pour objectif d'apporter une démarche conceptuelle et méthodologique [REPETTI, 2004] [PERILHON, 2006].

L'approche systémique s'oppose à l'approche cartésienne. « *L'axiomatique de la modélisation systémique se présente économiquement par contraste avec l'axiomatique de la modélisation analytique* » disait Le Moigne (1987). En effet la systémique se focalise sur les propriétés constitutives et émergentes du système considéré tandis que l'approche classique cherche à isoler les éléments du système, à les analyser puis à le recomposer [CHARPULAT, 2007a].

Le Moigne (1977) dans « la théorie du système général », propose un modèle basé sur neuf niveaux de complexité croissante permettant la modélisation de tous les systèmes complexes réels [LE MOIGNE, 1977] :

- Niveau 1 : Le système modélisé est identifiable
- Niveau 2 : Le système est actif
- Niveau 3 : Le système est régulé
- Niveau 4 : Il s'informe de son comportement, émergence de l'information
- Niveau 5: Il génère et traite l'information afin d'adapter son comportement, c'est l'émergence de la décision
- Niveau 6 : Il mémorise les informations et peut les traiter en différé, c'est l'émergence de la mémoire

La décomposition du réel en 6 niveaux abouti au modèle canonique Opération-Information-Décision (OID) formé d'un sous-système opérant, un sous-système d'information et un sous-système de décision :

- Le sous-système de décision (SSD) élabore les stratégies et décisions d'action
- Le sous-système opérant (SSO) est le cadre de l'activité tangible
- Le sous système d'information (SSI) assure le couplage entre le sous-système décisionnel et opérant par enregistrement, mémorisation, traitement et communication de l'information.

Une approche fractale¹⁰ permet alors d'enrichir le modèle de base en faisant apparaître dans chaque sous-système, un SSD, un SSI et un SSO.

Le modèle OID a été adapté à la représentation du système que constitue l'entreprise [CHARPULAT, 2007b]:

- ➔ L'entreprise peut être vue comme un ensemble de moyens mis en œuvre pour assurer une fonction reconnue. En cela l'entreprise est dotée d'un sous-système opérant.

¹⁰ L'approche fractale fait immerger les trois derniers niveaux de complexité du modèle OID :
Niveau 7 : les actions du système sont coordonnées : émergence du pilotage
Niveau 8 : Il peut élaborer de nouvelles formes d'action, émergence de l'imagination
Niveau 9 : Le système remet en cause ses décisions, émergence de la conscience

- ➔ L'entreprise est un lieu où s'exerce un pouvoir. Il en résulte des contraintes subies par les différents membres. Elle est donc caractérisée par son fonctionnement interne, son organisation et ses ressources. Il s'agit du sous-système information.
- ➔ L'entreprise est alors régulée par un sous-système de décision qui correspond à la direction de l'entreprise. Elle met donc en place des stratégies pour assurer sa survie et s'adapter [PERSONNE, 1998].

Les méthodes basées sur une approche systémique garantissent une excellente cohérence des données (non-redondance des données) [PÉPIOT, 2005].

Parmi les méthodes issues de cette approche nous pouvons citer GRAI (Graphe de Résultats à Activités Interreliées), et CIMOSA (Open System Architecture for Computer Integrated Manufacturing).

II.2.2.3 Comparaison de quelques méthodes

La réalisation d'un état de l'art concernant les approches de modélisation d'entreprises a mis en évidence un foisonnement des méthodes ayant été développées. Afin de mieux tenir compte des spécificités des entreprises pour l'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS, quelques méthodes ont été étudiées. Il s'agit de SADT, GRAI, OSSAD (Office Support Systems Analysis and Design), UML (Unified Modeling Language), et ACNOS. Ces méthodes ont été sélectionnées car il s'agit de méthodes dites « simples » par opposition aux méthodologies¹¹ qui proposent différents formalismes pour représenter l'entreprise et un cadre structuré pour guider cette modélisation [KOWALSKI, 2006]. En ce sens, elles constituent de véritables schémas de pensée. Cependant, du fait de la complexité et de la lourdeur de mise en œuvre elles n'ont pas été retenues. Nous proposons une étude comparative des méthodes simples synthétisées dans l'ANNEXE 2, fondée sur les critères les plus utilisés dans la bibliographie [LAURAS, 2004] [MEGARTSI, 1997] [MATHIEU, 2004]. Ces critères, qui concernent à la fois les caractéristiques des méthodes, les aspects modélisés ainsi que les flux modélisés seront décrits au préalable avant l'étude comparative des méthodes.

II.2.2.3.1 Caractéristiques des méthodes

Plusieurs caractéristiques des méthodes ont été identifiées :

- Le **langage ou formalisme utilisé**. Il est de type graphique G ou textuel T. Les deux types de formalisme peuvent être utilisés dans une méthode.
- La **facilité de compréhension et d'utilisation** de la méthode. Une méthode doit offrir une démarche systématique récapitulant les étapes à réaliser, tout en donnant des moyens simples et faciles à utiliser.
- Méthode basée sur une **approche analytique** ou hiérarchique.
- Méthode basée sur une **approche systémique**.

¹¹ Un ensemble de méthodes qui contribuent à résoudre un problème en les utilisant selon les règles établies [PINGAUD, 2003]

- Le niveau d'**abstraction des méthodes**. Il s'agit de la capacité d'une représentation à supporter la modélisation à différents niveaux d'abstraction et de détail. L'abstraction joue un rôle important dans la perception de la réalité. En effet, il s'agit d'un processus mental qui permet de sélectionner certaines caractéristiques parmi d'autres en filtrant l'image de la réalité à travers différents niveaux de conceptualisation.

II.2.2.3.2 Aspects modélisés

- La modélisation des **fonctions** de l'entreprise (Direction générale, Recherche et développement, Marketing, Ressources humaines, ou encore Production...) est une démarche naturelle (Cf. §II.2.2.1). Elles sont nécessaires à la compréhension des tâches et de leurs interrelations dans le processus de production.
- Les **processus opérationnels** sont les suites ordonnées d'opérations aboutissant à un résultat [**ROBERT, 2001**]. Il est nécessaire de pouvoir modéliser les suites d'activités qui contribuent à la réalisation des objectifs de l'entreprise, des attentes des clients.
- Une **donnée** est une représentation conventionnelle d'une information (fait, notion, ordre d'exécution) sous forme analogique ou digitale permettant d'en faire le traitement automatique [**ROBERT, 2001**].
- Les **ressources** constituent les moyens matériels et immatériels (humaines, naturelles, financières...) dont dispose une collectivité, un organisme. Ces ressources sont prises en compte dans certaines méthodes de modélisation d'entreprise.
- L'aspect **organisation** permet de montrer la structure organisationnelle avec les personnes qui la composent ainsi que les postes qui leur sont affectés. Elle permet donc de prendre en compte les aptitudes, les rôles, les responsabilités, et les connaissances des acteurs humains dans l'entreprise.

II.2.2.3.3 Flux modélisés

La représentation des flux est importante lors de la modélisation car elle permet de représenter les échanges entre les différentes activités ou fonctions [**PÉPIOT, 2005**]. Ces flux peuvent être des flux de :

- **Information**, (savoir faire, directives, cahier des charges...)
- **Matière**, (matières premières, énergie, déchets, pièces à traiter...)
- **Contrôle**.

D'autres critères relevés dans la littérature n'ont pas été jugés pertinents pour permettre une représentation simple de l'atelier de traitement de surfaces en vue de l'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de production plus propre et plus sûre (le temps, les objectifs, et l'adaptabilité par exemple).

Le Tableau 12 renseigné à partir de l'étude bibliographique sur les méthodes, se propose de les comparer par rapport aux critères précédents.

Tableau 12: Tableau de comparaison des méthodes de modélisation d'entreprises

Méthodes	GRAI	SADT	ACNOS	UML	OSSAD
Caractéristiques des méthodes					
Formalisme textuel et graphique	G	T, G	T, G	G	G
Facilité de compréhension et d'utilisation	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
Approche analytique	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Approche systémique	Oui	Non	Non	NR	Oui
Niveau d'abstraction des méthodes	Oui	Oui	Non	NR	NR
Aspects modélisés					
Fonction	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Processus opérationnels	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Données	Oui	Oui	Non	NR	Oui
Ressources	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Organisation	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Flux modélisés					
Matière	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Information	Non	Oui	Non	Oui	Oui
Contrôle	Non	Oui	Non	Oui	NR

NR : Non renseigné

Parmi les méthodes étudiées dans le Tableau 12, la méthode ACNOS est la seule qui n'est pas facile de compréhension ni d'utilisation. Par conséquent, la méthode ACNOS n'a pas semblé judicieuse. En ce qui concerne la méthode OSSAD, il n'y a pas de modélisation des fonctions de l'entreprise possible, ni des flux de matières. Difficile alors d'appréhender l'organisation de ces fonctions et leurs interrelations. OSSAD a donc été également écartée. En dernier lieu, la méthode SADT basée sur des formalismes textuels et graphiques a été préférée à GRAI et UML, basées uniquement sur des formalismes graphiques.

II.2.3 Management des risques

II.2.3.1 Généralités

L'un des objectifs motivant l'élaboration de la méthodologie des impacts des pratiques de 4PS, est la prise en compte des risques liés à l'implémentation de ces pratiques. De plus, dans la première partie de ce mémoire, il a été montré que l'activité du traitement de surface est un secteur concerné par les risques. C'est donc tout naturellement que les auteurs se sont penchés sur la notion de management des risques.

Avant de s'intéresser plus amplement au management des risques il convient de définir certains termes :

- Un **aléa** est la probabilité de survenue d'un évènement pouvant affecter le système étudié (naturel ou technologique) [MENGUAL, 2005]

- Le **danger** est défini par le Petit Robert comme étant « *ce qui menace la sûreté, l'existence de quelqu'un ou quelque chose* ». Pour Tixier (2002), il s'agit de la propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique pouvant provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement [TIXIER, 2002].
- Le **risque** est la mesure du niveau de danger. Il est le produit de la probabilité d'un accident potentiel (aléa) et des conséquences (gravité) de cet accident potentiel sur les enjeux (population, écosystèmes, habitations...). Par conséquent la notion de risque prend en compte deux aspects : d'une part le phénomène dangereux qui est à l'origine du risque, d'autre part la présence de cibles sur lesquelles se manifeste ce phénomène.
- L'**impact** correspond aux effets de l'aléa sur l'enjeu.

Le management des risques consiste à les identifier et à comprendre les mécanismes conduisant à leur concrétisation dans le but de réduire leur probabilité d'occurrence et/ou leur gravité. La finalité est d'aboutir à la mise en évidence « des éléments propres à maintenir à tout instant l'installation en sécurité, à la mise en place de mesures permettant de réduire l'apparition ou les conséquences des risques sur l'homme au travail, les matériels de production, les produits, les populations extérieures au domaine d'étude, ainsi que les écosystèmes tant en fonctionnement normal, qu'en marche dégradée lors de déviations » [GARDES, 2001] [PERRIN, 2006]

La gestion du risque nécessite tout d'abord d'en posséder une représentation. Trois grands types de stratégie de modélisation du risque existent [CHARPULAT, 2007b] :

- L'approche cindynique qui repose sur une représentation à cinq dimensions appelée hyperespace du danger. Cet hyperespace du danger permet de percevoir les causes potentielles et les conséquences d'un risque. Cette stratégie de modélisation intervient généralement a posteriori mais ne permet pas d'anticiper les risques.
- L'approche situationniste qui cherche à comprendre la dynamique d'une crise. Il s'agit d'une approche descriptive qui bien souvent sert uniquement à l'évaluation du retour d'expérience d'anciens plans d'actions, dans un but d'amélioration continue.
- L'approche systémique, très utilisée en industrie [TIXIER, 2002], qui considère le risque comme l'enchaînement d'une série d'évènements liant une source de danger à une cible.

Étant donné la complexité des entreprises, l'approche systémique a été considérée.

II.2.3.2 Approche systémique : Méthode MADS/MOSAR

Le modèle MADS a été conçu dans l'esprit de la prévention des risques majeurs qui mettent en jeu des installations et processus complexes difficilement appréhendables par les méthodes classiques d'analyse des risques (Bhopal, Tchernobyl...) [GARDES, 2001]. Il s'agit d'un outil basé sur les principes de la modélisation systémique dans lequel l'univers de danger est formé d'un système source et d'un système cible, immergés dans un environnement actif et échangeant entre eux des flux de matière, d'énergie et d'information (Figure 14) [PERILHON, 2003]. Dans ce modèle, les flux de danger sont les dysfonctionnements susceptibles de provoquer des effets non souhaités sur les cibles (individu, population, écosystème, installation) [VERDEL, 2000]. L'accident ou Événements Non Souhaités (ENS), dans le modèle MADS se définit comme le résultat de l'impact du flux de danger sur le système cible, lui-même provoqué par un événement initial au niveau du système source de danger [PERILHON, 2003].

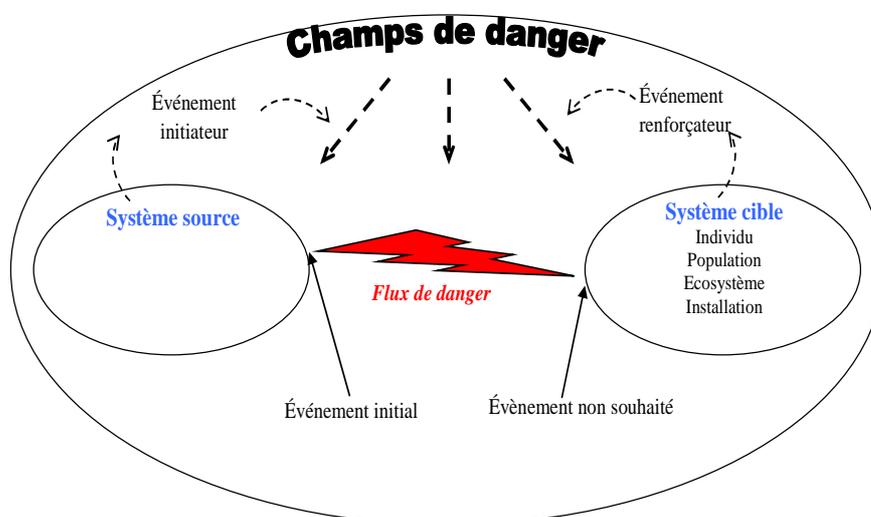


Figure 14: Le modèle MADS

La mise en œuvre pratique de MADS a été formalisée dans une méthode organisée systémique d'analyse des risques (MOSAR) dont les objectifs sont « *d'identifier, d'évaluer et de maîtriser a priori les risques d'une installation* » [VERDEL, 2000]. MOSAR, méthode déterministe¹² mise au point au CEA de Grenoble, se compose de deux modules A et B, dont le premier consiste en une analyse macroscopique des risques de l'installation, tandis que le second est une analyse détaillée des risques et de la sûreté de fonctionnement (vision microscopique) (Figure 15).

¹² L'approche déterministe (ou déductive) consiste à rechercher toutes les défaillances ou déviations qui peuvent être à l'origine d'un événement indésirable donné. Ce type de progression remonte des effets vers les causes. Elle s'oppose à l'approche inductive qui consiste à représenter les différentes séquences d'événement susceptible de conduire, à partir de causes identifiées au préalable, à un ou plusieurs dommages sur le système considéré [PERRIN, 2006].

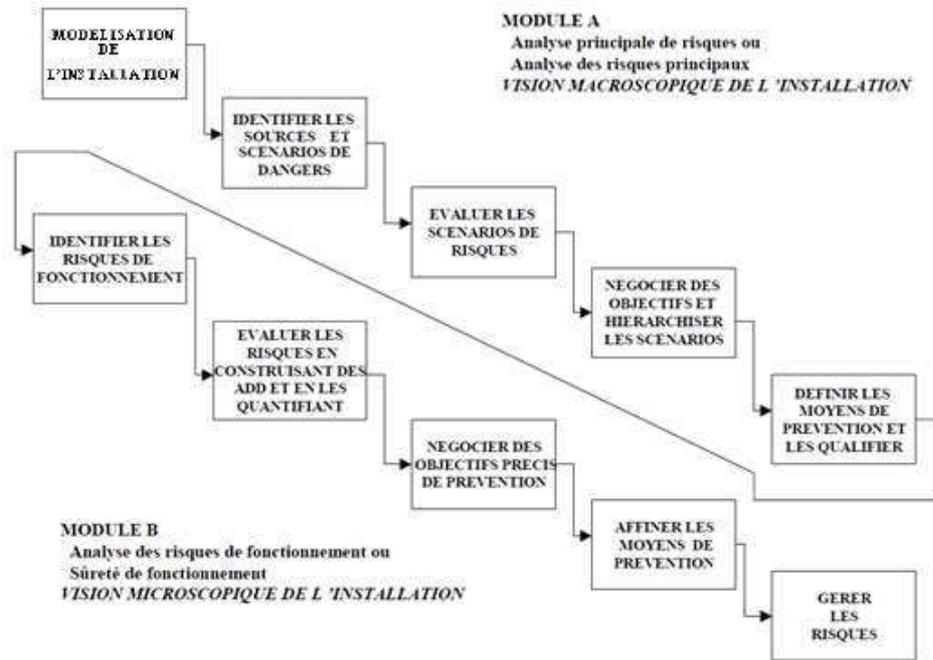


Figure 15 : Structure de la méthode MOSAR

Le module A utilise donc le modèle MADS pour identifier les sources de danger. Cinq étapes le composent [PERILHON, 2003] :

- Décomposition du système en sous-systèmes en respectant la condition de retrouver l'intégralité de l'installation dans la somme des sous-systèmes.
- Identification des sources de danger, des risques et de leurs mécanismes d'apparition. La réalisation de ce travail passe par l'analyse de chaque sous-système à l'aide d'une grille de typologie des systèmes source de danger. Cette grille permet l'inventaire systématique des sources de danger pouvant conduire à un ENS. Chaque sous-système peut alors être représenté par des scénarios courts sous forme de boîte noire dont les entrées sont les évènements initiateurs et les sorties les ENS.
- Évaluation des risques principaux permet de déterminer la probabilité de l'accident redouté et son impact sur les cibles à partir des scénarios précédemment élaborés.
- Négociation des objectifs globaux en vue de hiérarchiser les scénarios, et définir leur niveau d'acceptabilité. Pour cela, chaque risque est placé sur la matrice du risque appelée grille Gravité/Probabilité/Acceptabilité tandis que la frontière entre l'acceptable et l'inacceptable est définie par concertation entre les différents acteurs du groupe de travail.
- Définition et qualification des moyens de prévention et de protection. La prévention consiste à la mise en place de barrière au niveau du système source tandis que la protection envisage ces barrières au niveau du système cible. La qualification de ces barrières permet de s'assurer qu'elles n'engendrent pas de nouveaux risques et de s'assurer de leur pérennité.

Le module B permet l'approfondissement de l'analyse par :

- Identification détaillée des risques liés au fonctionnement (utilisation de l'AMDEC¹³ ou l'HAZOP¹⁴)
- Évaluation de ces risques par la construction d'arbres de défaillances
- Négociation des objectifs précis de prévention
- Définition des moyens de prévention affinés
- Gestion des risques par la construction de plans d'intervention en cas d'accident

II.2.4 Conclusion

Ce chapitre intitulé « Entreprises, Systémique et Risques » était consacré à la description des bases systémiques et des outils de modélisation d'entreprises sur lesquels reposent la structure de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS. En effet, ce chapitre a permis de montrer que l'entreprise est un système complexe dont la compréhension nécessite l'utilisation de la modélisation d'entreprise. La modélisation d'entreprise procède par une approche analytique ou systémique pour simplifier, analyser, synthétiser, expliquer, prévoir, optimiser, ou encore décrire le fonctionnement des entreprises. L'étude comparative de cinq méthodes appartenant aux deux approches a révélé une meilleure adéquation du modèle SADT pour la représentation d'un atelier de traitement de surfaces en vue de l'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS. D'autre part, et étant donné que la prise en compte des risques est souhaitée, le troisième paragraphe de ce chapitre a permis de mettre en lumière les principales notions liées à ce domaines. En outre, le modèle MADS et la méthode MOSAR d'analyse systémique des risques ont été présentés.

¹³ AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effet et de leur Criticité) : Méthode inductive d'analyse des risques qui consiste à considérer systématiquement, l'un après l'autre, chacun des composants du système étudié et à analyser les causes et conséquences de leur défaillance potentielle

¹⁴ HAZOP (HAZard and OPérability study) : Méthode inductive d'analyse des risques qui étudie l'influence des divers paramètres régissant le procédé étudié par rapport à leurs valeurs nominales de fonctionnement [PERRIN, 2006].

II.3 L'indicateur, un outil d'information

La première partie de ce mémoire a montré que les méthodes d'évaluation environnementales cherchent à la fois à dresser un état des lieux de l'entreprise (aspect diagnostic) mais également à y associer des plans d'actions pour améliorer les facteurs d'impacts de l'entreprise (aspect aide à la décision) (cf. § I.3.1). Elles se basent, pour ce faire, sur des informations directement tirées du terrain : les indicateurs. «*Le diagnostic s'appuie généralement sur l'acquisition d'informations structurées telles que les systèmes d'indicateurs* » [DESTHIEUX *et al.*, 2004].

Ces indicateurs peuvent-ils être utilisés pour l'évaluation des impacts des pratiques de production plus propre et plus sûre ?

L'objectif de ce chapitre est de présenter et de justifier l'utilité d'un tel outil pour l'évaluation des impacts des pratiques de 4PS.

Le chapitre présente tout d'abord des généralités sur la notion d'indicateur (définitions, caractéristiques). L'évaluation d'une situation réelle étant généralement basée sur un ensemble d'indicateurs, une seconde section sera consacrée à l'organisation et la structuration de ces indicateurs. En dernier lieu, nous montrerons que l'analyse de cette structure et des relations entre les indicateurs nécessite le recours à un outil d'analyse structurelle (MICMAC) qui sera développé dans le troisième volet de ce chapitre.

II.3.1 Généralités sur les indicateurs

II.3.1.1 Définition d'un indicateur

Les définitions de la notion d'indicateur sont nombreuses. Pour Le Petit Robert (2001), il s'agit d'un « *instrument servant à fournir des indications* » mais aussi dans le domaine économique, d'une « *variable ayant pour objet de mesurer ou d'apprécier un état, une évolution économique* ». L'agence européenne pour l'environnement définit l'indicateur comme « *une mesure, généralement quantitative, qui peut être utilisée pour illustrer et transmettre simplement des phénomènes complexes, en incluant les tendances et progrès au cours du temps* » [EEA, 2005].

Selon les auteurs, l'indicateur peut être tantôt un paramètre, une variable, une mesure, une valeur, une information ou bien un sous-indice. Plus encore la Figure 16 a fait apparaître plusieurs niveaux d'informations (données brutes, indicateurs, indicateur agrégés...). Pour des fins de compréhension, il convient de bien définir à quoi ceux-ci correspondent (Tableau 13).

Tableau 13 : Définitions des niveaux d'information

	<i>Définition</i>	Source
<u>Critères</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Caractère ou signe permettant de distinguer une chose, une notion ou qui sert de base à un jugement d'appréciation. Il s'agit donc d'un élément auquel on se réfère pour porter un jugement, une appréciation. • Les critères représentent les thèmes par rapport auxquels l'évaluation va se faire pour atteindre le ou les objectifs. 	[ROBERT, 2001] [LAFOREST, 2003]
<u>Indices</u> ou <u>indicateurs</u> agrégés	<ul style="list-style-type: none"> • Une agrégation mathématique des indicateurs normalisés établit un indice. Par exemple l'association des deux indicateurs « prélèvements d'eau » et « disponibilité de l'eau » forme l'indice de stress hydrique. 	[IRC, 2004]
<u>Indicateurs</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Instrument servant à fournir des indications • Valeurs quantitatives ou qualitatives relatives, dérivées de paramètres et/ou de mesures • En positionnant la variable par rapport à un seuil elle devient un indicateur 	[ROBERT, 2001] [LAFOREST, 2003] [GIRARDIN <i>et al.</i> , 2005]
<u>Paramètres</u> Variables Données brutes, Données traitées Mesure	<ul style="list-style-type: none"> • Données mesurées ou estimées qui serviront à construire l'information contenue dans les indicateurs • Quantité à fixer librement, maintenue constante dont dépend une fonction de variables indépendantes, une équation ou une expression mathématique. • Grandeur considérée comme constante dans les équations décrivant un certain système mais qu'on peut faire varier si on veut appliquer les équations à un autre système. • Élément d'information à prendre en compte pour prendre une décision ou pour effectuer un calcul. 	[ROBERT, 2001] [LAFOREST, 2003] [Hachette multimédia, 2007]

Le Tableau 13 met en évidence quatre niveaux d'information :

- Les paramètres qui sont les données du terrain
- Les indicateurs : pour passer du paramètre à l'indicateur, il faut déterminer une valeur de référence : « *un indicateur est en réalité un couple descripteur- échelle* » Labouze (1995) cité par [PERSONNE, 1998]. Dans cette configuration, le descripteur est la valeur qui permet de décrire le phénomène, tandis que l'échelle définit le référentiel par rapport auquel est comparée cette valeur. Cette échelle peut être qualitative ou quantitative [DESTHIEUX, 2005].
- Les indices qui sont le résultat de l'agrégation d'un ensemble d'indicateurs pondérés ou non. Le principal objectif de cette agrégation est de transmettre des informations complexes à un public qui a besoin d'informations simplifiées.
- Les critères qui servent de base à un jugement d'appréciation

De part ces définitions, il est évident que l'indicateur a pour rôle d'être porteur d'information destinée à être communiquée à un public cible. Veleva (2001) montre que l'indicateur est un instrument qui poursuit trois objectifs principaux :

- ➔ Rendre compte d'une situation
- ➔ Aider à la décision pour les décideurs
- ➔ Mesurer les progrès et les évolutions vers des objectifs fixés

II.3.1.2 Rendre compte d'une situation

La mise en place d'un indicateur repose sur le besoin de compréhension d'un phénomène, d'une situation par l'utilisateur. L'indicateur rend compte de la situation en simplifiant l'information dans le but de la rendre compréhensible. Outre cette fonction de simplification des phénomènes complexes, l'indicateur est un outil de communication. La notion d'Iceberg de l'information (Figure 16) met en lumière l'important travail d'agrégation et de simplification nécessaire à l'obtention d'indicateurs compréhensibles pour les différents publics visés.

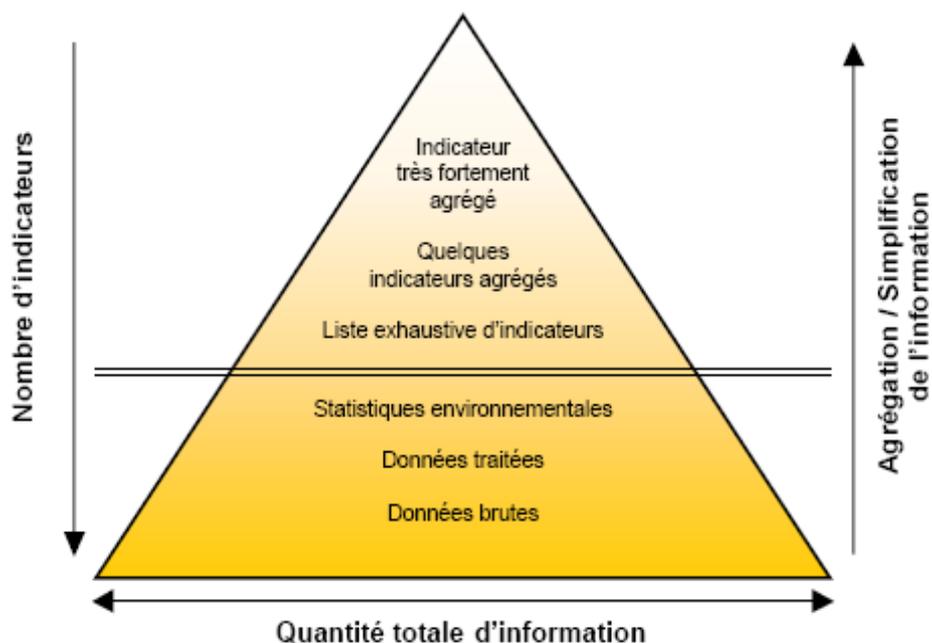


Figure 16 : Iceberg de l'information d'après Jesinghaus (1999), tiré de [RODRIGUEZ, 2006]

Cependant, la simplification de l'information à des fins de compréhension et de communication bien que permettant d'obtenir une vision objective du réel, reste très souvent incomplète. En effet « *Les indicateurs fournissent une vue simplifiée de la réalité, censée refléter des phénomènes souvent complexes ou diffus* » [TYTECA, 2002]. Par conséquent, le nombre d'indicateurs choisis doit être optimisé car un nombre trop important d'indicateurs rend l'information transmise confuse. Il est cependant nécessaire que les indicateurs choisis soient assez nombreux pour être représentatifs de l'ensemble du phénomène observé.

II.3.1.3 Aider à la prise de décision pour les décideurs.

Après la quantification et la simplification à des fins de compréhension d'une situation, la seconde fonction majeure d'un indicateur est l'aide à la prise de décision. L'un des exemples les plus courants dans ce sens est la mise en place d'indicateurs environnementaux pour faciliter la prise de décision des politiques publiques [DONNELLY *et al.*, 2007]. Desthieux (2005) montre comment le modèle systémique OID¹⁵ proposé par Le Moigne (1977) est

¹⁵ Opération-Information- Décision

adaptable à la modélisation d'un processus de décision (Figure 17). La représentation du processus de décision est formée de trois systèmes :

- Le système réel associée au sous-système opérant dans le modèle OID est la représentation de la réalité, en l'occurrence l'entreprise et son environnement proche dans le cadre de cette thèse. Pour décrire cette réalité de nombreuses données de terrain (paramètres) sont directement puisées de ces systèmes.
- Ces paramètres sont stockés, et organisés au sein d'un système d'indicateurs (correspondant au sous-système d'information du modèle OID). Chaque indicateur de ce système est lié à un objectif précis auquel il répond [BAURAING *et al.*, 2000]. Le système d'indicateur assure le couplage entre la réalité du terrain et le système décisionnel. Autrement dit, les informations fournies par les indicateurs sont de véritables supports pour la prise de décision.
- Cette prise de décision peut se faire vis-à-vis de critères au niveau du système décisionnel. Il est évident que la nature de la décision, le contexte de la prise de décision, ainsi que les différents acteurs impliqués dans cette prise de décision modifie la nature des indicateurs requis [OLSTHOORN *et al.*, 2001]. Par conséquent, l'obtention d'un consensus quant au système d'indicateurs utilisé est indispensable.

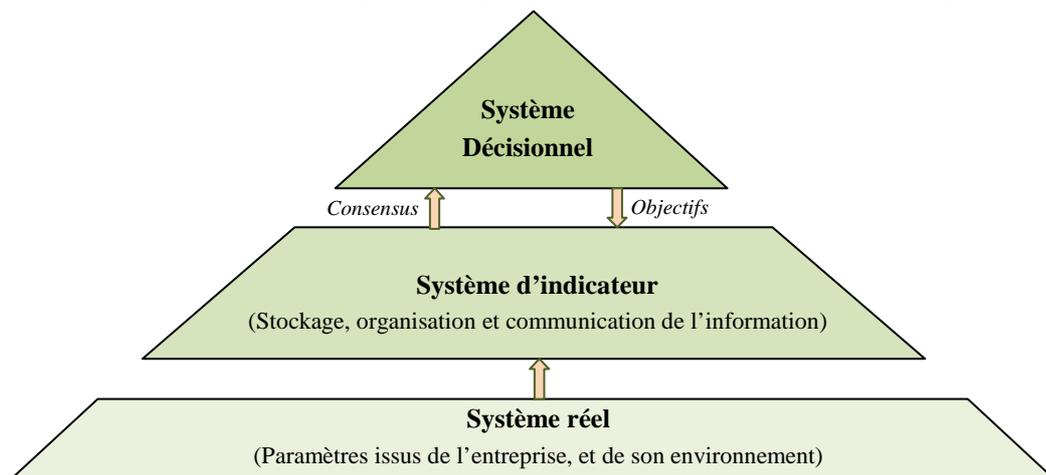


Figure 17 : Adaptation du modèle Opération-Information-Décision aux processus de décision

II.3.1.4 Mesurer les progrès et les évolutions vers les objectifs fixés

Un indicateur doit permettre de caractériser une situation évolutive, une action et ses conséquences de façon à les évaluer et à les comparer à leurs états à différentes dates [DEPOERS *et al.*, 2002]. La mesure des évolutions et des progrès est étroitement liée à l'existence d'une référence à laquelle l'indicateur se compare. « *Les indicateurs sont typiquement des observations brutes mises en relation avec leur point de référence* » [RILEY, 2001]. On parle alors d'indicateurs de performance. Ces derniers s'inscrivent directement dans la philosophie d'amélioration continue proposée par Deming (1982) puisque leur intérêt est à la fois la vérification de la performance et l'aide à la réaction [BERRAH, 2002]. Cette idée rejoint donc le rôle d'aide à la décision des indicateurs, présenté au

paragraphe précédent. Ainsi, « *l'indicateur de performance exprime un pourcentage d'écart entre la valeur mesurée et la valeur du critère de performance* » [PERSONNE, 1998].

L'analyse des trois objectifs d'un indicateur (rendre compte d'une situation, aide à la décision, mesure des progrès) fait émerger un certain nombre d'exigences sur lesquelles repose la qualité d'un bon indicateur. L'ensemble des critères de qualité d'un indicateur est présenté dans le Tableau 14. Ces exigences peuvent être contradictoires entre-elles [DONNELLY *et al.*, 2007] [PERSONNE, 1998]. S'il est souvent difficile de réunir l'ensemble de ces critères dans la pratique, l'obtention d'indicateurs réellement utilisables et fiables nécessite de s'en rapprocher au maximum.

Tableau 14 : Critères de qualité d'un bon indicateur [DONNELLY *et al.*, 2007] [DESTHIEUX, 2005] [PERSONNE, 1998]

Critères	Sous-critères	Définition
Pertinence	Besoin	Nécessité de fournir une information répondant à un besoin de l'entreprise ou des parties intéressées
	Comparabilité	Comparabilité de l'indicateur à l'objectif auquel il doit être lié
	Compréhension	Capacité à communiquer l'information de façon compréhensible pour un public général ou spécialisé.
	Consensus	Existence d'un consensus des parties intéressées quant à la validité de l'indicateur
	Tendance	Capacité à être mis à jour régulièrement et à indiquer les progrès réalisés pour atteindre l'objectif
Justesse d'analyse	Représentativité	Capacité de la mesure à décrire fidèlement et synthétiquement le phénomène à étudier
	Objectivité	Calculabilité à partir de grandeurs observables sans ambiguïté et avec une base scientifique saine
	Référentiel	Existence d'une valeur de référence
	Univocité	Variabilité monotone par rapport au phénomène décrit pour pouvoir interpréter ses variations sans ambiguïté
Données	Fiabilité	Fiabilité du dispositif et des procédures de mesure qui doivent être clairement définies et faciles à reproduire
	Mesurabilité	Accessibilité des données de base à un rapport coût bénéfices raisonnable
	Précision	Acceptabilité de la marge d'erreur
	Sensibilité	Capacité à détecter le signal parmi le bruit et à varier pour une faible variation du phénomène observé et dans un court délai

II.3.2 Élaboration des systèmes d'indicateurs

Un indicateur est caractérisé par différents attributs tels que son nom, sa définition, son mode de calcul, sa source d'origine, son unité de mesure, sa fréquence d'utilisation ou encore son degré de validité [DROGOUL, 2006].

Il existe aujourd'hui aussi bien dans la littérature que dans la vie des entreprises de nombreux types d'indicateurs [D'AUTEUIL *et al.*, 2003]. Bien que l'étude de ces types d'indicateurs présente l'avantage incontestable de faciliter le travail, la réelle pertinence d'un indicateur ne peut découler que du contexte dans lequel il a été développé. De plus, la validité d'un indicateur peut être vérifiée par le respect des exigences proposées au Tableau 14. Néanmoins elle ne constitue pas à proprement parler une aide à la construction de systèmes d'indicateurs. Face à ce constat, Cerrutti (1992) propose une méthode de construction d'indicateurs basé sur six étapes principales.

- La première étape de l'élaboration d'un indicateur définit le **champ de mesure** c'est à dire le domaine sur lequel va porter la mesure.
- Il est ensuite nécessaire de **définir les objectifs** à atteindre dans le champ de mesure choisi. Pourquoi évalue-t-on ? Que cherche-t-on à atteindre ? En effet, si l'on ne sait pas ce que l'on cherche à atteindre, il est évident que l'utilisation d'indicateurs ne mènera nulle part. Par conséquent, la définition des objectifs constitue une étape clef de l'élaboration d'un système d'indicateur.
- En 3^{ème} lieu l'**identification des paramètres** permet de se positionner par rapport aux objectifs précédemment explicités. Que peut-on mesurer pour suivre les objectifs ?
- La réponse à cette question aboutit au **choix de paramètres mesurables**. Ce choix est basé sur un tri des nombreux paramètres selon leur importance et le degré d'accessibilité.
- L'étape suivante est la combinaison des paramètres retenus pour en faire ressortir un **corps d'indicateurs** représentatifs du phénomène observé. La notion d'Iceberg de l'information a mis en évidence le travail d'agrégation et de simplification nécessaire à l'obtention d'indicateurs compréhensibles pour les cibles. L'agrégation des paramètres permet d'obtenir des indicateurs synthétiques plus représentatifs du phénomène global.
- L'étape de **validation des indicateurs sélectionnés** a pour objectif de vérifier la cohérence et la pertinence des indicateurs. Cette vérification doit être assez régulière durant l'utilisation réelle de l'indicateur afin d'assurer la pérennisation de cet indicateur.
- Enfin l'ultime étape, consiste à l'organisation des indicateurs dans un **tableau de bord**. Ce tableau est un document de synthèse qui doit présenter les différentes caractéristiques de chaque indicateur (nom, définition...) [**PERSONNE, 1998**].

II.3.3 Analyse structurelle

Dans une vision systémique, une variable n'existe que par son tissu relationnel avec les autres variables. L'analyse structurelle est avant tout un outil de structuration des idées qui offre la possibilité de *décrire un système à l'aide d'une matrice* mettant en relation tous ses éléments constitutifs. En étudiant ces relations, la méthode permet de faire apparaître les variables essentielles à l'évolution du système. L'analyse structurelle poursuit deux objectifs complémentaires :

- représenter aussi exhaustivement que possible le système étudié et
- réduire la complexité du système étudié aux variables essentielles.

Les principes de l'analyse structurelle ont été repris dans la méthode MICMAC qui a été développée par Godet (2001). MICMAC est un programme de multiplication matricielle qui a pour objet de construire une typologie des variables selon leur influence et dépendance du système, par un classement direct et indirect.

L'analyse structurelle est mise en œuvre au moyen de trois étapes [GODET, 2001]:

- Le recensement des variables
- La description des relations entre ces variables
- L'identification des variables clef

Ces trois phases sont décrites dans les paragraphes suivants.

II.3.3.1 Le recensement des variables

La première étape consiste à recenser l'ensemble des variables caractérisant le système étudié. Il convient lors de cette phase d'être le plus exhaustif possible, et de n'exclure, a priori, aucune voie de recherche. Ce recensement nécessite des réunions de réflexion collective et des "brainstormings". De plus des entretiens non directifs auprès des parties prenantes du système étudié sont indispensables afin de nourrir la collecte des variables. L'explicitation détaillée des variables est indispensable : elle permettra un meilleur repérage des relations entre ces variables dans la suite de l'analyse. Finalement, une liste homogène de variables internes et externes au système considéré, est obtenue. Cette liste ne doit pas dépasser 70 à 80 variables clef pour une exploitation optimale [TENIERE-BUCHOT, 1989].

II.3.3.2 Description des relations entre les variables

La mise en relation des variables est réalisée dans un tableau à double entrée (les variables sont à la fois en ligne et en colonne). Ce tableau appelé Matrice des Influences Directes (MID) est complété en établissement une relation entre deux variables i et j selon trois questions :

- **Sens** : l'influence se fait-elle de la variable i vers j ou de j vers i ?
- **Trajet** : la relation de i à j est-elle directe ou bien passe t'elle par l'intermédiaire d'une autre variable de la liste ?
- **Colinéarité** : i influence t'il j ou existe-il une variable k influençant à la fois i et j ?

Le remplissage de la matrice se fait de manière qualitative : 0 s'il n'existe pas de relation entre les variables i et j , et 1 dans le cas contraire. Il est toutefois possible de pondérer les intensités des relations (0 = nulle, 1 = faible, 2 = moyenne, 3 = forte, P = potentielle).

Cette phase de remplissage de la MID aide à se poser pour n variables ($3n \times n$) questions, dont certaines auraient été éludées faute d'une réflexion aussi systématique et exhaustive. Cette procédure d'interrogation permet, non seulement d'éviter des erreurs, mais aussi d'ordonner et de classer les idées, en créant un langage commun au sein du groupe de brainstorming. Elle permet également de redéfinir les variables et donc d'affiner l'analyse du système.

II.3.3.3 Identification des variables clefs

Cette dernière phase consiste à identifier les variables clés, d'abord grâce à un classement direct, puis grâce à un classement indirect.

- Le classement direct correspond à l'exploitation de la matrice d'influence directe (MID). Pour cela la somme de chaque ligne et la somme de chaque colonne est calculée. Le total des liaisons en ligne indique l'importance de l'influence d'une variable sur l'ensemble du système (niveau de motricité directe). Le total en colonne indique le degré de dépendance d'une variable (niveau de dépendance directe).

Les résultats sont alors représentés sur un plan des influences/dépendances directes comme présenté sur la Figure 18 :

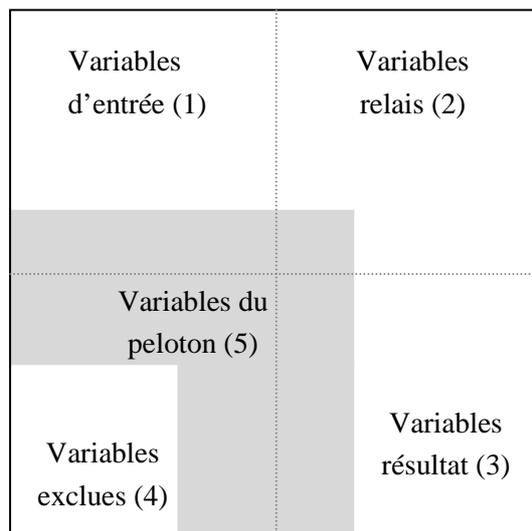


Figure 18 : Plan d'influence/ dépendance directe

Sur ce plan :

- les variables ayant une grande influence sur l'ensemble du système et peu de dépendance vis-à-vis de celui-ci sont situés plutôt dans le quart supérieur gauche (1). Ces variables dites « variables d'entrée » conditionnent le reste du système.
- Les variables situées dans le quart supérieur droit sont appelées « variables relais » (2). Elles sont à la fois très influentes et très dépendantes du système. Elles sont donc de natures instables puisque toute action sur ces variables, même faible, aura des répercussions sur les autres variables.
- Les « variables résultats » sont situées dans le quart inférieur droit (3). Elles sont très dépendantes du système et très peu influentes.
- Les variables du secteur (4) sont à la fois peu influentes et peu dépendantes du système de variables. Elles sont dites « exclues » car elles pourraient l'être, à cause de leur caractère relativement autonome.
- Enfin les « variables du peloton » (zone grisée 5) sont influentes et dépendantes.

Le plan des influences/dépendances directe peu également être analysé en termes de stabilité (Figure 19).

- Les systèmes dont la majorité des variables forment un nuage autour de la première diagonale sont considérés comme instables. En effet, chaque variable est influente et

dépendante à la fois, ce qui conduit à une répercussion sur toutes les autres variables de toute action sur l'une d'entre elle.

- La stabilité d'un système exige un faible nombre de variables relais. Il se présente sous la forme d'un « boomerang » contenant les variables influentes (sur lesquelles on peut agir), et les variables dépendantes (résultats dépendants des précédentes).

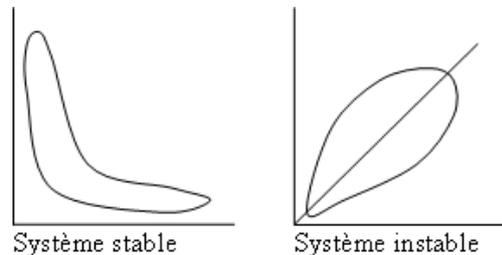


Figure 19 : Stabilité du système de variables

- ➔ Outre les relations directes aboutissant au classement direct il existe aussi des relations indirectes entre les variables notamment par des chaînes d'influence et des boucles de rétroaction. Pour révéler la diffusion des impacts à travers ces chaînes et boucles de rétroaction, le logiciel MICMAC procède à l'élévation successive de la MID en puissance. Cela conduit à hiérarchiser les variables dans un classement indirect :

- par ordre d'influence, en tenant compte du nombre de chemins et de boucles de longueur 1, 2, ...n, issus de chaque variable
- par ordre de dépendance, en tenant compte du nombre de chemins et de boucles de longueur 1, 2, ... n, arrivant sur chaque variable.

MICMAC est basé sur les propriétés classiques des matrices booléennes. Si la variable i influence la variable k qui elle-même influence j , il y a par conséquent une influence indirecte de la variable i sur la variable j . De plus, tout changement affectant i se répercute indirectement sur j . L'élévation de la matrice au carré permet de mettre en évidence la relation d'ordre 2 existant entre les variables i et j .

$$M^2 = M \times M = (m_{ij}^2) \quad \text{(Équation 2)}$$

$$\text{avec } m_{ij}^2 = \sum_k m_{ik}^1 \times m_{kj}^1, \quad \text{(Équation 3)}$$

m_{ik}^1, m_{kj}^1 étant des éléments de la matrice M

Si $m_{ij}^2 \neq 0$ alors il existe au moins un k tel que $m_{ik}^1 \times m_{kj}^1 = 1$. Cela signifie qu'il existe au moins une variable intermédiaire k sur laquelle une variable i agit ($m_{ik}^1 = 1$) et qui agit sur une variable j ($m_{kj}^1 = 1$). Il y a donc bien un chemin d'ordre 2 allant de i à j . Par extension si $m_{ij}^2 = n$, cela signifie qu'il existe N chemins de longueur 2 passant par n variables intermédiaires.

En élevant la MID (à la puissance 3, 4, ..., n), on détermine les chemins d'ordre 3, 4, ..., n reliant les variables entre elles. Ainsi les variables sont hiérarchisées en fonction du nombre

d'influences indirectes qu'elles exercent sur les autres variables à chaque itération. Le nouveau plan d'influences obtenu, appelé plan d'influence/dépendance indirect, est alors analysé de la même manière que le plan d'influences directes.

II.3.4 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence que les indicateurs permettent de:

- Rendre compte d'une situation
- Mesurer les progrès et les évolutions
- Et d'aider à la prise de décision

Ces outils d'information répondent donc bien aux objectifs de la méthodologie d'évaluation des impacts puisqu'ils permettront de :

- quantifier les impacts de l'activité de l'entreprise (*rendre compte d'une situation*),
- évaluer leur évolution après la mise en place de la 4PS (*comparer à différentes dates*)
- et d'aider à la décision pour l'implémentation de pratiques de 4PS (*aide à la prise de décision*).

Afin d'évaluer l'impact sur l'entreprise et son environnement de la mise en place d'une pratique de 4PS, des indicateurs capables de quantifier les effets de cette modification seront par conséquent utilisés.

II.4 L'aide à la décision

II.4.1 Introduction à l'aide à la décision

Des décisions multicritères sont prises tous les jours par tout un chacun. En effet l'acquisition d'une voiture, d'une maison ou tout simplement le choix d'un menu représentent des opportunités de décision multicritère puisque l'aspect financier n'est pas le seul critère pris en compte. D'autres critères comme le goût, la sécurité ou encore le confort interviennent dans la décision [SCHÄRLIG, 1985].

L'aide à la décision, champ d'étude historiquement développé dans le contexte militaire en vue d'améliorer la gestion et l'approvisionnement des troupes, couvre actuellement de nombreux domaines [JOERIN, 1997]. Par exemple, l'utilisation de méthodes d'aide à la décision multicritère a été nécessaire dans le domaine économique pour l'optimisation des coûts de production, ou encore pour résoudre des problèmes liés à l'aménagement du territoire, voire même dans le cadre de la gestion des déchets nucléaires [BEN MENA, 2000].

Le domaine de la gestion environnementale constitue un secteur porteur pour les méthodes multicritères puisqu'il traite de problèmes complexes difficilement appréhendables par des méthodes plus classiques. En effet les critères ne sont en général pas commensurables¹⁶. Il est en effet difficile de ramener à une base commune, qui plus est monétaire, des impacts hétéroclites tels que le bruit, la pollution des eaux, ou encore la dégradation du paysage. De plus l'une des grandes difficultés réside dans le fait que les critères ne tendent pas tous dans le même sens. Par exemple lors du choix du meilleur emplacement pour la construction d'une station d'épuration, la minimisation des nuisances olfactives par éloignement vis à vis des habitations, s'oppose à la minimisation du coût d'acheminement de l'eau [SCHÄRLIG, 1985] [BEN MENA, 2000].

De plus, la décision est l'aboutissement d'un processus, plus ou moins long, faisant intervenir un ou plusieurs individus. Lorsqu'il y a plusieurs acteurs mis en jeu dans le processus, la décision est le fruit d'échanges, d'interactions entre les différents acteurs. La multiplicité des acteurs ajoute un niveau de complexité au processus de décision puisqu'il faut prendre en compte les spécificités et avis de chacun. Par conséquent le processus de décision est un processus « chaotique », qui s'élabore de manière progressive [SCHÄRLIG, 1985].

Étant donné que le cerveau humain ne peut considérer à la fois qu'un nombre limité d'informations (7 critères au maximum) [KRIPPENDORFF, 2004], les méthodes d'aide à la décision permettent aux acteurs de la décision de s'organiser et de synthétiser leurs informations [JOERIN, 1997].

Tout cela montre la nécessité de méthodes qui peuvent tenir compte de plusieurs critères sans les réduire à un seul, et qui s'adaptent face aux conflits qui apparaîtront entre ceux-ci. Il existe de nos jours de nombreuses méthodes d'aide à la décision dont les fondements sont complètement différents.

¹⁶ Se dit d'une grandeur qui a, avec une autre grandeur, une commune mesure – comparable [ROBERT, 2001]. Des critères incommensurables sont incomparables.

II.4.2 Fondements et éléments méthodologiques

Cette partie vise à exposer les bases théoriques des méthodes d'analyse multicritère. Trouver une solution à une problématique multicritère se réalise en quatre étapes principales :

- Le recensement des actions potentielles
- Le choix des critères d'évaluation de ces actions
- L'élaboration de la matrice des jugements
- L'agrégation des performances

Ces étapes sont décrites plus précisément dans les paragraphes suivants.

II.4.2.1 Actions potentielles

Il faut tout d'abord dresser la liste des solutions possibles ou « actions potentielles ». Une action potentielle (a_i) est une action réelle ou fictive, provisoirement jugée réaliste par un acteur au moins [ADOLPHE *et al.*, 2006]. L'ensemble des actions potentielles sur lequel l'aide à la décision prend appui au cours de l'étude est noté A. Par exemple pour l'acquisition d'un véhicule, les actions potentielles sont les différents modèles intéressant l'acheteur.

II.4.2.2 Critères

La seconde étape consiste alors à dresser la liste des critères à prendre en considération. Selon Roy (1985) il faut considérer les conséquences des actions pour choisir les critères. L'ensemble de tous les critères élaborés constitue la famille F contenant n critères $\{g_1, g_2, \dots, g_n\}$. Certaines propriétés pour le choix de la famille F doivent être respectées :

- L'exhaustivité : tous les aspects du problème doivent être représentés
- La cohésion : pour deux actions ayant la même performance sur tous les critères sauf pour un seul g_i , la préférence des acteurs ira à l'action ayant le meilleur g_i .
- La non-redondance : un point de vue ne doit pas être représenté plusieurs fois dans la même famille de critères retenue [ADOLPHE *et al.*, 2006].

Si l'on reprend l'exemple proposé précédemment, différents critères peuvent intervenir dans la décision d'achat d'un véhicule : le prix d'achat, la couleur, le confort, la consommation d'essence ou encore la pollution émise.

II.4.2.3 Tableau de performances ou matrice des jugements

Le choix des critères conduit à l'établissement du tableau de performances appelé également matrice des jugements. Il s'agit d'un tableau à double entrée dans lequel les lignes représentent les actions de A et les colonnes les critères de F (Tableau 15). À l'intersection d'une ligne et d'une colonne figure l'évaluation que l'on peut porter sur l'action vis à vis du critère correspondant $g_j(a_i)$.

Tableau 15 : Exemple de tableau des performances pour l'acquisition d'un véhicule

Critères	Prix	Couleur	Confort	Consommation	Pollution	Tenue de route	Dimensions
Actions	(€)	-	-	L/100km	g _{CO2} /km	-	m
4X4	20000	vert	moindre	15	210	Très bon	2
Coupé sport	70000	rouge	moindre	10	250	Très bon	2,5
Berline	25000	noir	Très bon	8	115	moyen	4
Citadine	12000	blanc	bon	5	90	Faible	2,5

Ces trois étapes sont communes à toutes les méthodes d'analyse multicritère. La quatrième étape est l'agrégation des performances. Elle diffère selon les méthodes d'analyse multicritère.

II.4.2.4 Agrégation des performances

A ce stade se pose le problème du choix de la méthode d'agrégation. En effet cette agrégation peut être réalisée de différentes manières suivant la problématique considérée [ROY, 1985].

→ La problématique de choix (α) consiste à rechercher la meilleure action, ou du moins la plus adéquate. Il s'agit donc de désigner l'action la plus satisfaisante (a^*) dans l'ensemble A. Cette problématique peut être représentée par la Figure 20:

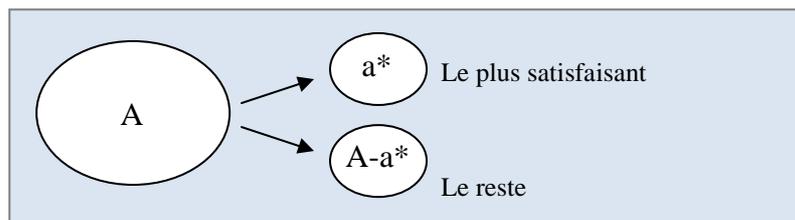


Figure 20 : Schéma de la problématique de choix α

→ La problématique de tri (β) permet de définir à quelle catégorie bonne (A_1), moyenne (A_2), ou mauvaise (A_3) appartient l'action envisagée. Le but recherché est donc d'affecter à chacune des actions potentielles une catégorie et ainsi trier les bonnes des moins bonnes (Figure 21).

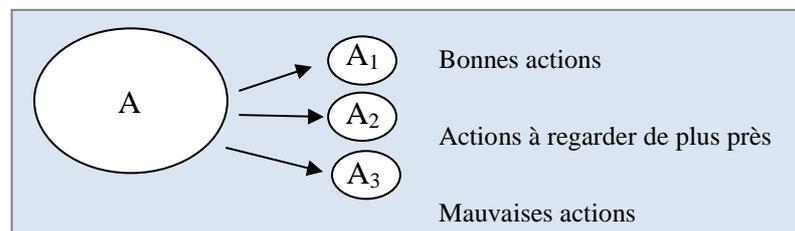


Figure 21 : Schéma de la problématique de tri β

→ La problématique de rangement (γ) vise à ordonner les actions de la plus adéquate à la moins adéquate. Ces dernières sont regroupées en classe d'équivalence, ordonnées conformément aux préférences des décideurs (Figure 22).

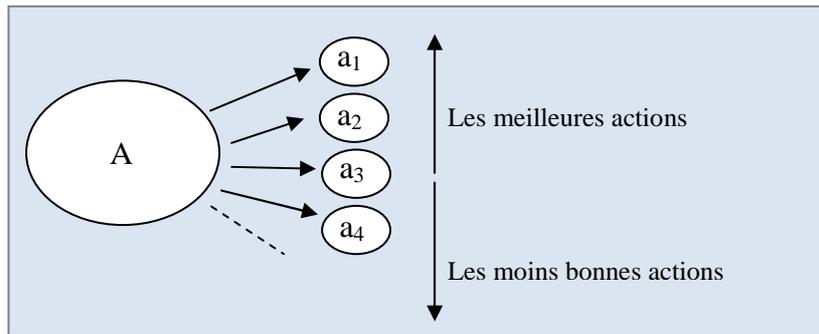


Figure 22 : Schéma de la problématique de rangement γ

En multicritère la problématique est une information fondamentale tandis qu'en monocritère il n'y a pas de distinction entre les problématiques puisque l'optimisation permet à la fois de choisir le meilleur, de prendre les bons et de classer les meilleurs [SCHÄRLIG, 1985].

II.4.3 Panorama des méthodes d'analyse multicritère

Les méthodes d'analyse multicritère sont les processus par lesquels la matrice des jugements va être agrégée. Ces méthodes sont nombreuses et variées. La multiplicité des méthodes d'agrégation est due au fait qu'aucune d'entre-elle ne respecte « la totalité des exigences qu'un utilisateur pourrait trouver normales dans l'idée du multicritère » [BEN MENA, 2000]. Ainsi il n'y a pas de méthode parfaite, et le choix d'une méthode est lui-même, un problème multicritère.

II.4.3.1 Trois courants de pensée multicritère

Bien que les méthodes d'analyse multicritère présentent chacune des spécificités, Roy (1975) propose une typologie des méthodes basée sur trois « attitudes » ou « approches opérationnelles » qu'il a identifiées :

➔ L'attitude du cocktail de jugements consiste à l'optimisation d'une fonction d'utilité¹⁷ attachée à chaque action potentielle. Ce courant de pensée issu de « l'école américaine » conduit à calculer pour chaque action, la valeur de cette fonction d'utilité ; l'action pour laquelle cette valeur est optimisée est considérée comme la meilleure. Cette attitude suppose néanmoins la commensurabilité des jugements récoltés à travers les divers critères. Ainsi elle aboutit à l'agrégation complète des critères en un critère unique (monocritère). Cette approche est appelée l'**agrégation complète transitive** car elle suppose également que les jugements soient transitifs¹⁸. L'inconvénient de cette attitude réside dans le peu de signification du résultat final à cause d'une perte d'information trop importante lors du passage du multicritère en monocritère.

¹⁷ L'utilité est le niveau de satisfaction qu'un bien (panier de consommation) ou qu'un service procure [ROBERT, 2001]. Mathématiquement, une fonction d'utilité est obtenue en associant à chaque panier de consommation x , un nombre réel $u(x)$ de manière à respecter la cohérence suivante : le panier de consommation y est préféré au panier z , si et seulement si : $u(y) > u(z)$. Si le consommateur n'a pas de préférence vis à vis des paniers y et z , alors l'utilité associée aux deux paniers est égale : $u(y) = u(z)$.

¹⁸ Se dit d'une opération ou d'une relation qui, lorsqu'elle lie un premier terme à un second, et ce dernier à un troisième, lie de la même façon le premier terme au troisième [ROBERT, 2001]. Par exemple $A > B > C$ implique $A > C$ est une relation transitive. Réciproquement A préféré à B , préféré à C n'implique pas forcément A préféré à C . C'est donc est une relation intransitive.

→ La seconde attitude issue de « l'école francophone », appelée **agrégation partielle**, consiste à la comparaison de couples d'actions pour l'établissement de relations de surclassement. Cette comparaison s'effectue en considérant, critère par critère, les avantages et les inconvénients d'une action vis-à-vis d'une autre [JOERIN, 1997]. Dans ce cas de figure, l'incommensurabilité et l'intransitivité des critères sont respectés. Cette approche a pour principal inconvénient, le manque de clarté de ses résultats [SCHÄRLIG, 1985] [SCHÄRLIG, 1996].

→ Enfin l'attitude intermédiaire, appelée **agrégation locale itérative**, consiste en un compromis entre les précédentes attitudes. Elle est généralement utilisée quand l'ensemble des actions potentielles A est très grand. Il s'agit à partir d'une solution connue de rechercher autour de celle-ci, une meilleure solution et de réitérer cette recherche. L'application d'une telle méthode demande d'une part une grande disponibilité du décideur et d'autre part une totale confiance à l'Homme d'étude car ces méthodes sont très souvent inaccessibles à des non-spécialistes [JOERIN, 1997]. De ce fait, ces méthodes ne seront pas abordées dans ce mémoire.

La Figure 23 ci-dessous montre les principales méthodes rattachées aux trois approches opérationnelles de l'analyse multicritère [MAYSTRE *et al.*, 1994].

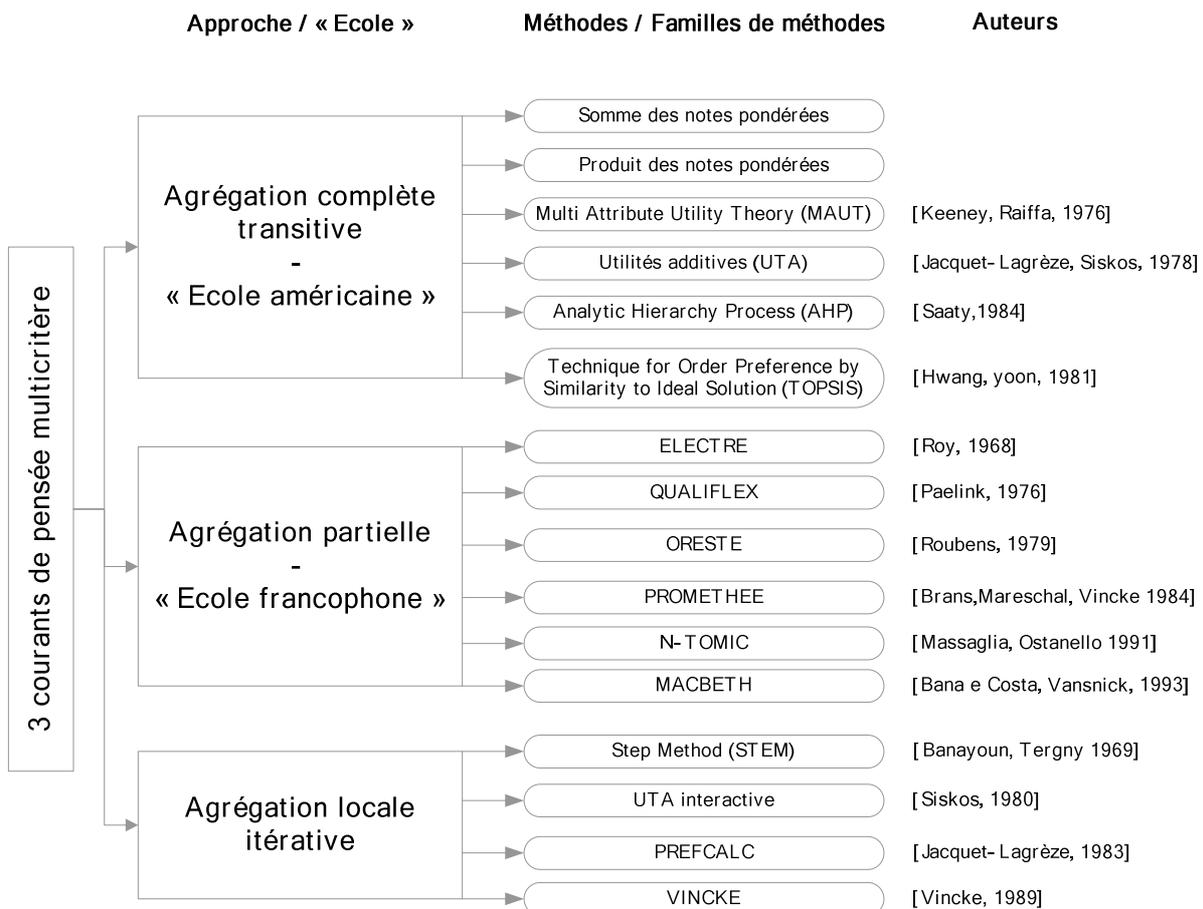


Figure 23 : Approches opérationnelles et méthodes [MAYSTRE *et al.*, 1994]

II.4.3.2 Étude de quelques méthodes d'analyse multicritère

Différentes méthodes d'analyse multicritère appartenant à l'approche d'agrégation complète transitive et d'agrégation partielle ont été étudiées dans le cadre de cette thèse.

- Les méthodes appartenant à l'approche d'agrégation complète transitive qui ont été étudiées sont la **somme des notes pondérées** (Weight Sum Method), la **méthode MAUT** (Multi Attribute Utility Theory), la **méthode UTA** (Utilités Additives), et la **MHM** (Méthode Hiérarchique Multicritère ou Analytic Hierarchy Process en anglais). Comme il a été dit précédemment les méthodes d'agrégation complète transitive sont basées sur la maximisation d'une fonction d'utilité. La différence principale entre ces méthodes réside dans la définition de la fonction d'utilité laquelle est spécifique à la méthode utilisée.
- Parmi les méthodes d'agrégation partielle, les plus connues font partie de la famille ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité). **ELECTRE I** et **IV** ont donc été étudiées. Rappelons que l'agrégation partielle vise au respect des deux caractéristiques de la vision multicritère que sont l'intransitivité et l'incomparabilité.

Le choix de l'étude de ces méthodes en particulier est motivé par deux raisons principales :

- Elles ont déjà fait leurs preuves dans le domaine environnemental. Par exemple, la MHM a été utilisée à plusieurs reprises dans des problématiques d'évaluation de la vulnérabilité d'un territoire, en matière de risques industriels [TIXIER, 2002] et de risques de transport de matières dangereuses [DESPOUY, 2006], ou encore dans des problématiques d'aide à la gestion du réseau d'eau potable d'une ville [BLÏNDU, 2004]. En ce qui concerne ELECTRE I, cette méthode fut utilisée pour déterminer le plan d'aménagement d'un système de réservoirs le plus adapté dans le cadre du développement d'un bassin fluvial [ANAND RAJ *et al.*, 1996]. Plus récemment, elle a été employée à la résolution de problèmes de distribution d'eau au Brésil [MORAIS *et al.*, 2006]. Enfin, ELECTRE IV a été mise en œuvre par Marchand (1988) pour la gestion des décharges régionales [MAYSTRE *et al.*, 1994].
- Ces méthodes répondent à la problématique de choix α qui semble la plus adaptée aux objectifs de cette thèse. En effet les objectifs sont, rappelons le, l'évaluation des impacts liés aux pratiques de 4PS et l'aide à la décision dans le choix de pratiques adaptées en « prédisant » les impacts possibles de cette implémentation. Les méthodes de tri (problématique β) et de rangement (problématique γ) n'ont donc pas fait l'objet d'une étude plus approfondie.

Le Tableau 16 suivant récapitule les méthodes d'analyse multicritère étudiées correspondant à la problématique de choix, ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients [SCHÄRLIG, 1996] [SCHÄRLIG, 1985] [DEL VECCHIO, 2006] [VINCKE *et al.*, 1989].

Tableau 16 : Tableau récapitulatif des méthodes d'analyse multicritères étudiées

TYPE	MÉTHODE	DESCRIPTION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
AGRÉGATION TOTALE	Notes pondérées	Modèle des sommes pondérées	Simplicité d'utilisation	- Attribution arbitraire des poids - Compensation entre critères
	MAUT	Fonction d'utilité explicite permettant d'obtenir un rang des options possibles	- Évite de pondérer arbitrairement les critères	- Concepts d'utilité peu clairs - Rationalité du décideur - Manque de réalisme dans le système de loteries
	UTA	Fonction d'utilité explicite permettant d'obtenir un rang des options possibles	- Plus réaliste que MAUT - Admet la révision de la cohérence	- Concepts d'utilité peu clairs
	MHM	Méthode hiérarchique de comparaisons binaires des éléments qui établit la priorité entre les différentes options	- Méthode intuitive et attrayante qui admet des critères quantitatifs, qualitatifs, valeurs relatives ou absolues - Vérification de la cohérence possible	- Subjectivité de l'analyse - Un nombre maximal de critères à comparer et de décideurs - Renversement de rang
AGRÉGATION PARTIELLE (problématique de choix)	ELECTRE I	Méthode basée sur des relations de surclassement des actions les unes par rapport aux autres en fonction de notes données aux critères	- Méthode réaliste et de bon sens qui - Établit clairement les relations entre les actions - Réduit des problèmes de circuits	- Lourdeur des calculs - Manque de clarté des résultats - Attention au contenu des noyaux en fonction du seuil de concordance - Gêne occasionnée par l'utilisation de note
	ELECTRE IV	Méthode basée sur des relations de surclassement des actions les unes par rapport aux autres en fonction des performances	- Méthode réaliste et de bon sens qui - Établit clairement les relations entre les actions - Maîtrise des données car utilisation des performances	- Lourdeur des calculs - Manque de clarté des résultats - Attention au contenu des noyaux en fonction du seuil de concordance - Moins souple qu'ELECTRE I à cause de l'utilisation des seuils de véto.

L'analyse de ce tableau comparatif des méthodes étudiées montre que deux méthodes semblent adéquates pour notre outil. Il s'agit de la MHM et de la méthode ELECTRE I. En effet, la somme des notes pondérées est une méthode trop simpliste voir simplificatrice. Les méthodes MAUT et UTA, basés sur des concepts d'utilité peu clairs n'ont également pas été retenus. Si la méthode ELECTRE IV découle d'ELECTRE I en la rendant plus réaliste par l'utilisation de vraies valeurs pour l'évaluation des actions, il n'en demeure pas moins que l'utilisation de seuils de véto rigidifie la méthode déjà lourde en calculs. Les méthodes MHM et ELECTRE I seront donc celles qui seront employées au cours de cette étude. Ces deux méthodes sont donc décrites plus amplement dans les paragraphes suivants.

II.4.3.2.1 La méthode MHM

L'insatisfaction de Thomas L. Saaty, face à des modèles trop généraux et abstraits qui ne s'adaptent pas à des situations particulières, le conduisit à développer la méthode hiérarchique multicritère MHM [SAATY, 1984]. Cette méthode d'agrégation totale procède par la décomposition d'une situation complexe et non-structurée en une structure

hiérarchique. De nos jours, les utilisations de la MHM dans la littérature scientifique sont nombreuses et abondamment documentées [DEL VECCHIO, 2006].

II.4.3.2.1.1 Description de la méthode

La méthode hiérarchique multicritère est une méthodologie rigoureuse qui se réalise en 3 étapes principales représentées sur la Figure 24.



Figure 24 : Démarche de mise en œuvre de la méthode hiérarchique multicritère

Chacune de ces étapes est décrite ci-dessous.

- Étape 1 : **La construction des hiérarchies**

Cette première étape constitue l'élément primordial de la méthode. Le problème doit être bien défini et compris. La MHM décompose alors ce problème général en ses composantes, puis les classe selon un ordre hiérarchique de plus en plus détaillé. Par exemple, l'objectif général à atteindre est décomposé en divers sous-objectifs, puis en critères à prendre en compte pour le réaliser et enfin en alternatives possibles (Figure 25). Les niveaux de détails dits « hauts » correspondent donc à l'objectif général tandis que les niveaux dits « bas » correspondent plutôt aux solutions ou mesures envisagées (sous objectifs et critères) [SAATY, 1984]. Il est important d'intégrer suffisamment de détails lors de la construction de la hiérarchie afin d'obtenir la vision la plus complète possible.

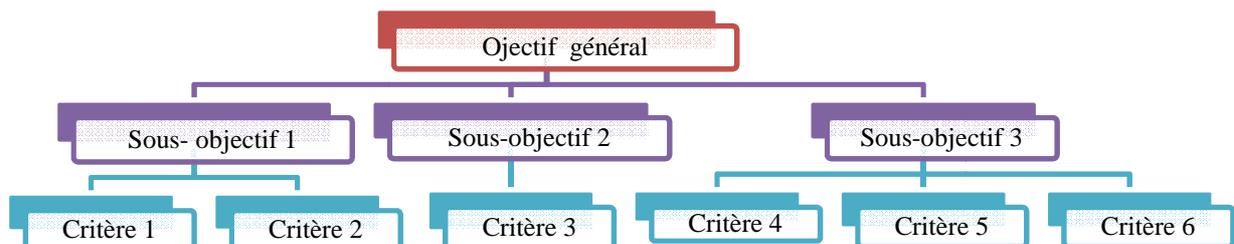


Figure 25 : Structuration hiérarchique de la MHM

- Étape 2 : **L'établissement des priorités**

Cette 2^{ème} étape vise à déterminer les priorités c'est-à-dire l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie à partir de l'étape précédente. Elle consiste donc à comparer l'importance relative de tous les éléments appartenant à un même niveau de la hiérarchie pris 2 par 2, par rapport à l'élément du niveau immédiatement supérieur. La méthode se distingue par sa façon de déterminer les poids attribués aux différents critères ou éléments (Tableau 17).

Tableau 17 : Tableau d'attribution des poids issus de la MHM [SAATY, 1984]

Degré d'importance	Définition
1.0	Importance égale des 2 éléments
3.0	Un élément est un peu plus important que l'autre
5.0	Un élément est plus important que l'autre
7.0	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9.0	Un élément est absolument plus important que l'autre
2.0, 4.0, 6.0, 8.0	Valeurs intermédiaires entre 2 jugements utilisées pour affiner le jugement

Les résultats de ces comparaisons sont ensuite transposés dans des matrices carrées de comparaison. Le Tableau 18 est un exemple de matrice carrée de comparaison des éléments. Dans cet exemple le critère Eau est plus important que le critère Air. De ces matrices de comparaison vont alors être extraits les vecteurs de priorités relatifs, sous la forme d'échelle de proportion. Pour cela il est nécessaire de faire la somme de chacune des colonnes de la matrice pour synthétiser les appréciations, puis de diviser chacun des éléments de la matrice par la somme de sa colonne respective. La nouvelle matrice obtenue est dite normalisée. Enfin, il est nécessaire de calculer le **vecteur de priorité** (VP) en faisant la moyenne de chacune des lignes de la matrice normalisée. Une fois les priorités locales pour tous les critères de la hiérarchie déterminées, la MHM permet le calcul d'un score d'évaluation global pour chacune des solutions alternatives identifiées.

Tableau 18 : Matrice carrée de comparaison des éléments : Exemple d'application

Sens de lecture	Matrice carrée			Matrice normalisée			Vecteur de priorité (VP)
	Eau	Air	Sol	Eau	Air	Sol	
Eau	1	5	2	10/17	5/9	3/5	Eau : 58,1%
Air	1/5	1	1/3	2/17	1/9	1/10	Air : 11,0%
Sol	1/2	3	1	5/17	1/3	3/10	Sol : 30,9%
Somme	17/10	9	10/3				Total : 100%

• Étape 3 : **L'établissement de la cohérence logique**

Cette dernière étape a pour objectif la vérification de la cohérence de la hiérarchie. La MHM évalue la cohérence globale d'appréciation au moyen d'un **ratio de cohérence** [SAATY, 1984]. L'incohérence de la matrice des jugements provient du fait qu'un critère n'est pas jugé de manière cohérente par rapport à l'ensemble des critères. La détermination du ratio de cohérence se fait en plusieurs étapes. En premier lieu chaque colonne est multipliée par la priorité globale lui correspondant : la colonne 1 par VP1=0,58 ; la colonne 2 par VP2=0,11 et la colonne 3 par VP3=0,309. La somme des éléments de chaque ligne est alors calculée. Chaque total de ligne est ensuite divisé par la priorité du critère correspondant à cette ligne c'est-à-dire : total ligne 1 divisé par VP1, total ligne 2 par VP 2, et total ligne 3 par VP3. Une moyenne des résultats obtenus à l'étape précédente λ_{max} est réalisée. Enfin l'indice de cohérence est calculé selon l'équation suivante :

$$I_C = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1} \quad \text{(Équation 4)}$$

N étant le nombre de colonnes de la matrice carrée.

Plus une matrice est cohérente plus son indice de cohérence sera proche de zéro. La méthode considère qu'il y a une cohérence dans les appréciations si I_C est inférieur à 10%. Le Tableau 19 présente un exemple d'application pour la détermination du ratio de cohérence I_C .

Tableau 19: Détermination du ratio de cohérence I_c : Exemple d'application

Sens de lecture	Matrice carrée			Vecteur de priorité	Colonne ×VP			Total ligne	Ligne / priorité	λ_{\max}	I_c (%)
	Eau	Air	Sol		Eau	Air	Sol				
Eau	1	5	2	58,1%	0,58	0,55	0,618	1,748	3,008	3,001	0,06
Air	1/5	1	1/3	11,0%	0,116	0,11	0,103	0,329	2,990		
Sol	1/2	3	1	30,9%	0,29	0,33	0,309	0,929	3,006		
Total	17/10	9	10/3	100%							

Dans cet exemple d'application $I_c=0,06\%$. Par conséquent il y a cohérence dans les appréciations.

II.4.3.2.1.2 Intérêt de son utilisation

Bien qu'elle se base sur une structure mathématique complexe, la méthode hiérarchique multicritère demeure suffisamment facile à implanter [DEL VECCHIO, 2006]. La popularité de cette méthode est essentiellement due à son caractère intuitif et attrayant puisqu'elle permet de trier les éléments d'un système en différents niveaux et de considérer l'interdépendance entre ces éléments. La méthode possède trois avantages majeurs :

- Le premier réside dans le fait qu'elle propose un cadre méthodologique pour l'établissement des priorités. Ainsi grâce à cette démarche claire, elle permet d'éviter les incohérences dans les jugements et les polémiques quand à la définition des poids.
- Le second avantage de cette méthode est qu'elle cherche à comparer deux à deux les éléments de la hiérarchie. Cette démarche semble plus adaptée au cerveau humain qui ne peut considérer à la fois qu'un nombre limité d'informations [JOERIN, 1997].
- En dernier lieu elle a l'avantage incontestable de vérifier la cohérence des choix.

Les défauts reprochables à cette méthode sont qu'elle admet des renversements de rangs. Cela signifie que l'ajout d'un nouveau critère entraîne pour les critères déjà existants, une perte de leur priorité.

II.4.3.2.2 La méthode ELECTRE I

ELECTRE I est la première méthode de la famille, publiée par Bernard Roy en 1968. Ces méthodes sont basées sur le principe de Condorcet selon lequel « *une action en surclasse une autre si elle est au moins aussi bonne que l'autre relativement à une majorité de critères, sans être trop nettement plus mauvaise que cet autre relativement aux autres critères* » [SCHÄRLIG, 1985].

Concrètement le principe de Condorcet peut être modélisé à travers les relations suivantes : Pour toute paire d'action (a, b),

- a est au moins aussi bonne que b (et/ou inversement) : relation de type S
- a est incomparable à b (et inversement) : relation de type R

Ce système relationnel accepte donc l'incomparabilité [ADOLPHE *et al.*, 2006]. L'utilisation du terme « *au moins aussi bonne* », est une condition qui impose qu'une majorité de critères se dégage en faveur de l'action surclassante. Il s'agit d'une condition de concordance. De même il existe une condition de discordance qui impose qu'il n'existe pas une trop forte

pression dans un des critères en faveur du surclassement inverse. On voit ainsi la principale différence avec les méthodes d'agrégation totale transitive dans lesquelles les mauvais critères sont compensés par les critères performants.

La mise en œuvre de la méthode ELECTRE I comprend quatre étapes principales représentées sur la Figure 26. Ces différentes étapes sont explicitées dans les paragraphes suivants.

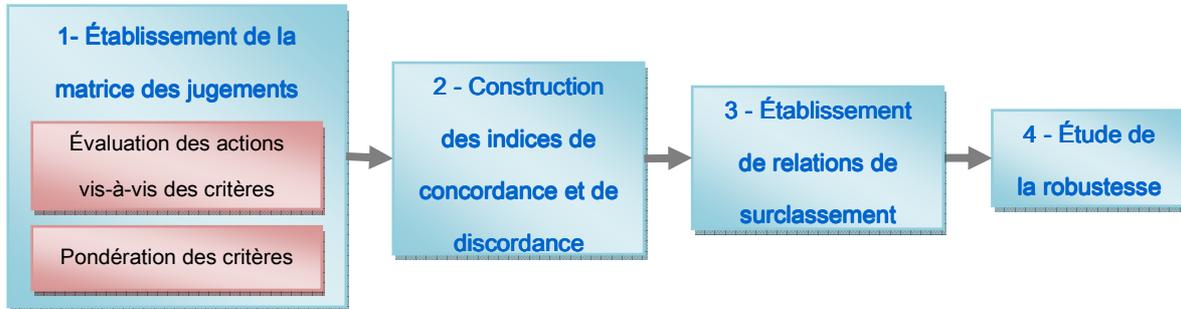


Figure 26: Démarche de mise en œuvre de la méthode ELECTRE I

- Étape 1 : **Établissement de la matrice des jugements**

Concrètement, la méthode procède tout d'abord par l'établissement de la matrice des jugements: choix des actions (a_i), choix des critères (g_j), attribution d'un poids p_j d'autant plus grand que le critère est important, évaluation des actions vis à vis des critères ($g_j(a_i)$). La méthode ELECTRE I ne permettant pas de travailler avec des valeurs vraies, celles-ci sont traduites en notes sur une échelle propre à chaque critère [MAYSTRE *et al.*, 1994]. Il existe deux types principaux d'échelles : l'échelle ordinale et l'échelle cardinale. L'échelle ordinale se caractérise par le fait que les classes représentées ne peuvent être remplacées que par des relations de type « plus petit que », « plus grand que », et « égal à » (par exemple : très bon, bon, neutre, passable, mauvais). L'échelle cardinale se caractérise par le fait que les valeurs peuvent être reliées par les quatre opérations arithmétiques de base (+, X, ÷, -). L'évaluation $g_j(a_i)$ est alors transposée sur une échelle numérique à 5 niveaux dont la longueur s'adapte au poids de chaque critère (Figure 27) [SCHÄRLIG, 1985].

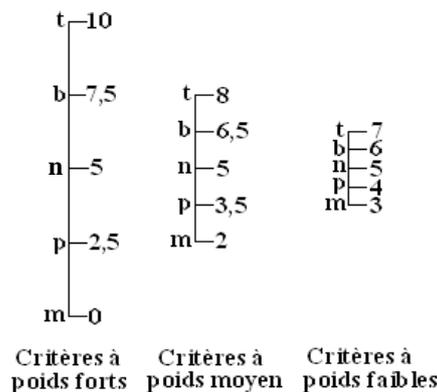


Figure 27 : Adaptation de l'échelle au poids du critère

• Étape 2 : **Construction des indices de concordance et de discordance**

La seconde étape consiste au calcul des indices de concordance $c(a, b)$ et de discordance $d(a, b)$ comme suit:

➔ **Indice de concordance**

$$c(a, b) = \frac{1}{P} \sum_{j: g_j(a) \geq g_j(b)} p_j \quad \text{où } P = \sum_{j=1}^n p_j \quad \text{(Équation 5)}$$

avec a et b : les deux actions comparées
 p_j : poids attribués aux critères
 P : somme de l'ensemble des poids p_j

Prenons l'hypothèse que la 1^{ère} action surclasse la seconde, il suffit de faire la somme des poids des critères pour lesquels l'hypothèse est vérifiée divisée par la somme totale des poids. L'indice de concordance varie entre 0 et 1. Le Tableau 20 montre un exemple pour le choix d'une ville en vue d'une délocalisation. Prenons l'hypothèse Lausanne surclasse Fribourg. Cette hypothèse se vérifie pour les critères : « conditions naturelles », « modèle », « agglomération » et « université ». Ils ont respectivement des poids de valeur 1, 3, 1, 1 dont la somme est égale à 6. On divise cette somme par celle de l'ensemble des poids, qui est 10. Par conséquent, l'indice de concordance de l'hypothèse Lausanne surclasse Fribourg vaut 0,6.

Tableau 20 : Matrice des jugements dans le cas du choix de la ville pour une délocalisation industrielle [SCHÄRLIG, 1985]

Critère g_j	Conditions natur.	Modèle	Agglomération	Université	Marché travail
poids p_j	1	3	1	1	4
Lausanne	5	10	7	7	2
Fribourg	4	8	5	5	7
Berne	5	8	7	7	6
Soleure	7	6	5	3	7
échelle	3-7	0-10	3-7	3-7	0-10

➔ **Indice de discordance**

$$d(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(a) \geq g_j(b), \forall j, \\ \frac{1}{\delta} \max_j [g_j(b) - g_j(a)], & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{(Équation 6)}$$

avec

$$\delta = \max_{c,d,j} [g_j(c) - g_j(d)] \quad \text{(Équation 7)}$$

Pour le calcul de l'indice de discordance deux cas de figure se présentent :

- L'indice de discordance est nul si tous les critères de l'action a surclassent ceux de b.
- Dans le cas contraire il convient de s'intéresser au critère pour lequel l'hypothèse n'est pas vérifiée et ayant le plus grand écart entre leurs valeurs. La différence entre ces valeurs est alors divisée par la longueur de l'échelle δ . Reprenons notre exemple de délocalisation avec l'hypothèse Lausanne surclasse Fribourg. Cette hypothèse ne se vérifie pas pour le critère « marché du travail ». La différence entre $g_j(a)$ et $g_j(b)$

est 5 et la longueur de l'échelle pour ce critère est 10. L'indice de discordance est donc de 0,5.

L'intérêt de définir des échelles qui s'adaptent aux poids des critères est ici mis en évidence puisqu'un critère peu important n'influera pas trop sur l'indice de discordance qui se doit d'être le plus faible possible [SCHÄRLIG, 1985].

- Étape 3 : **Établissement des relations de surclassement**

La troisième étape consiste en l'établissement des relations de surclassement. La comparaison des indices de concordance et de discordance à respectivement un **seuil de concordance** \hat{c} (assez grand) et un **seuil de discordance** \hat{d} (assez petit) permet d'exprimer le minimum de concordance requis et le maximum de discordance toléré. Ces seuils sont compris dans l'intervalle [0-1] et fixés arbitrairement. En général, les seuils de concordance et de discordance sont respectivement de 0,8 et 0,2. La relation de surclassement est alors établie comme suit :

$$a \text{ surclasse } b \text{ ssi } \begin{cases} c(a, b) \geq \hat{c} \\ d(a, b) \leq \hat{d} \end{cases} \quad (\text{Équation 8})$$

Un graphe des relations de surclassement dans lequel les actions sont représentées par des points et les relations de surclassement par des segments fléchés dans le sens de l'action surclassée est établi [JOERIN, 1997] [VINCKE *et al.*, 1989]. La Figure 28 montre le graphe de surclassement pour l'exemple du choix de la ville pour une délocalisation industrielle.

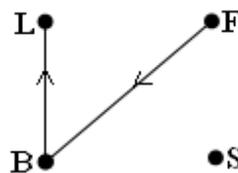


Figure 28 : Exemple du graphe de surclassement dans le cas d'une délocalisation

Ce graphe permet de répondre à la problématique de choix α en dégagant le noyau d'ELECTRE qui contient les actions surclassantes qui ne sont surclassées par aucune autre du noyau. Toute variante n'appartenant pas au noyau est surclassée par au moins une variante appartenant au noyau. L'appartenance d'une variante au noyau ne signifie pas nécessairement qu'il s'agit d'une bonne solution, le noyau représentant simplement l'ensemble des variantes parmi lesquelles se trouve la « meilleure » et des variantes qui lui sont difficilement comparables. Si l'on reprend l'exemple proposé, Fribourg surclasse Berne qui surclasse Lausanne. Le noyau est donc composé des deux villes Fribourg et Soleure qui lui est incomparable. Il est alors nécessaire d'élaborer des recommandations quant au choix de la meilleure action.

- Étape 4 : **Étude de la robustesse**

En dernier lieu une analyse de la sensibilité est requise. L'étude de sensibilité a pour objectif de vérifier la stabilité des résultats obtenus. Pour cela elle consiste à répéter l'analyse multicritère originale ou solution de base en faisant varier de manière isolée puis collective, les valeurs attribuées initialement aux différents paramètres (poids, échelle, indices...) Cette analyse de sensibilité sert de base à l'étude de la robustesse. Cette étude cherche à déterminer le domaine de validité du résultat et à élaborer une recommandation. Si en faisant varier les paramètres autour de leur valeur initiale, il n'y a pas une modification importante des résultats, la recommandation est dite robuste [MAYSTRE *et al.*, 1994] [FRÄMLING, 1996].

II.4.4 Synthèse sur l'aide à la décision

Ce bref panorama concernant les méthodes d'analyse multicritère existantes met en évidence trois types d'approches. L'approche dite « américaine » cherche à maximiser une fonction d'utilité liée à chaque action potentielle. Par opposition « l'école française », consiste à l'acceptation de l'intransitivité et l'incomparabilité des critères. Et enfin l'approche d'agrégation itérative procède par tâtonnement pour approcher la meilleure solution dans un très grand nombre d'actions potentielles.

L'outil que nous souhaitons développer se situe plutôt dans la problématique de choix α . Plusieurs méthodes appartenant à cette problématique ont été étudiées. Parmi elles deux méthodes, la MHM et ELECTRE I ont été jugées les plus pertinentes pour la réalisation de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS.

II.5 Synthèse de la revue des outils méthodologiques

La revue des outils méthodologiques proposée dans cette partie du mémoire a permis de faire le point sur les connaissances qui seront mises à contribution dans le cadre de la démarche d'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS (partie III).

Le chapitre intitulé « Entreprises, Systémique et Risques » a montré que l'entreprise est un système complexe et qu'il est nécessaire d'utiliser les principes de la modélisation d'entreprise pour en simplifier, analyser, ou encore expliquer le fonctionnement. L'étude comparative de cinq méthodes de modélisation d'entreprises a révélé une adéquation du modèle SADT pour la représentation d'un atelier de traitement de surfaces en vue de l'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS. De plus, le modèle MADS sera utilisé afin de tenir compte des risques liés à l'implémentation d'une pratique de 4PS lors de l'élaboration de la méthodologie.

Le bref panorama concernant les indicateurs (cf. §II.3) a permis de justifier l'utilisation d'indicateurs dans la réalisation de la méthodologie d'évaluation des impacts de la production plus propre et plus sûre. En effet les objectifs d'un indicateur répondent à ceux de cette thèse puisque l'on souhaite construire une méthode qui permette de quantifier les impacts de la mise en place de la 4PS et d'évaluer le risque encouru (*rendre compte d'une situation*) avant et après cette implémentation (*comparer à différentes dates*). Le but étant d'apporter aux industriels une aide à la décision (*aide à la prise de décision*). Ce chapitre a également été l'occasion de proposer un outil d'analyse du tissu relationnel ente les indicateurs : la méthode MICMAC.

Enfin, dans le chapitre II.4 de cette revue, il a été question de définir les grandes lignes de l'aide à la décision. Deux méthodes tirées de cet état de l'art semble judicieuses pour la réalisation de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS. Il s'agit de la Méthode Hiérarchique Multicritère issue de l'approche d'agrégation totale et de la méthode ELECTRE I issue de l'approche d'agrégation partielle qui répondent toutes deux à la problématique de choix α .

Intéressons nous maintenant à l'utilisation et à la combinaison de ces connaissances pour l'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS.

**PARTIE III: DÉMARCHE
D'ÉLABORATION D'UNE
MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES
IMPACTS DES PRATIQUES DE 4PS**

III.1 Introduction

Les deux premières parties de ce mémoire ont servi à rassembler les connaissances qui ont contribué à l'élaboration de notre méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS. Cette troisième partie a pour objectif de présenter la démarche d'élaboration de cette méthodologie (Figure 29).

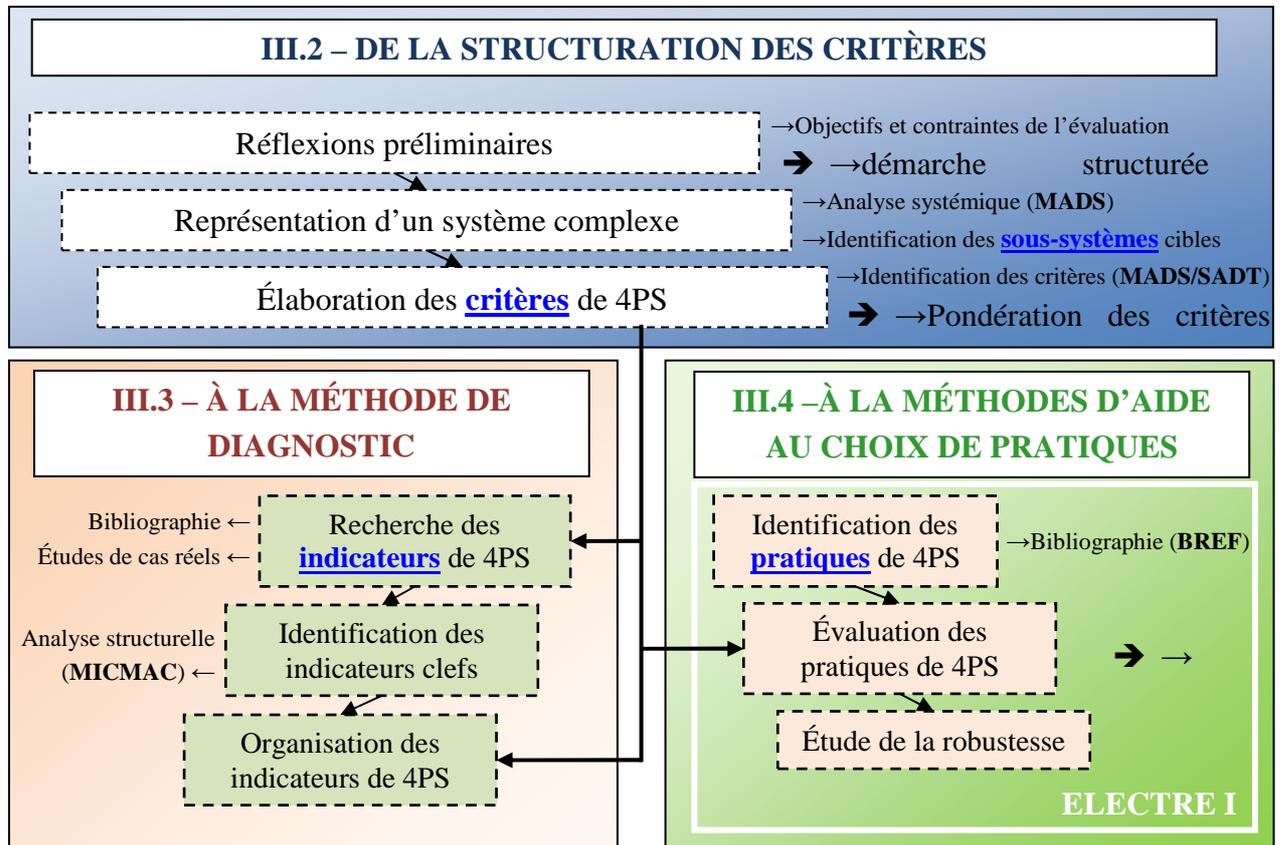


Figure 29 : Démarche d'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts de 4PS

Comme il a été dit précédemment la méthodologie proposée comprend deux méthodes :

- Une méthode de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS basée sur un système d'indicateurs
- Une méthode d'aide au choix de pratiques

Ces méthodes s'appuient sur un ensemble de critères qu'il est nécessaire d'identifier et de structurer. Dans le premier chapitre (III.2), il sera donc question de l'identification et de la structuration de ces critères.

Le second chapitre (III.3), est consacré au développement de la méthode de diagnostic. Pour ce faire, les indicateurs de 4PS sont alors identifiés et organisés en fonction des critères de 4PS identifiés dans le premier chapitre.

Enfin, le troisième chapitre (III.4) propose la construction de la méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS via la mise en œuvre de la méthode ELECTRE I. Les critères de 4PS serviront ici de critères vis-à-vis desquels les pratiques seront évaluées.

III.2 De la structuration des critères de 4PS...

III.2.1 Réflexions préliminaires

III.2.1.1 Objectifs et contraintes de l'évaluation

L'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS nécessite en premier lieu de définir les objectifs et contraintes de l'évaluation [GIRARDIN *et al.*, 2005].

- ➔ La première question qui vient à l'esprit est celle de la définition de l'utilisateur. La méthodologie proposée s'adresse aux parties prenantes des PME qui constituent une majorité des entreprises de traitement de surfaces. Ces parties prenantes sont diverses : le chef d'entreprise, les donneurs d'ordre, les financeurs, ou encore les institutions de régulation.... Néanmoins, les chefs d'entreprises sont visés principalement puisqu'un récent sondage sur l'environnement et la maîtrise de l'énergie dans les PME a révélé que la prise de décision environnementale relève bien souvent d'une conviction personnelle des entrepreneurs [GAULT, 2009].
- ➔ Une fois, l'utilisateur spécifié, la seconde interrogation est celle de l'objectif recherché. S'agit-il d'une méthode de diagnostic, destinée à la communication ou alors visant l'aide à la décision? Pour notre part, l'objectif de ce travail est double puisqu'il cherche à diagnostiquer les impacts relatifs aux pratiques de 4PS et à apporter une aide dans le choix de ces pratiques.
- ➔ Girardin (2005) propose alors de spécifier l'objet étudié. La première partie de ce mémoire a mis en évidence la nécessité d'une approche « site » pour l'évaluation des impacts de pratiques de 4PS. Quatre enjeux motivent l'élaboration de cette méthodologie:
 - Environnemental avec la minimisation des impacts environnementaux des entreprises
 - Réglementaire en apportant une aide à la mise en conformité réglementaire
 - De sécurité avec la prise en compte des risques lors de la mise en place de la 4PS
 - Opérationnel par le biais d'une aide au choix de pratiques de 4PS

Ainsi l'entreprise elle-même et son environnement proche seront étudiés.

Les contraintes de l'évaluation étant bien définies, intéressons nous maintenant à la démarche d'élaboration de la méthodologie d'évaluation.

III.2.1.2 Recherche d'une démarche structurée

III.2.1.2.1 Démarche Bottom-up

D'après la littérature, la construction de tableaux de bord d'indicateurs relève principalement d'une approche bottom-up. En règle générale, une fois les objectifs de l'évaluation clairement définis, les méthodes classiques cherchent à identifier les paramètres mesurables qui permettront de suivre ces objectifs. Ces paramètres, positionnés par rapport à une référence qui leur donne du sens (ils deviennent ainsi des indicateurs), sont alors agrégés pour arriver à des indices finaux (critères) permettant la prise de décision. La Figure 30 montre la démarche bottom-up d'élaboration d'un tableau de bord.

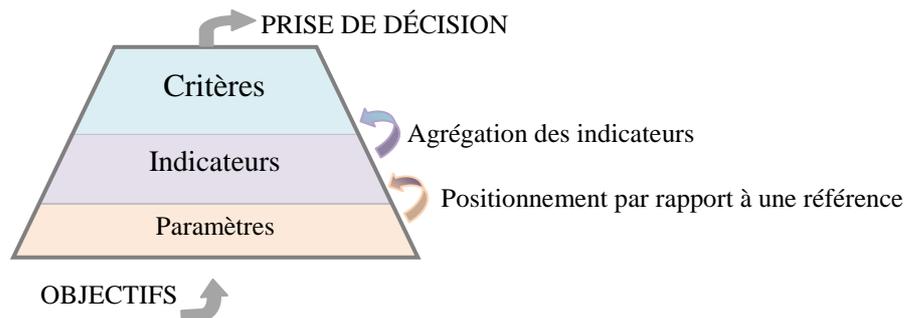


Figure 30: Démarche classique bottom-up d'élaboration d'un tableau de bord d'indicateurs

Or, l'entreprise est un système complexe. Une approche ascendante permet-elle d'appréhender de manière exhaustive les divers effets induits lors de l'implémentation d'une pratique de 4PS ? L'utilisation d'une approche top-down semble plus appropriée dans ce cas. En effet, partir d'une vision globale pour atteindre les niveaux de détails permet d'être le plus exhaustif et complet possible.

III.2.1.2.2 La démarche Top-down basé sur la méthode MOSAR

Cette approche top-down s'appuie sur le formalisme MADS et la méthode MOSAR (§II.2.3.2) qui ont dû être toutefois adaptés à la problématique étudiée.

Comme il a déjà été évoqué, l'objectif de la méthodologie d'évaluation des impacts est de quantifier les effets de l'introduction d'une pratique de production plus propre sur l'entreprise elle-même et son environnement. Une analogie avec le modèle MADS précédemment présenté (§II.2.3.2) semble découler de cet objectif. En effet, Périlhon (2003) dans la représentation systémique de l'univers du danger, attribue les effets non souhaités à la résultante du flux de danger sur le système cible (population, individu, installation, écosystème). Ce flux de danger étant lui-même provoqué par un évènement initial au niveau du système source.

Lors de l'implémentation d'une pratique 4PS, l'entreprise ainsi que son environnement proche peuvent être considérés comme les cibles potentielles de la modification envisagée. Cette modification est alors assimilée à l'évènement perturbateur (ou aléa dans la terminologie du risque) dont on cherche à quantifier l'impact sur l'entreprise et son environnement. Ces cibles sont plus ou moins sensibles à l'introduction de cette nouvelle pratique (notion de vulnérabilité). L'impact traduit la conséquence de la mise en œuvre de la pratique de 4PS sur la cible. La Figure 31 suivante schématise l'analogie qui peut être faite pour le cas de la mise en œuvre de pratiques de 4PS.

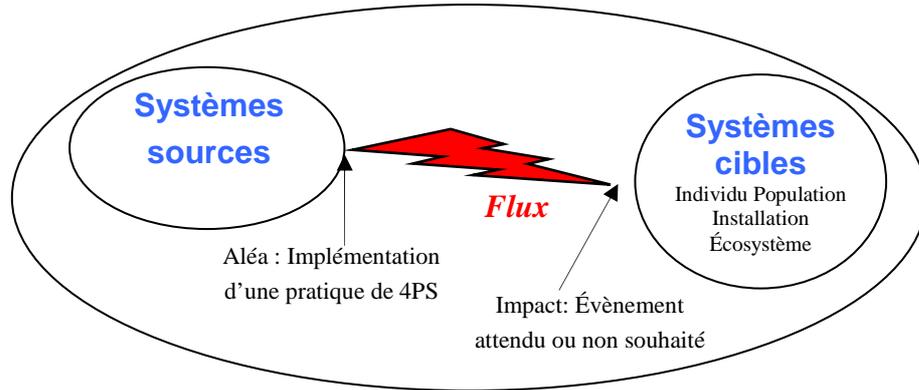


Figure 31: Modèle MADS adapté à la problématique de 4PS

Dans le cas actuel, l'aléa a plus un rôle bénéfique que d'endommagement puisque l'utilisation d'une nouvelle pratique de production plus propre cherche à améliorer la situation existante. C'est pourquoi l'impact sur les cibles (individu, population, installation, écosystème) peut être un évènement attendu ou non souhaité.

Le modèle MADS adapté est mis en œuvre dans la méthode MOSAR elle aussi modifiée pour les besoins de l'étude.

MOSAR est mise en œuvre par le biais d'une démarche structurée qui part d'une vision globale de l'entreprise pour aboutir à une étude détaillée des risques (cf. §II.2.3.2). Cette approche top-down et systémique est plus appropriée à notre problématique. L'intérêt d'utiliser l'approche systémique est double :

- Elle permet une évaluation complète de l'entreprise grâce à une étude systémique ou celle-ci est décomposée en sous-systèmes cibles potentielles d'une pratique de production plus propre.
- Une approche systémique des indicateurs permet de prendre en compte les mécanismes causaux des phénomènes dans l'optique d'une représentation globale et complexe de la réalité. Dans différents modèles d'indicateurs existants, les relations de causalité entre les indicateurs apparaissent, mais celles-ci restent souvent implicites. Il en résulte une juxtaposition des indicateurs dans différentes catégories [DESTHIEUX, 2005]. L'utilisation de la systémique permettrait d'explicitier ces relations.

Or, étant donné que la méthode MOSAR a été développée pour évaluer les risques d'une installation et ensuite d'en déduire les moyens de protection et de prévention, il a été nécessaire de l'adapter à la problématique de l'évaluation des impacts des pratiques de 4PS. De plus le module B (vision microscopique) de la méthode qui s'intéresse plus particulièrement aux dysfonctionnements techniques des machines et appareils et opérateurs est par conséquent spécifique à chaque installation. Ainsi, seul le module A (vision macroscopique) a été adapté. Le Tableau 21 présente la façon d'adapter la méthode MOSAR pour construire une démarche top-down d'élaboration de la méthode d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS.

Tableau 21: Adaptation de la méthode MOSAR [DROGOUL, 2006]

Les étapes de la méthode MOSAR (Module A)	Adaptation du Module A
1. Représentation systémique de l'installation	1. Représentation systémique de l'installation et de son environnement
2. Identification des sources de danger et des scénarios principaux À partir de la grille des « systèmes source de danger », les entités source potentielle de danger pour chaque sous-système sont inventoriées. Identification des scénarios de danger	2. Identification des sources pour déterminer les critères vis-à-vis desquels se fera l'évaluation À partir de la grille des « systèmes source de danger » qui inventorie pour chaque sous-système les sources de danger qui pourraient atteindre les sous-systèmes (=cible). Aucune identification de scénarios de danger
3. Évaluation des risques principaux probabilité de l'accident redouté impact de l'accident sur les cibles.	3. Évaluation des impacts principaux Recherche et choix des indicateurs de 4PS en fonction des critères
4. Négociation des objectifs globaux Évaluation des risques Identification des moyens de prévention et de protection Hiérarchisation des scénarios en fonction de l'importance de l'accident	4. Objectifs principaux Évaluation des impacts Mise en place d'une méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS Pondération des critères de 4PS en fonction de l'importance de la cible
5. Mise en place de barrière de prévention et de protection	5. Organisation des indicateurs dans un tableau de bord

La démarche top-down d'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS ainsi obtenue est présentée sur la Figure 32.

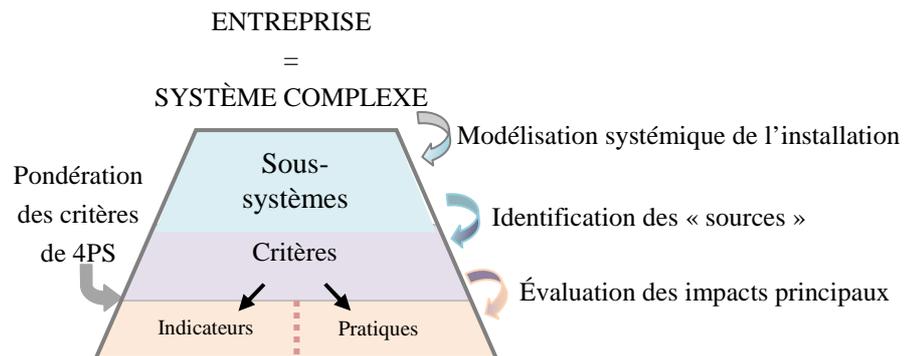


Figure 32: Démarche top-down d'élaboration de la méthodologie

III.2.2 Modélisation systémique de l'entreprise et de son environnement

La première étape de la démarche est la modélisation systémique du système entreprise et du système environnement de l'entreprise en sous-systèmes.

III.2.2.1 Le système Entreprise

La revue des outils méthodologiques a montré que le modèle OID¹⁹ est adapté à la représentation du système que constitue l'entreprise. En effet, l'entreprise est dotée :

¹⁹ Opération-Information-Décision

- d'un sous-système opérant, ayant pour mission la réalisation physique grâce à des ressources (hommes, machines).
- d'un sous-système d'information chargé de la gestion des données et de la capitalisation des connaissances
- d'un sous-système de décision qui prend les décisions pour réaliser ses objectifs

Dans le modèle MADS, les sous-systèmes cibles concernent à la fois l'entreprise et son environnement. Les ressources du sous-système opérant y sont bien présentes. Néanmoins, Périlhon dissocie les ressources humaines (individus) des ressources matérielles (installation).

Dans le cadre de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS, il semble que cette dissociation entre ressources humaines et matérielles soit indispensable. En effet, l'impact sur une cible dépend de la vulnérabilité de cette cible. Par conséquent, l'impact de l'implémentation d'une pratique de 4PS sera différent selon qu'il concerne les hommes au travail ou l'installation en elle-même. Ce constat est la base de l'identification de deux sous-systèmes cibles des pratiques de 4PS qui sont :

- Le sous-système opération
- Le sous-système opérateurs

Par contre, les sous-systèmes d'information et de décision ne sont, à notre connaissance, pas abordés dans le modèle MADS. Si les répercussions de la mise en place d'une pratique de 4PS sur les décisions dans l'entreprise semble évidentes (formation du personnel, investissement en nouveau matériel par exemple), celles sur le sous-système information le sont moins. Le sous-système de décision est étroitement lié au sous-système d'information de l'entreprise puisque la qualité des décisions dépend de la qualité des informations. Pour l'évaluation des impacts des pratiques de 4PS, ces deux sous-systèmes ont été fusionnés en un sous-système stratégie tenant compte à la fois des aspects décisionnels et informationnels.

III.2.2.2 Le système environnement de l'entreprise

Si l'on considère le modèle MADS adapté à la problématique de 4PS, l'environnement de l'entreprise pouvant être impacté par l'introduction d'une pratique de 4PS est composé de deux cibles (population et écosystème). Or la variété des éléments composant l'environnement de l'entreprise, ne peut être restreinte aux seules cibles population et écosystème. Dassens (2007) propose un modèle plus complet de représentation de la notion d'environnement de l'entreprise. Il se compose de cinq sphères:

- la sphère **Économique** composée du marché économique et financier,
- la sphère **Environnementale** ou environnement naturel
- la sphère **Politico-juridique** représentant les pouvoir institutionnels.
- la sphère **Sociale** représentant la société civile et les individus, et
- la sphère **Technique** ou environnement technologique.

Ce modèle est-il adapté à la modélisation de l'environnement d'un atelier de traitement de surfaces dans le cas de l'implémentation d'une pratique de 4PS?

- La sphère **économique** est indissociable de l'activité d'une entreprise. Les partenaires économiques des traiteurs de surface sont variés : les clients qui spécifient le cahier des charges des pièces à traiter, les fournisseurs de produits chimiques qui proposent de

nouvelles formulations, ou encore les banques qui prêtent des capitaux pour des améliorations technologiques...etc. Ces partenaires sont donc possiblement impactés par l'introduction de pratiques de 4PS au cœur de l'outil de production. Nous modéliserons donc le sous-système économique.

- L'**écosystème** ou environnement naturel est directement impacté par l'implémentation d'une pratique de 4PS puisque la production propre est avant tout « *une stratégie environnementale* » [UNEP, 2001]. De plus les industries du traitement de surface relevant de la législation des ICPE, sont soumises à l'étude détaillée de leurs impacts sur l'environnement. Par conséquent, cette sphère est retenue comme sous-système cible des pratiques de 4PS.
- Dans le cas d'un atelier de traitement de surface la sphère **politico-juridique** est constituée des pouvoirs publics qui édictent la réglementation (arrêté ministériels et préfectoraux), des DRIRE qui sont chargées du contrôle et du respect de cette réglementation (contrôle périodique et inopiné des installations), ou encore des agences de l'eau qui perçoivent les taxes « pollueur-payeur » et soutiennent les investissements dans la production plus propre. Cette sphère peut également prendre en compte la Caisse Régionale d'Assurance Maladie qui impose le respect de la réglementation en matière de conditions de travail et de santé des employés. Bien que la sphère politico-juridique fasse partie intégrante de l'environnement de l'entreprise, peut-elle être considérée comme une cible potentielle de la mise en place d'une pratique de 4PS? En effet, comme il a été dit, l'impact est la conséquence de l'aléa sur la cible. Pour être considérée comme cible, il faut que la mise en place d'une pratique de 4PS modifie quelque part ce système. Par exemple, que l'implémentation soit directement à l'origine de l'élaboration d'une nouvelle législation ou d'un contrôle moins fréquent des DRIRE. Les impacts de pratiques de 4PS sur la sphère politico-juridique ont été jugés négligeables. Par conséquent, cette sphère sera conservée pour la modélisation globale de l'entreprise mais ne sera plus développée par la suite.
- La sphère **sociale** concerne le milieu social dans lequel l'entreprise évolue : individus (riverains) ou groupes d'individus (associations écologistes, entreprises voisines). Cette sphère sociale est prise en compte dans la définition même de la notion de production propre : « *L'application continue d'une stratégie environnementale préventive intégrée aux processus, produits et services afin d'améliorer leur efficacité écologique et réduire les risques pour les humains et l'environnement* » [UNEP, 2001]. Il est donc évident que l'implémentation de telles pratiques impacte le sous-système social.
- La sphère **technique** proposée par Dassens correspond aux infrastructures et ouvrages externes à l'entreprise comme par exemple les autres industries à proximité, ou encore les axes routiers. L'étude des types d'accidents les plus récurrents dans le secteur du traitement de surface (cf. partie I § I.2.2) ayant montré que les principaux risques de l'activité sont le rejet de substances dangereuses et l'incendie, la sphère technique sera en général faiblement d'être impactée. Par conséquent, les impacts de pratiques de 4PS sur la sphère technique sont jugés négligeables. La sphère technique sera conservée pour la modélisation globale de l'entreprise mais ne sera plus développée par la suite.

Ce modèle est donc adaptable à la modélisation de l'environnement des ateliers de traitement de surfaces (Figure 33).

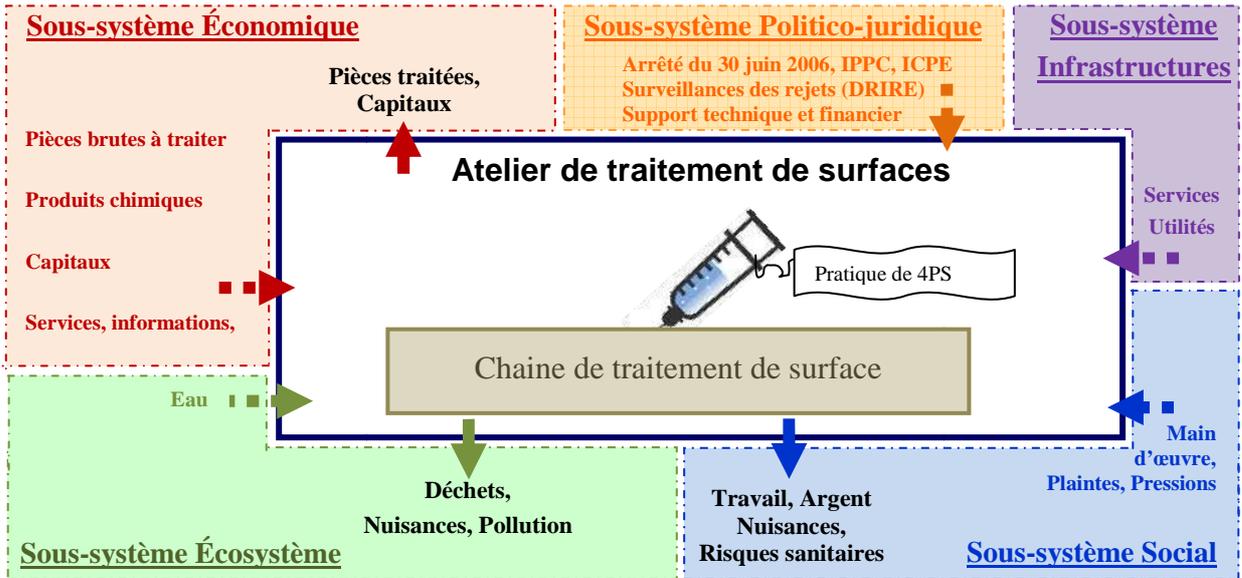


Figure 33: Sous-systèmes de l'environnement de l'atelier impactés par l'implémentation d'une pratique de 4PS

III.2.2.3 Synthèse sur la modélisation systémique

La modélisation systémique a abouti à la représentation de l'entreprise et son environnement. Les sous-systèmes identifiés au niveau du système Entreprise sont les opérateurs, les opérations et la stratégie. Le système environnement quand à lui englobe les cinq sous-systèmes suivants : social, écosystème, économique, infrastructures et politico-juridique (Figure 34). La mise en place d'une stratégie 4PS impacte à la fois l'entreprise et son environnement. Cependant parmi les cinq sous-systèmes identifiés dans l'environnement de l'entreprise, les sous-systèmes infrastructures et politico-juridique ne seront plus considérés étant donné que les impacts d'une pratique de 4PS sur ce sous-systèmes ont été jugés négligeables.

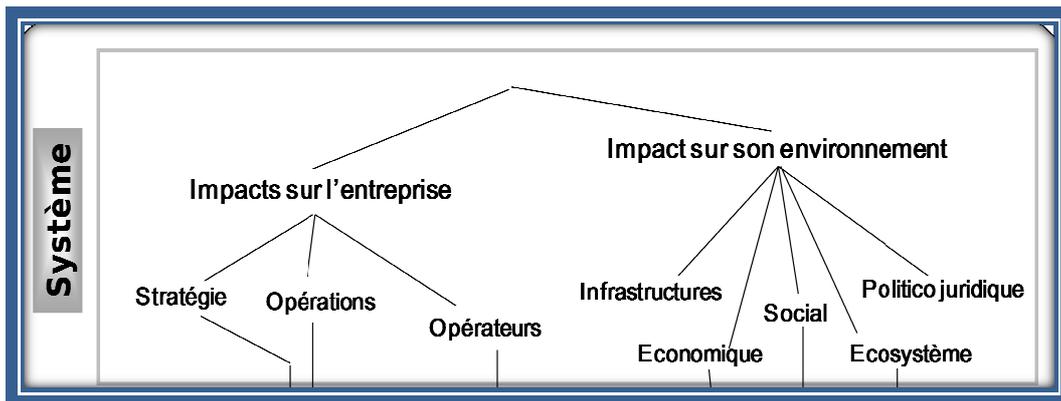


Figure 34: Systèmes et sous-systèmes pouvant être impactés par des pratiques de 4PS

III.2.3 Élaboration de critères de 4PS

III.2.3.1 Identification des critères d'évaluation

La modélisation systémique de l'entreprise et de son environnement a mis en évidence les sous-systèmes susceptibles d'être impactés par la mise en place de pratiques de 4PS. Pour pouvoir déterminer les niveaux d'impact, il est nécessaire de les rendre mesurables au regard de critères précis. De plus, ces critères doivent refléter l'exhaustivité des impacts possibles. L'identification des critères de 4PS s'est basée sur :

- ➔ L'utilisation de la grille des « systèmes sources de danger » de la méthode MOSAR. Le Tableau 22 est un extrait de la grille d'identification des critères de 4PS proposé en **ANNEXE 3**. Pour établir cette grille, il a été important d'identifier les conséquences de l'implémentation d'une pratique de 4PS, considérée comme étant l'évènement initial au niveau de chacun des systèmes source de cette grille, sur les sous-systèmes cibles identifiés. Autrement dit, comment les cibles sont-elles impactées positivement et/ou négativement par la mise en œuvre d'une pratique de 4PS au niveau des sources de danger? Par exemple pour les systèmes source de réactions chimiques, la conséquence de la mise en œuvre d'une pratique de 4PS sur le sous-système Écosystème est la diminution de la pollution de l'eau, de l'air et des sols. Deux systèmes source de danger (systèmes sources de danger liés aux rayonnements et de nature biologique) n'ont pas été exploités car ils sont très peu mis en œuvre dans le secteur du traitement de surfaces. Les systèmes sources de danger liés à l'environnement actif naturel (volcanisme, séismes, avalanches, inondations) ou artificiel (barrages, modes de transports) ainsi que les systèmes sources de danger d'origine économique et sociale (migrations, conflits, criminalités) n'ont également pas été étudiés.

Tableau 22: Extrait de la grille d'identification des critères de 4PS par le biais des systèmes sources de danger

Système source de danger lié à une pratique de 4PS	Cibles
B - Systèmes sources de danger d'origine chimique	
B-1 systèmes sources de réactions chimiques	<ul style="list-style-type: none"> • Écosystème (diminution de la pollution de l'eau de l'air et des sols) • Opérateurs (dégagements gazeux, maladies) • Opérations (arrêt de la production,
B-2 systèmes sources d'explosion	<ul style="list-style-type: none"> • Économique (perte des clients) • Écosystème (pollution de l'eau de l'air et des sols) • Opérateurs (accident du travail, maladies) • Opérations (destruction de l'outil de production) • Social (projections, incendie, nuisances sonores) • Stratégie (impact financier)
B-3 systèmes sources de toxicité et d'agressivité	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (intoxication, maladie) • Social (intoxication) • Écosystème (toxicité des rejets dans l'eau et le sol) • Opération (traitement des effluents, corrosion des équipements)
B-4 systèmes sources de pollution et d'odeurs	<ul style="list-style-type: none"> • Social (nuisances olfactives) • Écosystème (pollution de l'eau, de l'air et du sol) • Opération (traitement des effluents) • Opérateurs (nuisances olfactives)
B-5 systèmes source de manque d'oxygène	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (maladie, intoxication)

Ce travail fait émerger les critères de 4PS mais est néanmoins incomplet. En effet la méthode MOSAR évalue uniquement les accidents alors que la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS se veut de prendre également en compte les impacts en fonctionnement normal de l'installation.

- ➔ Afin d'être exhaustif dans la démarche d'identification des critères de 4PS, une analyse fonctionnelle de l'entreprise a été associée à cette étude. La méthode SADT a semblé la plus appropriée pour effectuer cette analyse car elle se base sur une approche systémique et utilise une modélisation graphique par blocs (actigrammes ou datagrammes) qui se révèle facilement compréhensible. Cette représentation de l'entreprise a permis de mieux cerner l'objet complexe que constitue l'entreprise et a ainsi facilité l'identification d'autres critères utiles pour la problématique étudiée. Par exemple, la détoxification qui est une opération très importante dans le traitement de surfaces ne l'est pas forcément dans d'autres secteurs d'activité. L'utilisation de la méthode SADT a notamment permis de faire apparaître ce critère spécifique à ce secteur d'activité.
- ➔ En dernier lieu, pour développer le sous-système stratégie d'entreprise, les auteurs se sont inspirés de la méthode du Balanced Score Card proposée par Kaplan et Norton pour le pilotage des entreprises [KAPLAN *et al.*, 1996].

Toute cette étude a donc abouti à l'identification de quinze critères de 4PS (Tableau 23).

Tableau 23 : Critères de 4PS identifiés

Sous-système	Critère	Commentaire
Social	Population	Ce critère a pour objectif d'évaluer les impacts sur les populations avoisinant l'entreprise : nuisances sonores ou olfactives, risque toxique.
Écosystème	Eau	Le critère eau a pour objectif d'évaluer les impacts relatifs tant à l'utilisation de l'eau, le milieu «eau» étant considéré en tant que ressource, que liés aux rejets dans le milieu aqueux. Dans ce cas de figure le milieu « eau » est un milieu récepteur.
	Air	Bien que le traitement de surface ne soit pas une source importante d'émissions atmosphériques, il convient néanmoins de surveiller les émissions locales [BREF STM, 2005]. Le critère air vise donc l'évaluation des impacts sur le milieu récepteur « air ».
	Sol	Le critère sol concerne le milieu récepteur «sol». La pollution des sols est essentiellement due aux écoulements, fuites et débordements accidentels.
Économique	Client	Le sous-système économique concerne les partenaires financiers et économiques de l'entreprise : les clients. En effet l'introduction de nouvelles pratiques peut générer un gain de clientèle. Aucun autre critère n'a été jugé pertinent pour ce sous-système car il n'a pas été établi de lien direct entre l'introduction d'une pratique de production plus propre et plus sûre et un impact sur les fournisseurs, les banques ou encore les assureurs.
Opérateurs	Sécurité	Ce critère évalue le niveau de risque pour les opérateurs.
	Environnement de travail	Ce critère concerne les impacts relatifs au bien être de l'opérateur à son poste de travail. Il s'intéresse par conséquent aux nuisances générées par l'outil de production.
Opérations	Production	Le critère production englobe tous les impacts relatifs au fonctionnement du système de production
	Entretien	Le critère entretien permet d'estimer les impacts sur les opérations de maintenance de l'appareil de production ainsi que de l'ensemble de l'installation
	Approvisionnement	La production plus propre se veut plus économe en matière première et en énergie. Par conséquent le critère approvisionnement est utile à la mesure

		de ces effets.
	Détoxification	La détoxification, très spécifique au secteur du traitement de surfaces concerne les opérations de traitement des effluents aqueux et gazeux et des déchets. Le critère détoxification traduit les impacts sur la station de détoxification provenant de la modification des caractéristiques de l'effluent à traiter.
Stratégie d'entreprise	Perspective Financière	Ce critère traduit les performances de l'entreprise en termes financiers. En effet l'un des objectifs visé par ce projet est l'évaluation et la maîtrise des impacts financiers liés aux pratiques de 4PS.
	Perspective Client	La perspective client évalue la performance de l'entreprise quant au respect des attentes du client. Ce critère est donc très lié au respect du cahier des charges. En effet les caractéristiques et la qualité du produit risquent d'évoluer lors de la mise en place d'une pratique de 4PS.
	Perspective Organisationnelle	Ce critère concerne les performances en matière d'organisation. Il est donc très lié à l'aspect ressources humaines de l'entreprise (compétence des individus, motivation, capacité à innover...). Critère est très pertinent puisque l'introduction d'une technologie propre peut par exemple nécessiter l'embauche d'un opérateur qualifié.
	Processus Internes	Ce critère concerne les impacts sur l'enchaînement des activités réalisées en interne depuis la réception des commandes à la livraison du produit.

III.2.3.2 Application de la MHM pour la pondération des critères de 4PS

Le paragraphe précédent a permis d'élaborer un ensemble de quinze critères. Or tous ces critères ne sont pas équivalents. Autrement dit, ils n'ont pas la même importance les uns vis à vis des autres dans le cadre de l'évaluation des impacts des pratiques de 4PS. C'est pourquoi il a été nécessaire de les pondérer. Il est indispensable que l'attribution de ces poids se fasse de manière objective et correspondent précisément à l'avis des professionnels/experts du traitement de surface, afin que l'outil issu de ces travaux de recherche soit correctement adapté à ce secteur particulier. Pour ce faire, la méthode hiérarchique multicritère (MHM) a été retenue après une étude bibliographique des méthodes d'analyse multicritère existantes (cf. §II 4.3.2) [SAATY, 1984]. Le choix de cette méthode a été motivé par sa simplicité de compréhension auprès des différents experts. De plus il est plus aisé pour ces derniers d'attribuer des notes aux critères en les comparant deux à deux. Comme il a été décrit dans le paragraphe IV.3.2 de la partie II, cette méthode se déroule en trois étapes.

III.2.3.2.1 Étape 1 : Construction des hiérarchies.

La première étape de structuration hiérarchique a été réalisée en se basant sur la décomposition systémique de l'entreprise ainsi que sur les critères de 4PS retenus. Cette structuration hiérarchique est présentée dans la Figure 35.

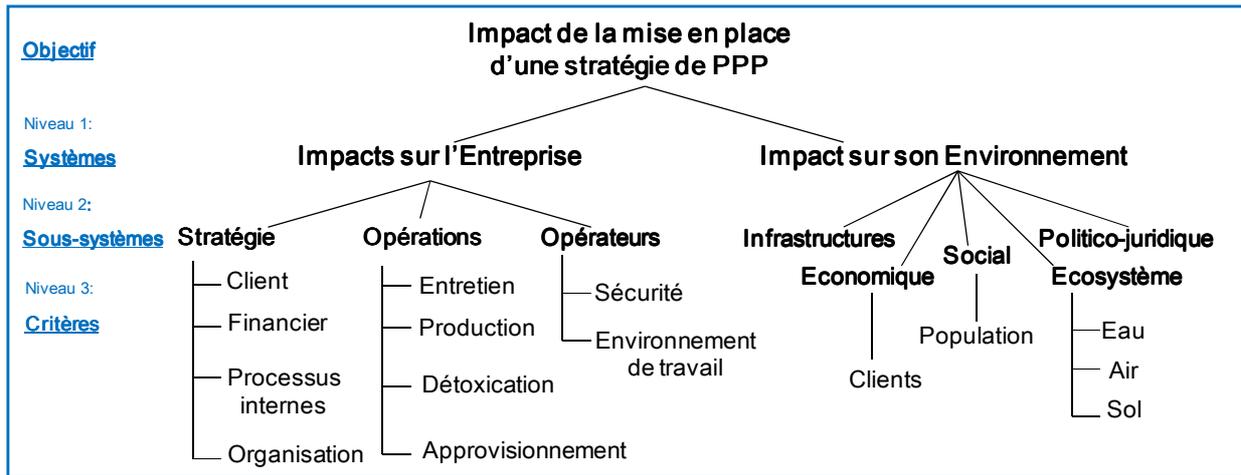


Figure 35: Décomposition en structure hiérarchique de notre système

III.2.3.2.2 Étape 2 : Établissement des priorités.

Pour l'établissement des priorités il a été nécessaire de consulter les différents acteurs du secteur du traitement de surface pour obtenir leurs expertises dans le domaine. Celles-ci étant diverses et variées, il devient alors indispensable d'avoir recours à l'agrégation de l'expertise. L'agrégation de l'expertise permet de fusionner de façon cohérente les réponses des experts dans le but d'obtenir finalement un consensus général sur le problème étudié. Il existe deux méthodes d'agrégation :

- soit les experts consultés sont regroupés, et leurs appréciations sont discutées jusqu'à l'obtention d'une distribution finale consensuelle, et représentative de l'ensemble de leur connaissances (Un seul questionnaire complété par l'ensemble du groupe d'experts) [LANNON *et al.*, 2001]. L'avantage de cette solution est l'obtention d'un consensus sur l'ensemble des appréciations. En revanche ces appréciations peuvent être influencées par les avis des experts qui, au vu de leur expérience, prennent le dessus sur les autres experts [TIXIER, 2002].

- soit chaque expert est consulté indépendamment, et les opinions recueillies sont assemblées à l'aide d'une approche mathématique (méthode mécanique ou statistique). Cette agrégation peut se faire en réalisant une moyenne, une moyenne géométrique, ou encore une fusion pondérée de type bayésien [TIXIER, 2002] [SAATY, 1984]. Si l'agrégation mécanique s'avère plus fastidieuse, cette méthode a néanmoins l'avantage de permettre le recueil d'un plus grand nombre d'avis d'experts. En effet plus le nombre d'experts consultés est important, plus les résultats sont valides [TIXIER, 2002].

Cette seconde méthode a été retenue pour l'attribution des poids aux différents critères. Pour ce faire, un questionnaire a été envoyé à une vingtaine d'experts (Industriels du traitement de surface, Inspecteur de DRIRE, Chercheurs...). Ce questionnaire est présenté en ANNEXE 4. Dix questionnaires remplis ont été retournés par 2 inspecteurs de la DRIRE, 1 chargé de mission dans une agence de l'eau, 1 ingénieur de l'INERIS, 3 enseignants-chercheurs dans le domaine, et 4 ingénieurs / responsables d'ateliers de traitement de surfaces. L'agrégation de l'expertise a donc été calculée à partir de l'appréciation des experts avec une moyenne géométrique :

$$M = \left[\prod_{i=1}^n x_i \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{(Équation 9)}$$

avec x_i : note
 n: nombre de notes

Toutefois, il convient de rester prudent quant aux résultats obtenus par le biais de cette enquête au vu de la faible représentativité de l'échantillonnage.

Nous présentons ci-dessous un exemple de calcul de ces priorités relatives pour le sous-système opérations. Le Tableau 24 présente les avis donnés par chaque expert pour le critère approvisionnement vis-à-vis du critère production. Par exemple 3 experts considèrent que l'approvisionnement est « un peu moins important que la production ».

Tableau 24: Avis des experts pour le critère approvisionnement vis-à-vis du critère production

Note	Approvisionnement / production	
Absolument moins important	1/9	
Beaucoup moins important	1/7	
Moins important	1/5	1
Un peu moins important	1/3	3
Égale	1	5
Un peu plus important	3	1
Plus important	5	
Beaucoup plus important	7	
Absolument plus important	9	
Total		10

Le calcul de la note moyenne pour l'approvisionnement vis-à-vis de la production est le suivant :

$$M_{\frac{A}{P}} = \left[\left(\frac{1}{5}\right) \times \left(\frac{1}{3}\right)^3 \times 1^5 \times 3 \right]^{\frac{1}{10}} = 0,68$$

Cela signifie qu'en moyenne, les experts ont estimé l'approvisionnement légèrement moins important que la production. Le même calcul pour l'ensemble des critères du sous système considéré permet d'établir le Tableau 25:

Tableau 25:Exemple de calcul des vecteurs de priorités VP pour le critère opérations

OPERATIONS	Matrice initiale				Matrice normalisée				Somme des rangs	Vecteur de priorité
	A	P	E	D	A	P	E	D		
Approvisionnement A	1,00	0,68	1,31	0,81	0,22	0,25	0,23	0,17	0,88	0,22
Production P	1,47	1,00	2,51	1,63	0,33	0,37	0,45	0,35	1,49	0,37
Entretien E	0,77	0,40	1,00	1,27	0,17	0,15	0,18	0,27	0,77	0,19
Détoxication D	1,23	0,61	0,78	1,00	0,28	0,23	0,14	0,21	0,86	0,21
Somme	4,46	2,69	5,60	4,72	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00

Les résultats du calcul des vecteurs de priorité sont présentés ci-dessous (Figure 36):

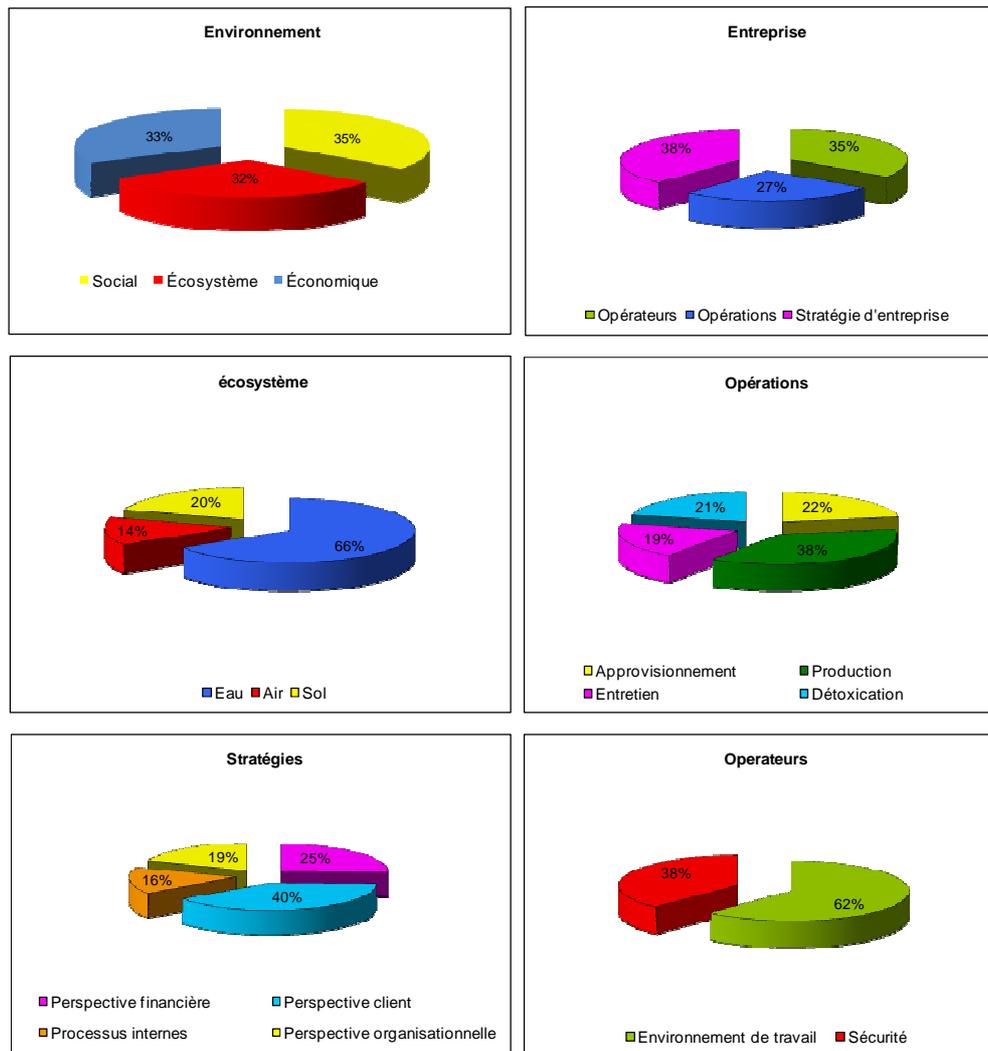


Figure 36: Priorités relatives attribuées aux sous-systèmes et critères de 4PS

- L'**environnement** de l'entreprise est composé d'un sous-système économique, social, politico-juridique, technique et naturel (écosystème). Les résultats de la pondération des critères montrent que les trois principaux environnements dont se préoccupent plus les experts du traitement de surface sont l'environnement économique, social et l'écosystème ayant chacun un poids d'environ 0,25. Ces résultats confirment, la validité de notre modèle systémique. En effet l'impact d'une pratique de production plus propre et plus sûre sur l'environnement technique et politico-juridique avait été considéré comme moins important que ceux sur l'environnement économique, social et l'écosystème. Ces deux sous-systèmes ne seront donc par la suite plus pris en compte.
- Au niveau du système cible « **entreprise** » une répartition à peu près équitable est observée entre les sous-systèmes opérateurs, opérations et stratégie d'entreprise.
- L'analyse des résultats pour le sous-système cible « **écosystème** », montre une nette prépondérance du milieu eau vis-à-vis des milieux air et sol. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que :
- L'un des principaux objectifs visés par l'industrie du traitement de surfaces est la réduction de la consommation d'eau [LAFORST, 1999]. En effet les ateliers de traitement de surfaces consomment une grande quantité d'eau et cela se traduit par la production d'une grande quantité d'effluents : « *l'eau est la matière première pour la*

constitution des bains de prétraitement, de traitement et de finition. C'est aussi l'élément incontournable pour le rinçage » [RENAUDAT, 2000].

- De plus l'eau est considérée comme un vecteur de pollution souvent responsable du transfert de pollution d'un milieu à l'autre.
- En ce qui concerne les **opérations** de l'entreprise, il y a une répartition assez équitable entre les critères, bien que les opérations de production aient un poids légèrement supérieur. Cela nous paraît plutôt normal puisqu'il s'agit de la fonction première d'une entreprise.
- La **stratégie** d'entreprise est définie par des objectifs suivant 4 axes principaux (financier, client, organisationnel, et processus internes). À la vue de ces résultats, la perspective « client » est prépondérante aux autres. Ce résultat va un peu à l'encontre du processus de la méthode du Balanced ScoreCard utilisée pour l'identification de ces critères. En effet cette méthode présentait l'axe financier comme la finalité de l'entreprise, axe pour lequel, les 3 autres devaient se développer.
- Enfin au niveau des **opérateurs**, les conditions de travail sont nettement plus importantes que l'hygiène et la sécurité. Ce résultat est probablement dû au fait que les experts interrogés viennent essentiellement de petites et moyennes entreprises (PME). En effet dans ces entreprises, qui constituent une majorité des entreprises de traitement de surface françaises, il y a un manque de reconnaissance de l'objet « sécurité ». Pour reprendre Favaro (1999), «*le risque d'accident, de maladie professionnelle fait définitivement « partie du métier »* » [FAVARO, 1999].

III.2.3.2.3 Étape 3 : Établissement de la cohérence logique.

La dernière étape de la Méthode Hiérarchique Multicritère établit de la cohérence des jugements, notamment en calculant un indice de cohérence I_C (Tableau 26).

Tableau 26 : Exemple de calcul de l'indice de cohérence pour le critère opérations

OPÉRATIONS	Matrice initiale				VP	Colonne * VP				Somme des lignes	Ligne / VP	λ_{\max}	I_C
	A	P	E	D		A*VP	P*VP	E*VP	D*VP				
Approvisionnement A	1,00	0,68	1,31	0,81	0,22	0,22	0,25	0,25	0,17	0,89	4,07	4,07	0,02
Production P	1,47	1,00	2,51	1,63	0,37	0,32	0,37	0,48	0,34	1,52	4,09		
Entretien E	0,77	0,40	1,00	1,27	0,19	0,16	0,14	0,19	0,27	0,78	4,07		
Détoxication D	1,23	0,61	0,78	1,00	0,21	0,27	0,22	0,15	0,21	0,86	4,04		
Somme	4,46	2,69	5,60	4,72	1,00								

Le calcul des indices de cohérence pour chacun des sous-systèmes a permis d'établir que les jugements d'attribution des poids étaient cohérents (Tableau 27). En effet tous les indices de cohérence calculés avaient une valeur inférieure à 10%. Les poids calculés au niveau des critères et sous-systèmes de 4PS ont donc été utilisés pour la suite de ce travail.

Tableau 27 : Indices de cohérence des jugements

Sous-système ou critère considéré	Indice de cohérence I_C
Entreprise	6.10^{-3}

Environnement de l'entreprise	17.10^{-3}
Opérateurs	0
Opérations	20.10^{-3}
Stratégie	11.10^{-3}
Écosystème	$0,06.10^{-3}$

III.2.4 Synthèse sur la structuration des critères

La première section de ce chapitre concernant les réflexions préliminaires a tout d'abord permis de :

- positionner les objectifs et contraintes de l'évaluation,
- déterminer la démarche de construction de la méthode d'évaluation des impacts. Cette démarche procède par une approche top-down

La modélisation systémique de l'entreprise présentée dans ce chapitre, avait pour but de fournir une représentation « simple » de l'entreprise afin d'évaluer les impacts de la mise en place d'une stratégie de production plus propre plus sûre (4PS), sur chaque entité de l'entreprise et sur son environnement. Cette action a conduit à une décomposition systémique de l'entreprise et de son environnement basée sur le modèle MADS :

- Au niveau du système Entreprise les sous-systèmes cibles identifiées sont les opérateurs, les opérations, et la stratégie.
- L'environnement de l'entreprise potentiellement impacté par une pratique de 4PS englobe la société civile (sous-système social), l'écosystème, et le sous-système économique.

Cette décomposition systémique a permis l'identification de 15 critères de production plus propre et plus sûre vis-à-vis desquels sont évalués les impacts des pratiques de 4PS (

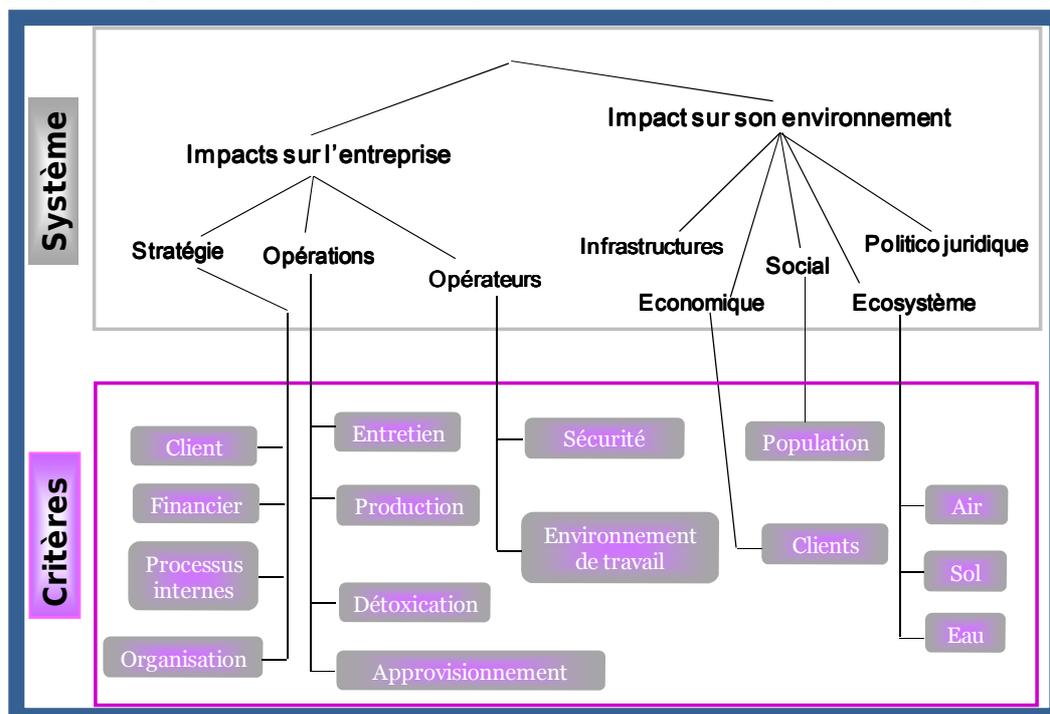


Figure 37).

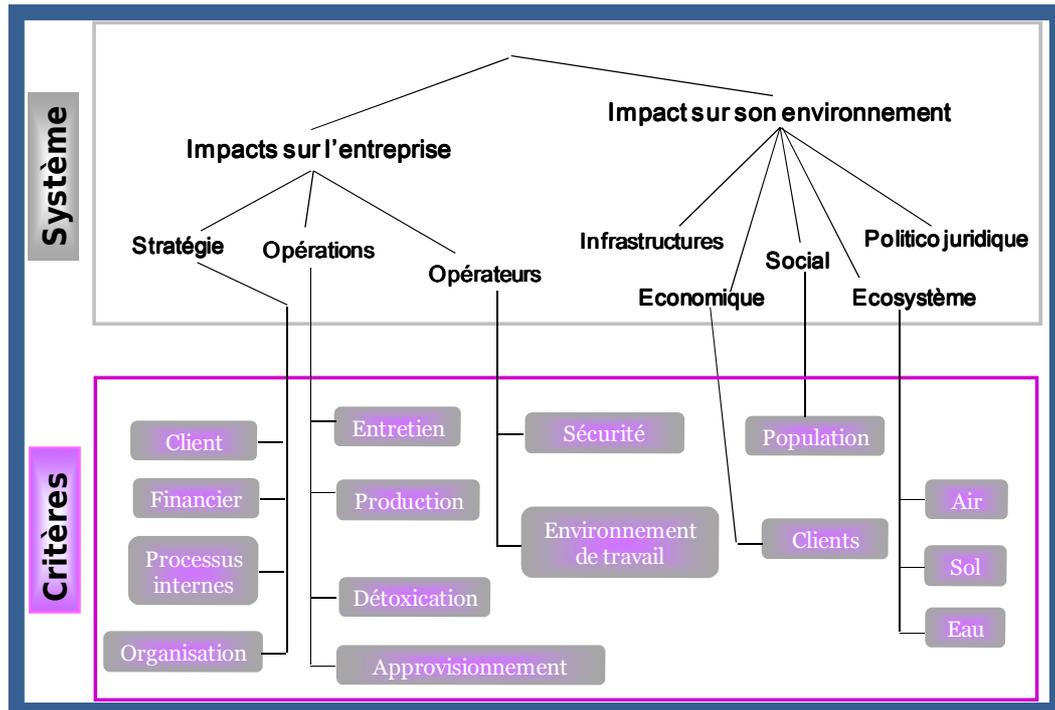


Figure 37: Structure de la méthode d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS au niveau des critères

Les quinze critères identifiés ont alors été pondérés par le biais d'un jugement d'experts et de la MHM. Les différentes priorités relatives attribuées aux critères permettent de juger de leur importance afin d'en tenir compte pour l'évaluation des impacts des pratiques de 4PS. Enfin il a été montré la cohérence dans les jugements exprimés par le calcul de l'indice I_C .

Comme il a été précédemment dit, les critères de production plus propre et plus sûre qui viennent d'être élaborés seront employés dans les deux méthodes de la méthodologie. La méthode de diagnostic fait l'objet du chapitre suivant.

III.3 ... À la méthode de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS

La méthode de diagnostic des impacts est basée sur des indicateurs permettant d'alimenter les 15 critères de 4PS identifiés au paragraphe précédent.

III.3.1 Recherche d'indicateurs de 4PS

La recherche d'indicateurs vise à recenser parmi les indicateurs existants, ceux qui sont potentiellement utilisables pour évaluer les impacts de pratiques de 4PS sur l'ensemble des critères précédemment définis. Les indicateurs de production plus propre et plus sûre sont a priori non existants de façon aisément identifiable et structurés dans la littérature. Il existe cependant d'autres indicateurs, tels que les indicateurs de développement durable, indicateurs de performance environnementale, d'éco-efficience, et de sécurité qui peuvent contribuer à l'évaluation de la production plus propre et plus sûre [DROGOUL, 2006].

Cette recherche s'est appuyée sur une recherche bibliographique, des visites de sites et des études de cas. Nous décrivons ici la méthode de recherche et quelques indicateurs ainsi obtenus à titre d'exemple.

III.3.1.1 Étude bibliographique

Divers documents de la littérature ont été consultés. Le Tableau 28 présente quelques exemples d'indicateurs identifiés:

Tableau 28: Exemple d'indicateurs identifiés en fonction des sources

Source	Référence	Indicateurs identifiés dans la source
Étude d'impact	[BOURGUIGNON <i>et al.</i> , 2007] [QUÉRÉ <i>et al.</i> , 2007]	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de polluants dans le sol • Charge hydraulique (volume d'eaux usées/jour) • Charge polluante (volume*DBO₅/jour) • Consommation annuelle en eau (m³) • Indices ATMO et IQA (qualité de l'air) • Nuisance dues au trafic des camions ? • Niveau sonore (dBA) • Consommation en matières premières • Consommation électrique
Étude déchets	[BOURGUIGNON <i>et al.</i> , 2007] [QUÉRÉ <i>et al.</i> , 2007]	<ul style="list-style-type: none"> • Quantité annuelle de DIB • Coût annuel de traitement des déchets • Consommation en réactifs • Niveau de gestion des déchets ?
Document unique	[SFTS, 2006]	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de formation des employés à la sécurité • Respect du port des EPI • Formation à la manipulation des appareils • État de la signalisation (issue de secours) • Étiquetage des produits et des cuves+risque
Arrêté 30/06/2006	[Loi 2006, 2006][Loi 1985, 1985]	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation spécifique • Taux de conformité des rejets
Norme ISO 14001	[ISO 14001, 2004][PERSONNE, 1998]	<ul style="list-style-type: none"> • Quantité de matière première et d'énergie utilisée • efficacité dans l'utilisation des matières premières et de l'énergie • pourcentage de déchets recyclés

		<ul style="list-style-type: none"> • pourcentage de matériaux recyclés utilisés dans les emballages • nombre de poursuites judiciaires
Norme ISO 9001	[ISO 9001, 2008]	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de conformité des produits • Satisfaction du client
Balanced Score Card	[BERRAH, 2002] [LACOSTE, 2003] [REYNE, 1991]	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de croissance des ventes • Chiffre d'affaires/ employé • Taux de satisfaction du client • Investissement moyen annuel • Taux de satisfaction des employés
Pression-État-Réponse	[PERSONNE, 1998]	<ul style="list-style-type: none"> • Tonnage de solvant émis • Tonnage DIB • Concentration en DBO, DCO, MES des rejets • Consommation en eau • Consommation en énergie • Niveau de bruit • Coût des investissements environnementaux
Accident technologique	[Le Progrès, 2007] [BARPI, 2007]	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de formation des employés aux états d'urgence • Fiabilité des employés • Taux de mortalité piscicole • Matières dangereuses relâchées • Taux de conformité dans le repérage des cuves • Taux de polluant dans le sol et dans les légumes

III.3.1.2 Visites sur site et études de cas

Pour compléter cette recherche, des visites d'ateliers de traitement de surfaces et des entretiens avec les industriels du secteur ont été indispensables. L'objectif de ces entretiens est de caractériser les indicateurs plus spécifiques au secteur du traitement de surfaces sur certains critères. Par exemple, pour le critère « entretien » des indicateurs comme la « fréquence de vidange des bains » sont plus spécifiques au métier.

D'autre part le suivi de cas d'études a permis de consolider la base d'indicateurs (Tableau 29).

Tableau 29: Identification d'indicateurs à partir du cas d'étude « remplacement de la passivation au chrome VI par une passivation au chrome III »

Observation / Remarques	Impact	Indicateur
Revêtement de zinc attaqué Voilage des pièces	Produit fabriqué Client Image de l'entreprise	Tenue en Brouillard Salin en heures Taux de plainte des clients
Augmentation du taux de chrome en sortie de station de traitement	Impact environnemental Impact sur les opérations de détoxification	Charge toxique et métallique rejetée dans l'eau pH des effluents à traiter Consommation de réactifs
Augmentation de la maintenance du bain	Sur les opérateurs	Fréquence de maintenance du bain
Le chrome III est moins toxique que le chrome VI	Sur les opérateurs Image de l'entreprise	Niveau global de risque
Prix du produit pour le revêtement au Cr III plus cher que pour Cr VI Maintenance des bains plus importante Diminution de la quantité de Bisulfite nécessaire à neutralisation du Cr VI	Impact financier	Prix des produits utilisés Quantité de matière 1 ^{ère} par unité de production (masse) Chiffre d'affaire par unité de production Consommation de réactifs

Ce travail a permis de déterminer les indicateurs potentiellement utilisables dans la méthode de diagnostic. Près de 200 indicateurs potentiels ont été listés, et sont présentés en **ANNEXE 5**.

III.3.1.3 Sélection des indicateurs

La sélection des indicateurs est l'une des étapes majeure de l'élaboration du système d'indicateurs puisqu'elle assure « *la pertinence de l'évaluation et la qualité des décisions qui pourront être prises* » [GIRARDIN *et al.*, 2005]. Notre objectif est donc de ne retenir que les indicateurs les plus pertinents pour l'évaluation. Cette phase est assez délicate puisque : « *Les indicateurs fournissent une vue simplifiée de la réalité, censée refléter des phénomènes souvent complexes ou diffus* » [TYTECA, 2002]. Le nombre d'indicateurs choisi doit être optimisé. Pour cela, la sélection des indicateurs a été réalisée en plusieurs étapes :

- Un tri préliminaire permet d'éliminer les indicateurs peu ou mal renseignés, ou encore les indicateurs trop vagues:
- Absence de définition claire de l'indicateur.
- Indicateurs agrégés qui n'ont pas une signification réelle sur le terrain.
- Subjectivité de l'indicateur.

Cette étape a permis d'éliminer une soixantaine d'indicateurs. Néanmoins le nombre d'indicateurs restant étant encore trop important (≈ 140), une méthode de sélection multicritère a donc été initiée. Elle est décrite dans le paragraphe suivant.

La sélection multicritère des indicateurs a été réalisée en utilisant une grille d'évaluation des indicateurs. L'étude de la littérature [PERSONNE, 1998], [DESTHIEUX, 2005] [TYTECA, 2002], a permis non seulement d'identifier les critères de sélection d'un bon indicateur mais également de qualifier leur importance. Ainsi, une grille de notation des critères de choix d'indicateurs pertinents a été réalisée à partir de leur récurrence dans la littérature : plus le critère est cité plus la note attribuée sur une échelle de 1 à 10 est élevée (Tableau 30).

Tableau 30: Grille de notation des critères de sélection d'indicateurs pertinents

Critère	Sous-critère	Abréviation	Note
Pertinence	Pertinence/besoin	B	9
	Comparabilité	Cé	8
	Compréhension	Cn	9
	Consensus	Cs	2
	Tendance	T	8
Justesse d'analyse	Représentativité	R	10
	Objectivité	O	7
	Référentiel	Rèf	3
	Univocité	U	2
Données	Fiabilité	F	4
	Mesurabilité	M	8
	Précision	P	3
	Sensibilité	S	3

Le Tableau 30 montre que les critères essentiels (les plus récurrents dans la littérature) pour la sélection d'un indicateur pertinent sont :

- Sa capacité à décrire fidèlement et synthétiquement le phénomène à étudié (*représentativité*).

- Sa capacité à communiquer l'information répondant à un besoin (*pertinence*) de façon compréhensible (*compréhension*) pour un public général ou spécialisé. En effet, si l'indicateur ne répond à aucun besoin, quel en est l'intérêt ? De même un indicateur incapable de transmettre une information compréhensible échoue dans son rôle d'indicateur.
- L'accessibilité aux données qui permettent de le calculer (*mesurabilité*), de le comparer à l'objectif auquel il est lié (*comparabilité*), et d'indiquer les progrès réalisés pour l'atteindre (*tendance*).

L'ensemble des indicateurs identifiés a été passé au crible en utilisant cette grille de pondération. Pour cela, une matrice contenant les indicateurs en ligne et les critères de sélection en colonne a été construite (**ANNEXE 6**). Le Tableau 31 est un extrait de cette matrice.

À l'intersection d'une ligne et d'une colonne, une croix a été affectée aux indicateurs répondant au critère de sélection concerné. Ainsi pour chaque indicateur, une note globale de pertinence a été calculée en faisant le rapport de la somme des poids des critères auxquels l'indicateur répond par la somme des poids de l'ensemble des critères.

Par exemple l'indicateur « besoin d'anticipation » répond uniquement aux critères représentativité et univocité, ce qui équivaut à une note de 1,2. En divisant cette note par la somme totale des notes des critères, l'indicateur « besoin d'anticipation » obtient une pertinence de 16%. Par la suite, seuls les indicateurs ayant obtenus une note supérieure ou égale à 75% ont été retenus. Ce seuil minimal de 75% a été attribué de manière purement intuitive.

Tableau 31: Extrait de la matrice de sélection des indicateurs par criblage

Indicateur	Note globale	Pertinence					Justesse d'analyse				Données			
		B	Cé	Cn	Cs	T	R	O	Réf	U	F	M	P	S
	75	9	8	9	2	8	1	7	3	2	4	7	3	3
1. Besoin d'anticipation	16%						x			x				
2. Caractéristiques anticorrosion	96%	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
3. Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée	88%	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x
4. Consommation brute d'énergie	66%	x	x	x				x			x	x	x	x
5. Consommation brute de matière première	66%	x	x	x				x			x	x	x	x
6. Consommation de matières recyclées	92%	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	
7. Débit de l'effluent à traiter	75%	x		x	x		x	x	x		x	x	x	x
8. Débit total des rejets	92%	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	
9. Durée moyenne de dépannage	40%			x				x			x	x	x	
10. Émission de substances appauvrissant la couche d'ozone	59%		x	x		x	x	x		x				
11. Niveau global de risque (NGR)	76%	x	x	x	x		x	x		x		x	x	
12. Nombre de brûlures thermiques	56%	x		x			x				x	x	x	

À la suite de cette sélection multicritère, le nombre d'indicateur potentiellement utilisables pour l'évaluation des impacts liés aux pratiques de 4PS a été réduit de moitié (≈ 70).

Une troisième étape de vérification / validation a été réalisée. Elle a permis d'une part de confirmer l'élimination des indicateurs n'ayant pas passé l'étape de tri multicritère. D'autre part, elle a permis d'exclure parmi les indicateurs retenus, les redondances. Par conséquent les indicateurs redondant, bien qu'ayant des libellés différents, ont soit une définition similaire, soit évaluent le même phénomène, ou encore sont englobés par un autre indicateur. Cette étape

de validation s'est faite de manière concertée. Ce travail de tri et de validation permet de retenir 42 indicateurs parmi les 197 initialement identifiés.

III.3.2 Utilisation de l'analyse structurelle pour identifier les relations d'influence entre les indicateurs

L'utilisation de l'analyse structurelle, en particulier de la méthode MICMAC décrite dans la partie II de ce mémoire (cf. § II.3.3), permet de déterminer l'indépendance des indicateurs vis-à-vis du système d'indicateur. En d'autres termes, les résultats obtenus doivent faire ressortir les indicateurs jouant un rôle prépondérant au sein du système d'indicateurs. De plus cette analyse permet de vérifier la stabilité du système d'indicateurs afin qu'une faible variation de l'un d'entre eux n'entraîne pas une réponse trop importante de l'ensemble du système.

L'analyse structurelle se déroule en trois étapes :

- La première étape consiste au recensement des variables sur lesquelles va se porter l'analyse. Elle correspond donc aux étapes de recherche et de sélection d'indicateurs de 4PS présentées dans les paragraphes précédents.
- La seconde étape est l'élaboration d'une matrice des influences directes (MID) permettant de décrire l'influence directe des indicateurs les uns par rapport aux autres.
- Enfin l'établissement de plusieurs classements (directs, indirects et potentiels) va permettre d'identifier les indicateurs clefs sur les plans d'influence.

Intéressons nous en premier lieu à l'élaboration de la MID.

III.3.2.1 Élaboration de la matrice des influences directes

Dans cette matrice sont listés à la fois en ligne et en colonne 42 indicateurs de 4PS. Ceux-ci sont alors comparés un à un. Cela correspond au remplissage de 1764 cases soit 5292 questions. Ce remplissage a donc nécessité plusieurs journées de brainstorming. Trois personnes ont participé à la construction de cette matrice en premier lieu de manière individuelle puis en groupe dans le but d'expliquer les différences de point de vue. Pour la majeure partie ces divergences portaient sur l'intensité de la relation (entre faible et moyen par exemple) plutôt que sur l'existence ou non de cette relation. Le Tableau 32 suivant est un extrait de la matrice finale obtenue à la suite de ce travail de groupe.

Tableau 32: Extrait de la matrice finale obtenue

	NS	pH	T	Cx	Q	IE	E
NS		0	0	0	0	0	0
pH	0		0	0	0	0	0
T	0	0		0	0	3	0
Cx	0	3	0		0	0	0
Q	0	4	0	0		0	0
IE	0	0	0	0	0		0
e	0	2	2	3	3	0	

Les influences sont notées de 0 à 3 :

0 : Pas d'influence

1 : Faible

2 : Moyenne

3 : Forte

4 : Potentielle

NS : Niveau Sonore ; pH : pH dans les rejets ; T : Température dans les rejets ; Cx : charge toxique et polluante dans les rejets ; Q : Consommation spécifique ; IE : Intensité Énergétique ; e : Entraînement.

Le logiciel MICMAC utilisé permet alors de faire le cumul des lignes puis des colonnes, afin d'identifier les variables clefs. Rappelons que le total des liaisons en ligne indique l'importance de l'influence d'une variable tandis que le total en colonne indique son degré de dépendance. Les résultats sont alors représentés sur un plan des influences/dépendances directes.

III.3.2.2 Analyse des plans d'influence

La Figure 38 présente l'influence et la dépendance directe des indicateurs de production plus propre et plus sûre retenus.

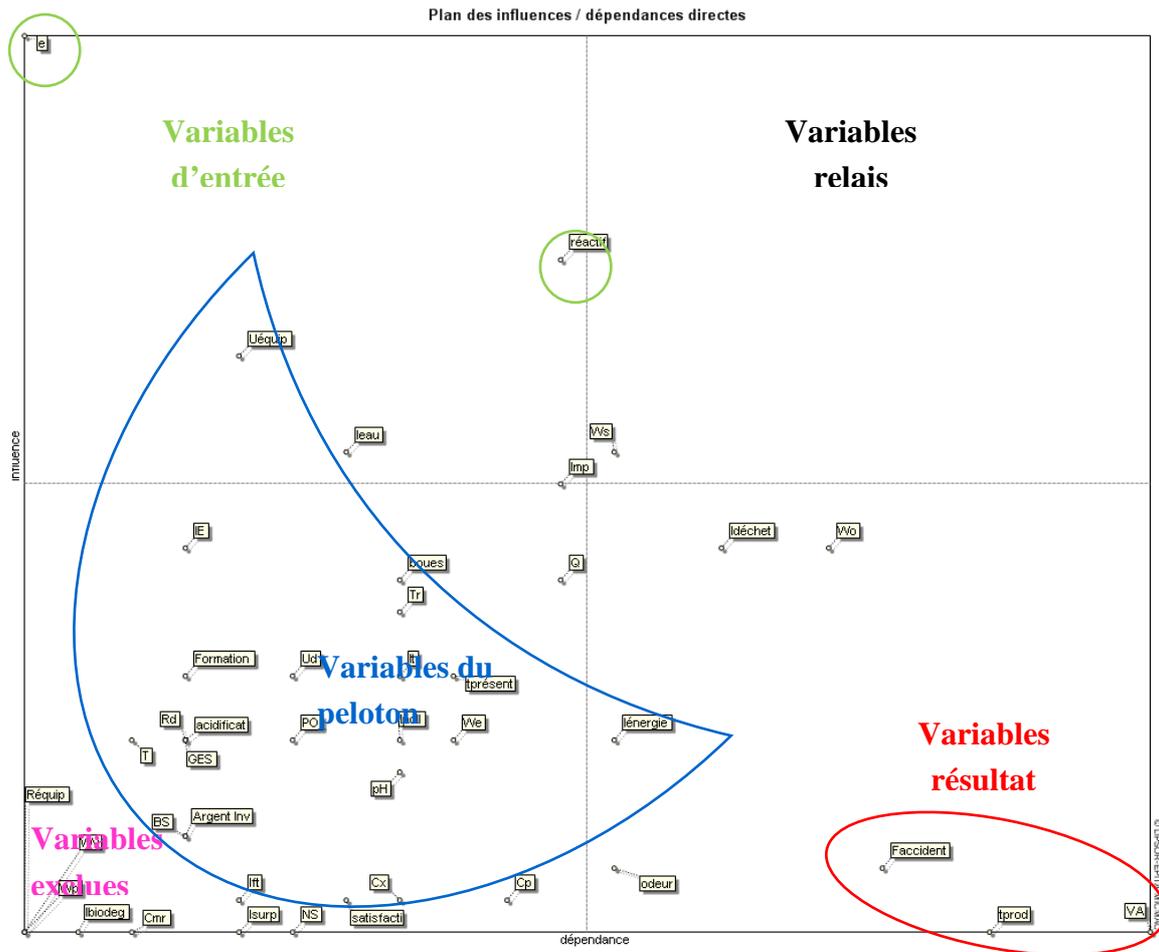


Figure 38: Plan des influences/dépendances directes des indicateurs de production plus propre et plus sûre

Le premier constat que l'on peut faire à la vue des résultats de l'analyse est celui de la stabilité du système d'indicateurs de 4PS. Les indicateurs sont majoritairement des variables du peloton, ce qui signifie qu'ils sont peu dépendants et peu influents. De plus, peu d'indicateurs se retrouvent dans la zone des variables relais, c'est-à-dire à la fois très influents et très dépendants. Une faible variation de ce type d'indicateurs, entraînerait une forte réponse du système ce qui n'est pas souhaitable.

Les indicateurs situés en haut à gauche tels que « l'entraînement (e) » et « la quantité de réactifs utilisés en station de traitement (réactif) » sont très influents. Ces premiers résultats expriment clairement l'importance de « l'entraînement (e) » dans le système d'indicateurs. Rappelons en effet que l'entraînement constitue le principal vecteur de pollution dans une chaîne de traitement de surfaces et a pour conséquence directe une pollution du bain suivant ce

qui conduit à une augmentation du bilan de pollution, de la consommation d'eau et de matières premières [LAFORREST, 1999].

D'autres indicateurs situés en bas à droite sont très dépendants des autres indicateurs : « la valeur ajoutée (VA) », « le taux de productivité apparente du travail (t_{prod}) », ou encore « la fréquence des accidents du travail ($F_{accident}$) ». L'objectif du chef d'entreprise, et c'est le propre de toute activité économique, est d'augmenter sa valeur ajoutée, et son taux de productivité. Par conséquent ces indicateurs constituent la finalité de l'entreprise. Il est donc évident que cette finalité ne peut être atteinte qu'en s'appuyant sur l'ensemble du « système entreprise » ce qui justifie cette dépendance.

Si l'on s'intéresse à l'indicateur « fréquence des accidents du travail ($F_{accident}$) » sa dépendance constatée vis-à-vis du système d'indicateur peut être expliquée par la multiplicité des causes de survenue d'un accident. Selon Leblanc (2005), un accident est souvent la conséquence d'un ensemble de dysfonctionnements pouvant interférer à différents niveaux d'intervention à l'intérieur de l'entreprise. Il peut s'agir de l'organisation générale du travail (horaires et rythmes de travail, contraintes de temps, flexibilité, manque de personnel), des conditions de sécurité (formation, respect des consignes, protections adéquates), de la conception du poste de travail (postures pénibles, déplacements fréquents, bruit, aération), des critères de performance (exigence qualité, réduction des délais et des coûts), ou encore des relations de travail (stress, degré d'autonomie, divergences, moyens insuffisants) [LEBLANC, 2005]. La dépendance de cet indicateur apparait cohérente.

L'influence indirecte est atteinte par le passage à la puissance 2 de la matrice des influences directes. La Figure 39 présente le plan des influences et dépendances indirectes des indicateurs de production plus propre et plus sûre retenus vis-à-vis du système d'indicateurs.

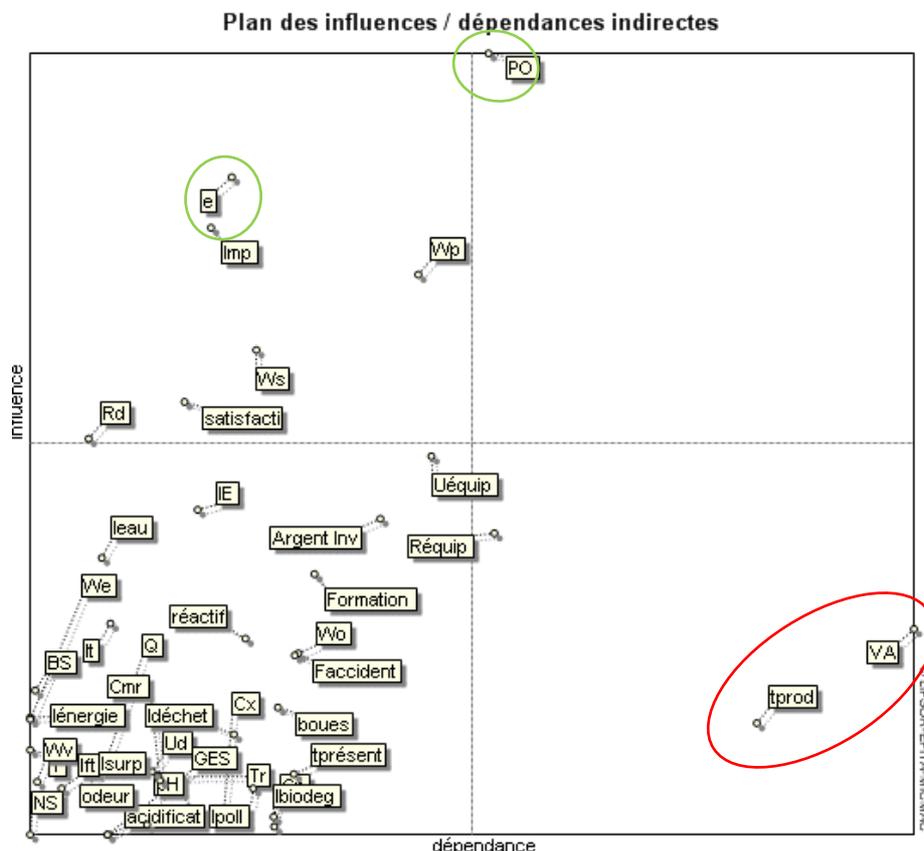


Figure 39: Plan des influences/dépendances indirectes du système d'indicateurs de 4PS

En établissant le plan d'influence/dépendance indirect, une modification de la répartition des indicateurs sur le graphique est observée. Un regroupement des indicateurs en bas à gauche de la figure confirme la stabilité du système d'indicateurs.

La comparaison des résultats des différents classements (direct, indirect et potentiel²⁰) permet de confirmer l'importance de certaines variables comme « l'entraînement (e) », la « valeur ajoutée (VA) » ou encore le « taux de productivité (t_{prod}) » mais également d'en dévoiler d'autres, qui peuvent jouer un rôle prépondérant en tenant compte des effets indirects. Par exemple, l'indicateur « productivité opérationnelle (PO) » influe peu de manière directe sur les autres indicateurs, mais a néanmoins un impact non négligeable sur le système d'indicateurs si l'on tient compte des effets indirects (Tableau 33).

Cette importance de la productivité opérationnelle est clairement établie par Zarifian (1990) dans son ouvrage *La nouvelle productivité, « les liaisons et les interdépendances entre les machines ont une importance telle que, la productivité opérationnelle doit d'emblée justifier d'une approche systémique »* [ZARIFIAN, 1990].

Tableau 33 : Comparaison des indicateurs les plus influents en fonction des différents classements

Indicateurs influençant le système	Direct	Indirect	Direct potentiel	Indirect potentiel
Entraînement	x	x	x	x
Indicateur d'intensité de matière première		x		
Quantité de réactifs utilisés en station	x			
Taux de renouvellement de l'équipement			x	x
Productivité opérationnelle		x		x

De même, en comparant le classement direct au classement direct potentiel, il apparaît que le « taux de renouvellement de l'équipement » qui était classé dans les variables exclues lors du classement direct devient influant. En effet, lors du brainstorming, il n'a pas été établi de relation claire entre le taux de renouvellement de l'équipement et les autres indicateurs. Cependant il est aisé de comprendre qu'un renouvellement régulier des équipements peut permettre d'améliorer la capacité de production, de diminuer les risques et les accidents dus à la vétusté du matériel, de minimiser la consommation de matières premières, et d'énergie et les déchets générés lors de la production... . C'est pourquoi cet indicateur peut être potentiellement prépondérant.

III.3.2.3 Conclusions et apports de l'analyse structurelle

L'analyse structurelle a permis d'identifier les indicateurs clefs du système que sont :

- L'entraînement e
- La productivité opérationnelle PO
- La valeur ajoutée VA
- Le taux de productivité t_{prod}
- La fréquence des accidents du travail $F_{accident}$

Les autres indicateurs influents ou dépendants non cités n'ont pas d'influence forte ou de dépendance forte vis-à-vis du système d'indicateurs de 4PS.

²⁰ Lors du remplissage de la MID les intensités des relations entre indicateurs ont été pondérées (0 = nulle, 1 = faible, 2 = moyenne, 3 = forte, P = potentielle). Ces relations potentielles sont prises en compte uniquement dans les classements direct potentiel et indirect potentiel.

- Le second apport de cette méthode est la vérification de la stabilité du système d'indicateur. Comme il a été dit précédemment il y a peu de variables relais (à la fois très dépendantes et très influentes), qui rendent le système sensible à de faibles variations de ces indicateurs.
- En dernier lieu, le brainstorming nécessaire au remplissage de la matrice à remis en cause certains indicateurs qui avaient passé l'étape de sélection. En effet, pour identifier les relations d'influence entre les indicateurs il a été nécessaire de bien les redéfinir et de comprendre l'objectif auquel ils répondaient. Cette réflexion a abouti à la suppression de 5 indicateurs. Le système d'indicateurs de 4PS se compose finalement de 38 indicateurs. L'ensemble des indicateurs n'ayant pas été retenus ainsi que les raisons de cette non-sélection sont présentés en **ANNEXE 7**.

La dernière étape du processus d'élaboration d'un système d'indicateur consiste à leur organisation [**PERSONNE, 1998**] ce qui a été entrepris dans le paragraphe suivant.

III.3.3 Définition et organisation des indicateurs

III.3.3.1 Indicateurs de production plus propre et plus sûre

Une fois l'ensemble des 38 indicateurs retenus définis, il est important de caractériser précisément chaque indicateur. Dans ce but un ensemble d'attributs a été affecté à chaque indicateur. Ces informations sont:

- ➔ Libellé de l'indicateur: Un indicateur est caractérisé en premier lieu par son nom [**DROGOUL, 2006**].
- ➔ Sources citant l'indicateur: Le relie au document duquel est tiré.
- ➔ Définition: La définition de l'indicateur permet de connaître ce qu'il cherche à mesurer.
- ➔ Type: Les indicateurs utilisés sont soit qualitatifs comme le « niveau d'odeur », quantitatifs tel que « l'entraînement », ou encore booléens pour la « température des rejets ».
- ➔ Méthode de calcul: L'un des critères de pertinence d'un indicateur est qu'il soit calculable à partir de grandeurs observables sans ambiguïté et avec une base scientifique saine (objectivité²¹). Les méthodes de calcul des indicateurs sont clairement définies dans ce libellé.
- ➔ Unités de mesure: Nécessaire pour satisfaire les exigences de comparabilité et d'objectivité.

²¹ Cf. § II.3.1.4

- Valeur de référence / Échelle : Un indicateur n'existe que par la présence d'une échelle qui lui est associée. C'est la notion de « couple descripteur-échelle » suggérée par [PERSONNE, 1998]. Les échelles ont été soit :
- Directement tirés de la source. Par exemple pour le « niveau global de risque », 6 niveaux de risque ont été définis (Niveau I : très toxique et émis en grande quantité ; Niveau II : toxique et émis en grande quantité ; Niveau III : toxique et moyennement émis ; Niveau IV : très toxique et peu émis ; Niveau V : Peu toxique et faiblement émis ; Niveau VI : peu toxique et peu émis) [INRS, 2001].
 - Établies à partir de la réglementation. Par exemple, la « consommation spécifique » maximale autorisée par la réglementation française est de 8l/m² de surface traitée/ fonction de rinçage [LOI 2006, 2006]. Cet indicateur mesure donc la conformité à l'exigence de la réglementation.
 - Renseignées avec les statistiques du secteur. L'analyse des « taux de valeur ajoutée » des PME du secteur du traitement de surface a permis de définir des classes de valeurs. On obtient ainsi l'échelle suivante VA <20% : très faible ; VA<40% : faible ; 0% <VA<60% : VA moyen de PME du secteur et VA>60% : fort
 - Informées avec les caractéristiques de l'entreprise elle-même. C'est le cas de l'indicateur « caractéristiques anticorrosion ». En effet il correspond au nombre d'heures de tenue sans apparition de rouille sur les métaux plongés dans un brouillard salin. Ce nombre d'heures est fonction du cahier des charges des clients. L'échelle est donc reconsidérée en fonction de ce cahier des charges.
 - Les indicateurs n'ayant pas d'échelle attribuée sont des indicateurs de suivi qui traduisent un écart entre la valeur de l'indicateur et une valeur antérieure de ce même indicateur.
 - D'autres échelles ont été établies par un questionnaire auprès d'industriels du secteur comme le « taux de présentisme ».
- Sens et note : Étant donné la variété des unités de mesures ainsi que le fait que la méthode utilise à la fois des critères qualitatifs et quantitatifs, il a été nécessaire d'établir une échelle commune permettant d'agrèger par la suite les indicateurs de 4PS. Pour ce faire, chacune des valeurs de références précédentes a été transformée sur une échelle de 0 à 10 en tenant compte du sens pour lequel l'indicateur est optimisé. Cela signifie que : plus la valeur de l'indicateur est optimale, plus la note est élevée. Prenons l'exemple du niveau global de risques NGR, qui possède 6 niveaux de risques. Le niveau VI correspond au plus faible niveau de risque, il obtient donc 10 sur l'échelle. Réciproquement le niveau I obtient la note 0, et les niveaux intermédiaires obtiennent une note intermédiaire de l'échelle [0-10]. Dans le cas d'indicateurs de suivi ou de conformité, il n'y a que deux notes possibles : 0 ou 10. Par exemple si la température des rejets n'est pas conforme à la valeur réglementaire, la note attribuée est 0.
- Notes méthodologiques et commentaires : L'utilisation de certains indicateurs pour la méthode d'évaluation a nécessité quelques modifications par rapport à l'indicateur tiré de la référence. Ces modifications sont spécifiées dans les notes méthodologiques.

- ➔ Nature des données : Il s'agit de définir les paramètres nécessaires au calcul de l'indicateur. Par exemple pour l'indicateur « intensité boues » les données nécessaires sont la masse de boues produites pendant une période (1 mois) et la production (m² de surface traitée) durant cette même période. Cet attribut n'est pas complété quand l'indicateur est issu d'une mesure.
- ➔ Lien avec d'autres indicateurs : Comme il a été vu lors de l'étape d'analyse structurée (cf. III.3.2), certains indicateurs sont liés par des relations plus ou moins explicites. Cet attribut permet de spécifier les liens entre les indicateurs.
- ➔ Temps de retour : Le temps de retour caractérise la périodicité pour l'obtention de l'indicateur. Par exemple la valeur ajoutée est un indicateur qui nécessite un temps de retour d'un an.
- ➔ Limites et Atouts : Les indicateurs de la méthode d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS peuvent être utilisés pour certains à la fois comme outil de diagnostic et outil de suivi. Rappelons qu'un outil de diagnostic permet de caractériser un état d'après ses symptômes. Les indicateurs de suivi par contre permettent de caractériser une évolution à partir d'un état antérieur. Ainsi dans la catégorie « limites et atouts » est précisé si l'indicateur est utilisé en outil de suivi, de diagnostic ou les deux.

Ce mémoire présente uniquement un exemple pour l'indicateur « Caractéristiques anticorrosion » (Tableau 34). L'ensemble des tableaux d'indicateurs de 4PS est proposé en ANNEXE 8.

Tableau 34: Caractéristiques anticorrosion

	Libellé de l'indicateur	Caractéristiques anticorrosion (BS)
Indicateur	Sources citant l'indicateur	[DROGOUL, 2006]
	Définition	Détermine la qualité d'une pièce en comparant le nombre d'heures de tenue au brouillard salin de cette pièce à celui spécifié par le client sur le cahier des charges.
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Mesure par un test dans un brouillard salin
	Unité de mesure	Heures
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de rouille : très bon • Rouille blanche après x heures : bon • Rouille blanche avant y heures : mauvais • Rouille rouge avant z heures : très mauvais
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Très bon → 10 • Bon → 7,5 • Mauvais → 2,5 • Très mauvais → 0
	Notes méthodologiques et commentaires	(x, y, et z dépendent du cahier des charges de l'entreprise)
Données	Nature des données	-
	Lien avec d'autres indicateurs	taux de rebuts ; taux de satisfaction du client
	Temps de retour	Rapide (3 jours)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

III.3.3.2 Structuration des indicateurs de 4PS

Le travail de recherche et de sélection des indicateurs a abouti à une liste de 38 indicateurs de production plus propre et plus sûre. Il s'agit maintenant de les affecter aux critères de 4PS. En effet les indicateurs sélectionnés servent à renseigner les critères (Figure 40) élaborés dans la section III.3.1.

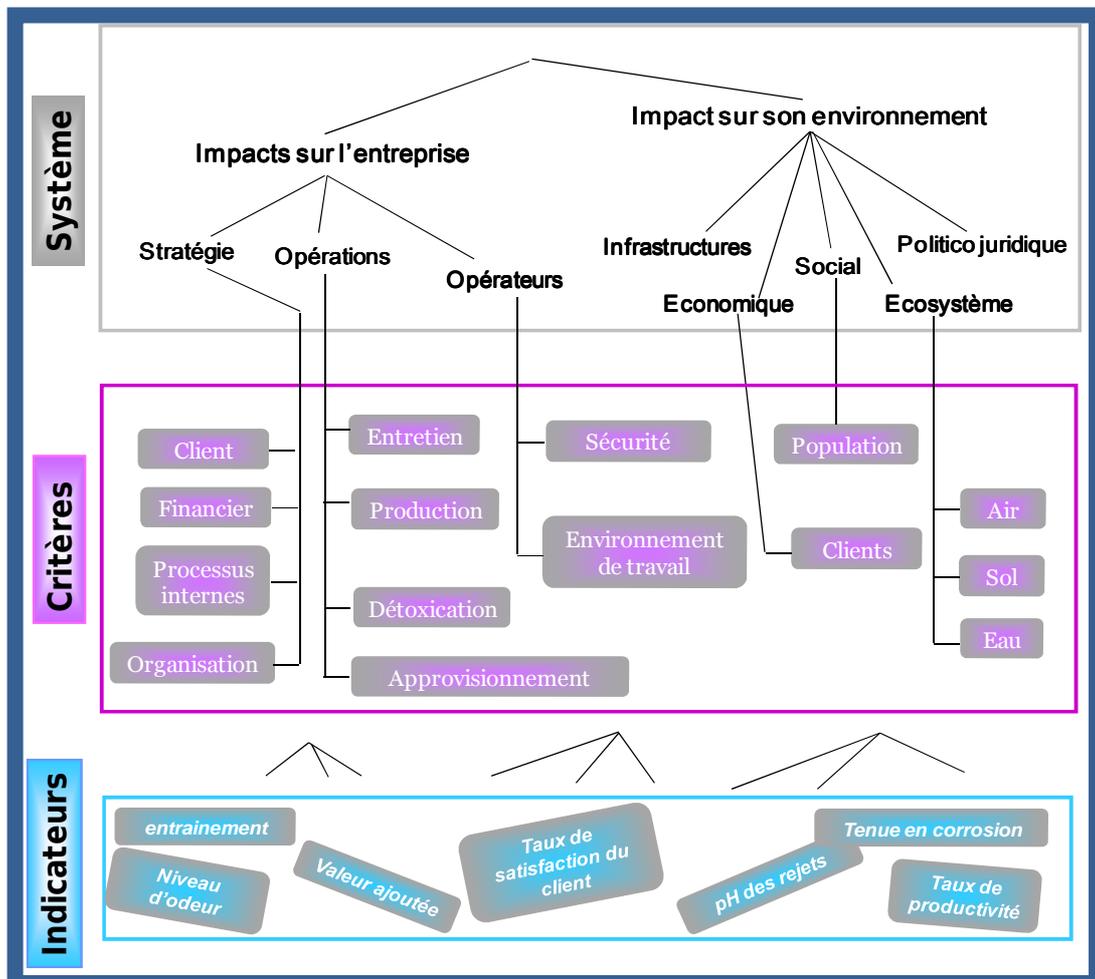


Figure 40: Structure de la méthode d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS au niveau des indicateurs

Bien que l'analyse structurale du système d'indicateur ait révélé une prépondérance de certains indicateurs vis-à-vis des autres, les indicateurs ont été considérés comme équivalents dans un critère puisque ces critères ont été eux même pondérés.

Le Tableau 35 représente le résultat de ce travail de structuration, pondération et élaboration de la méthode de diagnostic des impacts liés à la mise en place d'une pratique. Sur la base de ce résultat, la valeur des indicateurs peut-être calculée et comparée à l'échelle correspondante. Il est ainsi possible d'en déduire le niveau d'impact sur l'ensemble des critères. Celui-ci sera présenté dans la quatrième partie de ce mémoire.

Partie III : Démarche d'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS
 Chapitre III.3:...À la méthode de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS

Tableau 35: Structuration et formalisation des indicateurs

Système Cible	Sous-système	poids SSC*	Critère	poids C**	Indicateurs
ENVIRONNEMENT	Social	0,35	Population	1	• Mesure du bruit à l'extérieur de l'atelier
					• Niveau d'odeur extérieur
					• Excès de risque individuel
					• Indice de risque
	Écosystème	0,32	Eau	0,65	• Température des rejets
					• pH des rejets
					• Charge toxique et polluante rejetée dans l'eau
Air	0,13	• Suivi de charge toxique et polluante rejetée dans l'eau			
		• Indice de biodégradabilité des rejets dans l'eau			
Économique	0,33	Sol	0,21	• Charge toxique, métallique et polluante rejetée dans l'air	
				• Suivi de charge toxique et polluante rejetée dans l'air	
ENTREPRISE	Opérateurs	0,35	Client	1	• Gain en clientèle
			Environnement de travail	0,63	• Mesure du bruit à l'intérieur de l'atelier
	Operations	0,26	Sécurité	0,37	• Niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier
					• Niveau global de risques
			Approvisionnement	0,2	• Taux de fréquence des accidents et arrêts du travail
					• Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique
			Production	0,37	• Indice de dangerosité pour un flux de surpression
					• Indicateur d'intensité énergétique
	Entretien	0,19	• Indicateur d'intensité de matière première		
			• Entrainement		
Détoxification	0,24	• Rapport de dilution des bains			
		• Consommation spécifique			
Enterprise stratégique	0,39	Perspective financière	0,22	• Indicateur d'intensité déchets de production	
				• Indicateur d'utilisation déchet	
					• Taux de renouvellement de l'équipement
					• Valeur ajoutée
					• Taux de productivité apparente du travail

* SSC : Sous Système Cible

** C : Critère

Partie III : Démarche d'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

Chapitre III.3: ...À la méthode de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS

			Perspective client	0,43	• Taux de satisfaction du client (ou taux de rebuts)
					• Caractéristiques anticorrosion
			Processus internes	0,16	• Productivité opérationnelle
					• Taux d'utilisation de l'équipement
			Perspective organisationnelle	0,19	• Taux de formation du personnel
					• Taux de présentéisme

III.3.4 Conclusion sur la méthode de diagnostic des impacts

Dans ce chapitre une méthode de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS a été élaborée. Celle-ci se base sur 38 indicateurs de 4PS qui ont été identifiés, sélectionnés et organisés selon quinze critères de 4PS (cf. § III.3.3.2). La méthode construite ici permet d'avoir un premier état des lieux de l'atelier de traitement de surfaces. Ainsi l'industriel peut prendre conscience de ses atouts et des pistes sur lesquelles il peut améliorer ses impacts : c'est un premier pas vers l'aide à la décision. De plus, dans le cas de la mise en place d'une pratique de production propre, la méthode permet de faire un état des lieux aval pour observer les évolutions liées à cette implémentation.

Néanmoins, elle ne permet pas l'aide au choix de pratiques. Nous proposons donc dans la section suivante la construction d'une méthode complémentaire d'aide au choix de pratiques reposant également sur les 15 critères de 4PS identifiés.

III.4 À la méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS

Comme il a été précédemment dit, la « production propre » permet de diminuer les pressions anthropiques, d'améliorer les processus de production, et de générer des bénéfices [KJAERHEIM, 2003] [GIANNETTI *et al.*, 2008] [VAN BERKEL, 2007]. Cependant, Gault (2009) montre que si les chefs d'entreprises français de moins de 250 salariés se sentent concernés par la protection de l'environnement (85% des sondés), 72% d'entre eux n'ont pas engagé et ne prévoient pas d'engager d'actions dans ce sens [GAULT, 2009]. Cela peut s'expliquer par un manque de visibilité de ces technologies mais également par la faible disponibilité d'outils d'aide à la décision pour le choix de pratiques de production plus propre. C'est pourquoi nous avons souhaité construire une méthode d'aide au choix de pratiques pour les industriels dans le secteur du traitement de surfaces.

Selon Kabongo (2004) la prise de décision pour l'environnement se base majoritairement sur des critères financiers [KABONGO, 2004]. Or la décision pour la mise en place de pratiques de production propre présente plusieurs caractéristiques.

- Elle est multicritère. Le coût n'est pas le seul critère déterminant. D'autres critères tels que l'impact de la technologie sur les milieux naturels, la nécessité d'entretien, ou encore les conditions de travail apparaissent indispensables pour la maîtrise des impacts liés à ces pratiques.
- La décision est également multi-acteur. Bien que les entrepreneurs soient les principaux acteurs de la décision environnementale dans l'entreprise (cf. § III.2.1.1), d'autres acteurs peuvent participer à la mise en place de pratiques de production plus propre. Il s'agit des donneurs d'ordres, des industriels, des experts, des financeurs, voire même des clients. Il est à noter que la multiplicité des acteurs complexifie la décision puisque ceux-ci peuvent avoir des avis divergents [SCHÄRLIG, 1985].
- Les possibilités d'actions sont variées. En effet, les pratiques de production propre sont nombreuses. Elles concernent à la fois les procédés, les produits et la manière de les mettre en œuvre. Cela rajoute un niveau de complexité à la prise de décision.

Dans ce contexte, le recours à des outils d'aide à la décision multicritère paraît indispensable pour favoriser la mise en place de pratiques de production propre dans les entreprises. Face à la diversité des méthodes d'analyse multicritère à notre disposition il a fallu sélectionner celle qui répond au mieux à cette problématique d'aide au choix de pratiques.

En multicritère la problématique est une information fondamentale. Selon la typologie des problématiques²² proposée par Bernard Roy, notre application relève de la problématique α car il s'agit de faire un choix dans un panel de pratiques innovantes. Parmi les méthodes appartenant à cette problématique, ELECTRE I²³ a été retenue pour sa simplicité de mise en œuvre et son caractère intuitif. En effet, et nous le verrons dans les paragraphes suivants, le caractère intuitif de la note permet de palier le manque d'information quantitative pour l'évaluation des actions.

²² Cf. partie II.4.2.3

²³ Cf. partie II.4.3.2

Cette section s'attachera à présenter la démarche d'élaboration de la méthode d'aide au choix de pratiques de production plus propre et plus sûre basée sur l'application de la méthode ELECTRE I.

III.4.1 Recherche et sélection des pratiques de 4PS

La première étape lors de l'utilisation de la méthode d'analyse multicritère ELECTRE I est l'identification des actions. Pour notre part, ces actions sont en réalité les pratiques de production plus propre parmi lesquelles l'utilisateur pourra faire un choix. Le recensement de ces pratiques de production propre appliquées dans le secteur du traitement de surface a donc été nécessaire. Les pratiques ont été identifiées par l'extraction de données ou d'informations tirées de documents de référence dans le secteur (document de référence sur les meilleures techniques disponibles dans le secteur du traitement de surfaces [BREF STM, 2005] [CARPP, 2002]) ou encore dans des revues spécialisées (Galvano-Organo).

Les pratiques identifiées appartiennent aux différentes stratégies de production plus propre (Bonnes pratiques, Meilleur contrôle des procédés, Remplacement d'intrant, Modification des procédés, Valorisation, et Changement de technologie) à l'exception de la stratégie « Modification du produit ». Celle-ci n'a pas été prise en compte car peu de pratiques appartenant à cette stratégie sont mises en œuvre dans le secteur du traitement de surface. De plus, elle dépend du type de produit et de l'entreprise, ce qui restreindrait les possibilités de généralisation de la méthode à d'autres secteurs d'activité.

Les stratégies Valorisation sur place et Valorisation des sous-produits ont été fusionnées en une stratégie Valorisation car peu de pratiques de 4PS ont été recensées pour la stratégie valorisation des sous-produits.

Parmi les pratiques identifiées une sélection basée sur la récurrence de leur utilisation en industrie ainsi que sur la disponibilité des informations pour les évaluer a été conduite. 86 pratiques ont été sélectionnées dans ce cadre.

III.4.2 Évaluation des pratiques de production plus propre vis-à-vis des critères

III.4.2.1 Établissement de la matrice d'évaluation

La méthode ELECTRE I se base sur un ensemble de critères. Les pratiques de production propre retenues ont été évaluées vis-à-vis des quinze critères de production plus propre et plus sûre identifiés au chapitre III.2 de cette partie (Figure 41).

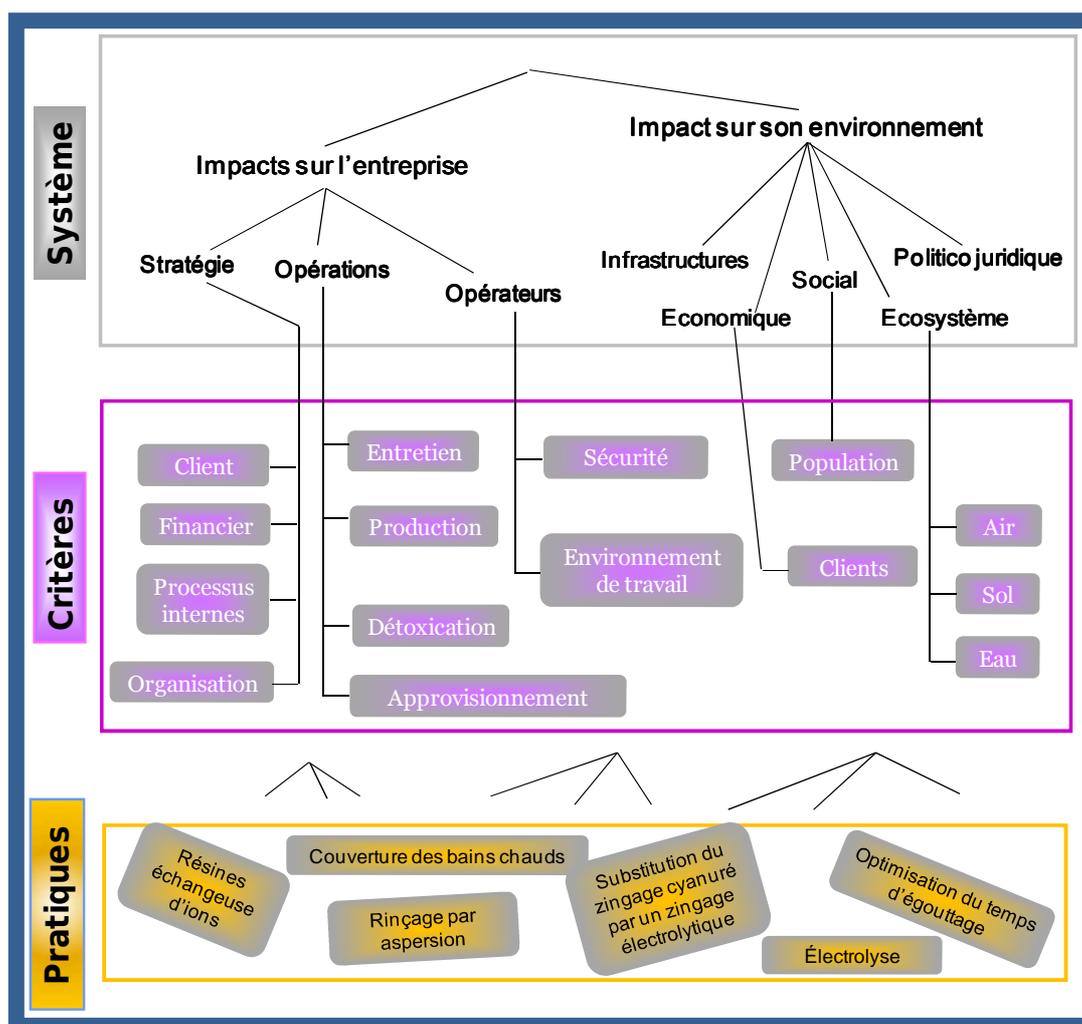


Figure 41: Structure de la méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS

Cette évaluation est réalisée en trois étapes. La première consiste à évaluer ces pratiques de manière qualitative, la seconde, à transformer ces évaluations qualitatives en évaluations quantitatives, et enfin la troisième, à l'estimation des incertitudes liées à l'évaluation. Ces étapes sont décrites dans les paragraphes suivants.

III.4.2.1.1 Évaluation qualitative

L'évaluation qualitative est basée sur l'identification des impacts potentiels (positifs et négatifs) de chacune des pratiques vis-à-vis de chacun des critères. Selon Roy, considérer les conséquences des actions est indispensable pour le choix de critères [ROY, 1985]. L'identification de ces impacts a donc été réalisée tout d'abord par une étude bibliographique de ces techniques²⁴ recensées dans le BREF Traitement de Surface.

La principale difficulté rencontrée lors de cette évaluation qualitative concerne la disponibilité de l'information. En effet :

- une majorité des documents consultés ne décrivent que les bénéfices de l'utilisation d'une pratique et les impacts « négatifs » sont occultés.

²⁴ Les techniques regroupent les technologies et la manière de les mettre en œuvre [BREF STM, 2005]

- De plus ces bénéfices sont bien souvent donnés en termes de gains économiques ou de minimisation des déchets et donc ne couvrent pas l'ensemble des critères.
- En dernier lieu certains critères ne peuvent être renseignés car la pratique n'a aucun impact connu sur le critère considéré.

Le remplissage de la matrice qualitative a donc nécessité de recouper les informations provenant de plusieurs sources quelque fois contradictoires.

Ces informations étant purement bibliographiques une validation par l'expertise a permis de compléter ces informations. À la suite de cette expertise, une matrice d'évaluation qualitative a été réalisée pour chacune des stratégies de production propre (ANNEXE 9). Le Tableau 36 suivant est un extrait de cette matrice d'évaluation qualitative.

Tableau 36 : Extrait des évaluations qualitatives des pratiques de production propres

Pratiques	Description	Critères...					
		Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité
Substitution des couches de passivation au chrome (VI) par des revêtements de conversion au chrome (III)	La formulation au chrome VI est remplacée par une formulation au chrome III, la substitution du chrome VI étant préconisée par la réglementation	Réduction de la toxicité sur l'environnement	Réduction des exigences de traitement de la pollution atmosphérique; diminution de l'acide chromique dans l'air ambiant de l'atelier et à l'extérieur	Diminution du risque de contamination des sols par du Cr(VI)	Réduction de la toxicité sur l'environnement	Protection contre la corrosion similaire; Couleur verdâtre remplaçant le jaune gênante	Réduction de la toxicité sur le lieu de travail; Diminution de l'acide chromique dans l'air ambiant de l'atelier, très bon
Substitution du dégraissage aux solvants chlorés par un dégraissage aqueux ou aux solvants pétroliers	Les acides et les alcalis remplacent les solvants dont l'utilisation était nocive pour les humains et l'environnement	Les solvants pétroliers présentent peu de risques pour l'environnement, Les terpènes sont biodégradables	Diminution des émissions de COV	Utilisation plus grande du sol	Image positive sur la non-utilisation de solvants chlorés	Moins bonne qualité de dégraissage	Lessives alcalines moins toxiques pour l'homme que les chlorés, Point éclair bas des terpéniques
Électrolyse	Elle permet la réduction à la cathode (dépôt des cations) et l'oxydation à l'anode (destruction des anions) des espèces chimiques de l'électrolyte	Économie sur la consommation d'eau; rejets conformes aux seuils, Destruction par oxydation anodique du cyanure	Attention à la création de Dihydrogène	-	Elle peut produire des mélanges explosifs de Dioxygène et de Dihydrogène, Destruction du cyanure	Récupération du cadmium ou de métaux précieux; Qualité	Elle peut produire des mélanges explosifs de Dioxygène et de Dihydrogène, destruction du cyanure
Couverture des bains non utilisés ou utilisation de boules de plastique	Couvrir le bain permet de limiter les pertes thermiques et par évaporation, et donc diminue l'énergie nécessaire au maintien du bain à température	Réduit la consommation d'eau due au réajustement des bains	Réduit les pertes par évaporation et aérosols, et émissions fugaces	Diminution du risque de pollution accidentelle du sol	réduit les risques d'émission gazeuses toxiques	Influence positivement la qualité des pièces	Diminue la toxicité des atmosphères de travail, diminution du niveau global de risques
Agitation des solutions de traitement par air	L'agitation des bains est souvent indispensable et peut se réaliser par de l'air comprimé	La compensation nécessaire des bains augmente la consommation d'eau	Aggravation des jets, brumes, vapeurs de particules en suspension dans l'air	Aggravation du risque de pollution accidentelle du sol	Nuisance sonore due aux compresseurs d'air	Limite la corrosion et meilleure qualité et répartition des dépôts	Aggravation des jets, brumes, vapeurs de particules en suspension dans l'air

III.4.2.1.2 Évaluation quantitative

La méthode ELECTRE I nécessite l'utilisation d'évaluations quantitatives (notes ou valeurs) pour l'établissement des relations de surclassement. Il faut donc transformer de la manière la plus objective possible, des informations qualitatives en notes. Différentes difficultés se sont présentées pour réaliser ce passage du qualitatif au quantitatif:

- Les informations sur les différents critères ne sont pas forcément quantifiables. Par exemple pour la pratique "Couverture des bains " du Tableau 36, au niveau du critère eau, l'évaluation qualitative est : " Réduit la consommation d'eau due au réajustement des bains". Cependant, il n'y a pas de quantification de cette réduction. Ce cas se retrouve dans beaucoup de pratiques.
- Il n'y a pas de pratiques de référence qui permette de donner une préférence et de faire l'évaluation d'une pratique par rapport à cette référence.
- Certains critères ne sont pas renseignés. Dans ce cas de figure, soit la pratique n'a aucun impact sur le critère (par exemple la pratique « Électrolyse » au niveau du critère « sol » du Tableau 36), soit l'impact de la pratique est indirect. Pour illustrer ce propos, prenons la "couverture des bains", cette pratique diminue la toxicité dans l'atelier et par conséquent améliore les conditions de travail des opérateurs de l'entreprise. On peut penser que cela provoque une amélioration de la productivité de l'entreprise. Dans ce dernier cas, l'inexistence de l'information ne signifie pas l'inexistence d'une préférence indirecte vis-à-vis du critère.

Ainsi, il a été nécessaire d'élaborer un système de notation pour s'affranchir au mieux des difficultés citées précédemment. Ce système est présenté dans le Tableau 37. Une échelle ordinale à 7 niveaux a été retenue pour quantifier les différents degrés de l'évaluation.

Tableau 37: Système de notation utilisé pour transcrire les évaluations qualitatives en semi-qualitatives

Note	Signification	Règle
t	Très bon	Plus d'un impact positif Suppression totale du problème
b	Bon	Un impact positif
a	Assez bon	Pas d'information mais une tendance plutôt bonne L'impact positif semble prédominer
n	Neutre	Pas d'impact
p	Passable	Pas d'information mais une tendance plutôt mauvaise L'impact négatif semble prédominer
m	Mauvais	Un impact négatif
e	Exécration	Plus d'un impact négatif

Il s'agit ensuite de transformer ces notes semi-quantitatives en notes numériques. Les notes numériques vont dépendre de l'échelle associée aux critères, échelle qui elle-même est tributaire du poids du dit critère (cf. §II.4.3.2.2) (Tableau 38):

Tableau 38: Amplitude de l'échelle en fonction du poids du critère

Poids du critère p_j	$0,6 > p_j > 1$	$0,3 < p_j < 0,6$	$0 < p_j < 0,30$
Amplitude de l'échelle correspondante	0-10	2-8	3-7

La valeur neutre étant toujours conservée au milieu de cette échelle c'est-à-dire la valeur 5. Ces échelles ont été adaptées de Scharlig (1985) en intégrant deux niveaux supplémentaires (passable et assez bon) pour affiner l'évaluation (Tableau 39) [SCHÄRLIG, 1985].

Tableau 39 : Note numériques en fonction des échelles considérées

Note	Échelle 0-10	Échelle 2-8	Échelle 3-7
t	10	8	7
b	8,33	7	6,33
a	6,66	6	5,66
n	5	5	5
p	3,33	4	4,33
m	1,66	3	3,66
e	0	2	3

Le Tableau 40 suivant propose un exemple d'application de cette évaluation pour la pratique « substitution des couches de passivation au chrome (VI) par des revêtements de conversion au chrome (III) ». Le poids du critère eau est de 0,65 ; l'échelle associée a par conséquent la plus grande amplitude. Au niveau de l'évaluation qualitative il n'y a qu'un seul impact, qui est positif. En se référant à la règle établie, cela correspond à la note b, et donc à la valeur 8,33 sur l'échelle 0-10.

Tableau 40 : Exemple d'application pour la pratique substitution des couches de passivation au chrome (VI) par des revêtements de conversion au chrome (III)

Critères	Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité
Poids du critère	0,65	0,13	0,21	0,27	0,22	0,37
Échelle associée	0-10	3-7	3-7	3-7	3-7	2-8
Évaluation qualitative	Réduction de la toxicité sur l'environnement	Réduction des exigences de traitement de la pollution atmosphérique; Diminution de l'acide chromique dans l'air ambiant de l'atelier et à l'extérieur	Diminution du risque de contamination des sols par du Cr(VI)	Réduction de la toxicité sur l'environnement	Protection contre la corrosion similaire; Couleur verdâtre remplaçant le jaune gênante	Réduction de la toxicité sur le lieu de travail; Diminution de l'acide chromique dans l'air ambiant de l'atelier, très bon
Évaluation semi-qualitative	b	t	b	b	p	t
Évaluation quantitative	8,33	7	6,33	6,33	4,33	8

Les 86 pratiques de production plus propre ont ainsi été évaluées. Par exemple les tableaux 41 et 42 montrent le type de matrice obtenue pour la stratégie « valorisation » qui regroupe quinze pratiques avec une évaluation semi-qualitative puis quantitative. L'ensemble de la matrice semi-qualitative élaborée est proposée en **ANNEXE 10**.

Tableau 41: Matrice des jugements semi- qualitative pour l'aide à la décision dans le choix d'une pratique de 4PS de type "Valorisation".

Valorisation																
Pratiques	n°	Évaluation des pratiques vis à vis des critères : très bon (t), bon (b), neutre (n), passable (p), mauvais (m)														
		Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxication	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
Compression mécanique de vapeur	P ₁	b	n	n	n	n	m	b	b	n	b	b	n	t	n	n
Déshuilage statique	P ₂	m	n	m	n	b	n	n	b	a	t	b	n	t	b	n
Électrolyse	P ₃	t	a	a	b	b	b	n	b	b	t	b	a	t	a	p
Électro-floculation, Électro-flottation	P ₄	t	n	n	n	n	b	n	p	n	t	m	n	t	n	n
Électrodialyse	P ₅	t	n	n	n	b	n	n	e	t	t	b	n	p	a	n

Tableau 42: Matrice des jugements quantitative pour l'aide à la décision dans le choix d'une pratique de 4PS de type "Valorisation".

Critères	Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxication	Approvisionnement	Stratégie Clients	Financier	Processus internes	Organisation
Poids	0,65	0,13	0,21	0,27	0,22	0,37	0,63	0,19	0,37	0,24	0,2	0,43	0,22	0,16	0,19
Amplitude d'échelle	10	4	4	4	4	6	10	4	6	4	4	6	4	4	4
P₁	8,33	5	5	5	5	3	8,33	6,33	5	6,33	6,33	5	7	5	5
P₂	1,66	5	3,66	5	6,33	5	5	6,33	6	7	6,33	5	7	6,33	5
P₃	10	5,66	5,66	7	6,33	7	5	6,33	7	7	6,33	6	7	5,66	4,33
P₄	10	5	5	5	5	7	5	4,33	5	7	3,66	5	7	5	5
P₅	10	5	5	5	6,33	5	5	3	8	7	6,33	5	4,33	5,66	5

III.4.2.1.3 Estimation de l'incertitude liée aux évaluations

Bouyssou (2006) souligne l'importance de la subjectivité, de « l'affect » dans les évaluations [BOUYSSOU *et al.*, 2006]. Cette subjectivité est omniprésente dès lors que l'évaluation ne peut se faire au moyen d'un capteur de mesure ou d'une procédure de mesure clairement définie et répétable. Dans le but de s'affranchir de la part de subjectivité liée à l'évaluation des pratiques de production plus propre et plus sûre, l'estimation des incertitudes est indispensable.

L'étude bibliographique n'ayant pas permis d'identifier de méthodes existantes adaptées au calcul de cette incertitude, une méthode d'estimation a été élaborée. Pour ce faire il est nécessaire d'avoir au moins deux experts qui effectuent l'évaluation indépendamment. L'incertitude sur les résultats est alors évaluée au moyen de deux ratios :

- Le pourcentage de différence entre les évaluations (dr). Celui-ci se calcule en utilisant l'équation suivante :

$$dr = n.\text{différences}/n.\text{évaluations} \quad (\text{Équation 9})$$

avec $n.\text{différences}$: nombre d'évaluations différentes entre les deux individus
 $n.\text{évaluations}$: nombre d'évaluations effectuées

- Le pourcentage d'écart E entre ces évaluations. Il s'agit de mesurer l'écart d'échelle moyen pour l'ensemble des évaluations différentes par rapport à l'échelle maximum (ce maximum étant de 10). E est calculé comme suit :

$$E = \frac{\sum |é1 - é2|}{n.\text{différences} \cdot 10} \quad (\text{Équation 10})$$

avec $é1$ et $é2$: respectivement les évaluations des individus 1 et 2

Prenons l'exemple proposé dans le Tableau 43. Sur les 10 critères ($n.\text{évaluations} = 10$) présentés 7 n'ont pas la même évaluation pour les deux individus ($n.\text{différences} = 7$) : $dr = 0,7$. Cela signifie que 70% des évaluations sont différentes entre les deux individus. De même $E = ((1+3+2+1+1+1+2)/7)/10 = 0,15$. Ainsi l'écart moyen entre les deux évaluations est de 15%.

Tableau 43 : Exemple d'évaluation quantitative réalisée par deux individus

	critère 1	critère 2	critère 3	critère 4	critère 5	critère 6	critère 7	critère 8	critère 9	critère 10
Évaluation (é1) par l'individu 1	5	7	10	6	8	2	4	3	5	2
Évaluation (é2) par l'individu 2	5	8	7	8	8	1	5	4	7	2
différence 1-2	0	1	3	2	0	1	1	1	2	0

Lors de l'élaboration de la méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS, la mesure de l'incertitude a été effectuée sur 240 évaluations²⁵ réalisées par deux individus distincts. Les résultats obtenus sont les suivants:

²⁵ Évaluations des pratiques de production propre prises aléatoirement dans les différentes pratiques et stratégies de 4PS

$d_r = 63 \text{ différences} / 240 \text{ évaluations} = 0,26$.

$E = 0,32/10 = 0,032$.

Ainsi 26% des évaluations effectuées sont différentes entre les deux expertises. C'est une valeur qui peut sembler relativement importante néanmoins l'écart entre les évaluations n'est que de 3,2 %. Ces résultats s'expliquent par le fait que la différence entre les notes est souvent d'un degré sur l'échelle. L'évaluation n'est donc pas complètement différente. On peut donc considérer que les incertitudes liées à la subjectivité de l'évaluation sont négligeables.

Ces trois étapes d'évaluation qualitative, d'évaluation quantitative, et d'estimation de l'incertitude sur ces évaluations ont permis d'élaborer la matrice des performances des pratiques de production propre. Les matrices qualitatives et semi-qualitatives constituent le cœur de la méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS. Celui-ci demeurera inchangé ce qui n'est pas le cas de la matrice quantitative qui dépend des poids attribués aux critères. Les étapes suivantes de démarche de construction de la méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS sont en réalité une application directe d'ELECTRE I. Ces étapes seront donc succinctement présentées dans les paragraphes suivants pour le cas de la stratégie Valorisation.

III.4.2.2 Établissement des relations de surclassement

Une fois la matrice des performances réalisée, l'étape suivante de la réalisation d'ELECTRE I est le calcul des indices de concordance et de discordance. Ces indices sont alors comparés aux seuils de concordance et de discordance, respectivement choisi à 0,8 et 0,2 pour l'établissement des relations de surclassement entre les pratiques. Le choix des seuils a été tiré de la bibliographie [SCHÄRLIG, 1985] [MAYSTRE *et al.*, 1994]. Les paramètres de base de l'outil sont : les poids des critères attribués au paragraphe §III.2.3, les échelles attribuées au paragraphe §III.4.2, un seuil de concordance $\hat{c} = 0,8$ et un seuil de discordance $\hat{d} = 0,2$. La comparaison des indices aux seuils aboutit à l'établissement des relations de surclassement. Un exemple de surclassement obtenu lors de l'utilisation de la méthode d'aide au choix de pratiques pour comparer 15 pratiques de 4PS appartenant à la stratégie Valorisation est proposé ci-dessous. Ce surclassement a été obtenu avec les paramètres de base et est schématisé sur le graphe de surclassement (Figure 42):

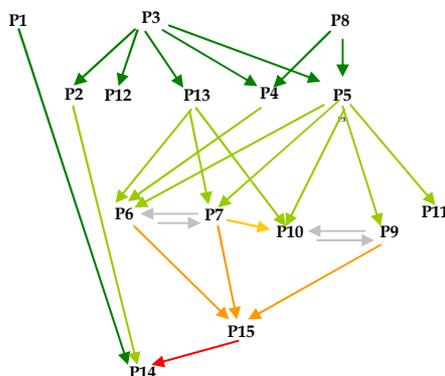


Figure 42: Graphe de surclassement de la solution basique pour la stratégie Valorisation

Les conclusions que l'on peut tirer de ce graphe sont:

- ➔ Il semble y avoir 3 pratiques dominantes : P1 (compression mécanique de la valeur), P3 (électrolyse), et P8 (micro-ultra- nanofiltration).
- P1 sort du lot néanmoins elle ne surclasse que P14. En se référant aux évaluations du Tableau 44, il apparaît que les valeurs des évaluations de P1 sont supérieures à celles de P14 pour tous les critères sauf pour la détoxification (en rouge). La condition de concordance est donc validée puisqu'une majorité des critères se dégage en faveur de l'action P1 (cf. §II.4.3.2). De plus l'écart entre l'évaluation de P1 et P14 est très faible : de l'ordre de 0,66. il n'existe donc pas une trop forte pression dans un des critères en faveur du surclassement inverse : la condition de non discordance est validée. Par conséquent il est aisé de comprendre le surclassement de P14 par P1.
- P3 semble la plus surclassante. Intéressons nous par exemple au surclassement de P2 par P3. L'analyse du tableau 44 montre que l'ensemble des évaluations de P3 ont une valeur supérieure à aux évaluations de P2 sauf pour les critères processus internes et organisation qui n'ont pas un poids fort (en bleu). Il en résulte que la condition de concordance et de non discordance sont respectées, d'où le surclassement obtenu de P2 par P3. Il faut cependant être prudent dans l'analyse des résultats. En effet à cause (ou grâce) au respect de l'intransitivité on peut dire que P3 surclasse P2 qui elle-même surclasse P14, mais cela ne signifie pas que P3 surclasse P6.
- De même P8 surclasse P5 qui elle même surclasse P9, mais cela ne signifie pas que P8 surclasse P9.
- ➔ P14 est surclassée par trois autres pratiques. Le Tableau 44 montre que la valeur des évaluations de cette pratique est inférieure à celles des pratiques, P1, P2 et P15 pour une majorité de critères. Cela explique donc ce surclassement.

Tableau 44 : Évaluations quantitatives de quelques pratiques

		Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxication	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
Compression mécanique de la vapeur	P 1	8,33	5	5	5	5	3	8,33	6,33	5	6,33	6,33	5	7	5	5
déshuilage statique	P 2	1,66	5	3,66	5	6,33	5	5	6,33	6	7	6,33	5	7	6,33	5
Électrolyse	P 3	10	5,66	5,66	7	6,33	7	5	6,33	7	7	6,33	6	7	5,66	4,33
Électro-floculation, électro-flottation	P4	10	5	5	5	5	7	5	4,33	5	7	3,66	5	7	5	5
Électrodialyse	P5	10	5	5	5	6,33	5	5	3	8	7	6,33	5	4,33	5,66	5
Électrolyse compartimentée	P6	8,33	5	5	5	6,33	5	5	3	7	7	5	5	3,66	5	5
Électro-électrodialyse	P7	8,33	5	5	5	5	5	5	3,66	8	7	6,33	5	3	5	5
Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration	P8	10	5	6,33	5	7	5	5	3,66	8	7	5,66	6	5,66	5,66	6,33
Résines échangeuses d'ions	P9	10	3,66	5	5	5	5	5	4,33	8	4,33	3,66	5	3,66	4,33	5
Résines adsorbantes	P10	8,33	5	5	5	5	5	5	4,33	8	3,66	5,66	5	4,33	5	5
Centrifugation	P11	1,66	5	3	3	6,33	5	1,66	4,33	8	7	5,66	7	6,33	5,66	5
Évaporation	P12	10	3,66	5	3	7	3	5	6,33	6	4,33	4,33	7	3	5	4,33
Osmose inverse	P13	8,33	5	5	5	6,33	4	5	6,33	8	5,66	6,33	5	6,33	5,66	6,33
extraction liquide-liquide	P14	3,3	4,33	4,33	4	5	3	5	4,33	5	7	4,33	5	3,66	5	4,33
dialyse par diffusion	P15	5	5	5	5	5	5	5	4,33	8	6,33	4,33	5	4,33	3,66	4,33

Cet exemple illustre le type de résultats qui peuvent être obtenus par l'utilisation de la méthode d'aide au choix. Comme il a été dit ces résultats ont été obtenus avec les poids attribués aux critères issus de l'expertise (§ III.2.3.2). En adaptant les poids de ces critères aux préoccupations de l'industriel, les évaluations quantitatives sont modifiées, et par conséquent le surclassement obtenu l'est également. Ce dernier en effet, sera adapté à la sensibilité de l'industriel. La méthode d'aide au choix permet donc de révéler dans un panel de pratiques, les pratiques surclassantes et donc d'orienter le choix du décideur. Cependant le respect de l'intransitivité empêche d'aller plus loin dans l'interprétation des résultats.

III.4.3 Étude de la robustesse

Cette étude consiste à répéter l'analyse multicritère en faisant varier de manière isolée puis collective, les valeurs attribuées initialement aux différents paramètres. Les paramètres qui ont été testés sont les seuils de concordance et de discordance, les poids et l'amplitude des échelles. Cette analyse a été réalisée pour l'ensemble des pratiques de production propre par type de stratégies mais également sur différentes combinaisons de pratiques issues de chacune des stratégies. Les résultats étant assez similaires pour l'ensemble des tests réalisés, nous ne présenterons ici que ceux de la stratégie Valorisation.

III.4.3.1 Variation des seuils de concordance

Le seuil de concordance a été modifié sur une plage de valeurs allant de 0,5 à 1, avec un seuil de discordance fixé à 0,2. Le noyau d'ELECTRE est constitué des pratiques surclassantes qui ne sont surclassées par aucune autre pratique du noyau. Les noyaux suivants sont obtenus et leur domaines de validité schématisés sur la Figure 43 (S_b : $\{P_1, P_3, P_8\}$, A : ensemble des pratiques):

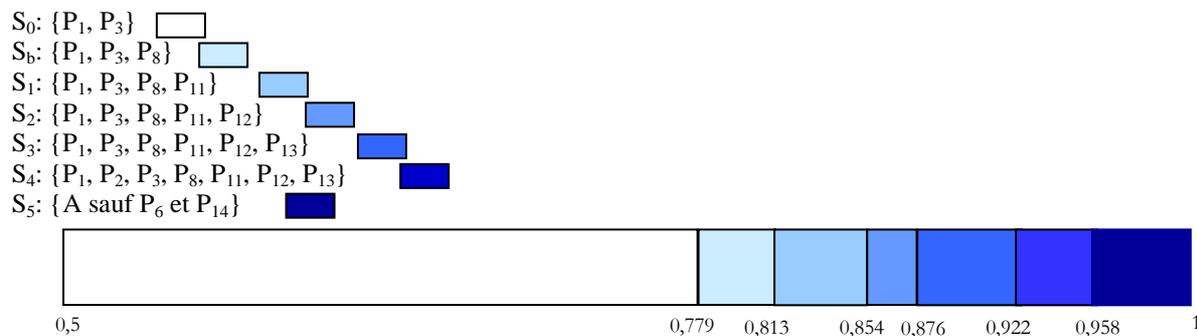


Figure 43 : Domaine de validité des différents noyaux selon le seuil de concordance

En augmentant les exigences vis-à-vis de la concordance ($\hat{c} \rightarrow 1$), un nombre de plus en plus important de pratiques s'intègre dans le noyau. Cependant celui-ci n'est pas foncièrement modifié car les pratiques P_1 , P_3 et P_8 y sont toujours présentes. Ces résultats semblent cohérents car en augmentant les exigences de concordance il y a certes de moins en moins de pratiques surclassantes mais de plus en plus de pratiques incomparables (ni surclassante ni surclassée).

III.4.3.2 Variation des seuils de discordance

De même, la variation du seuil de discordance entre 0 et 0,5 avec un seuil de concordance fixé à 0,8 a été réalisée. En général le seuil de discordance est moins important que le seuil de concordance. Les noyaux suivants sont obtenus et schématisés sur la Figure 44:

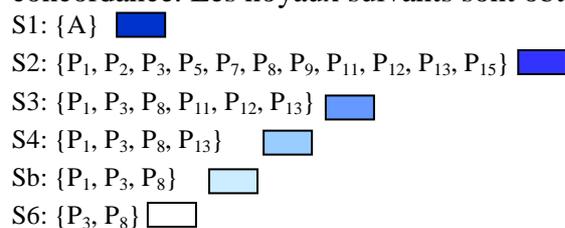


Figure 44: Domaine de validité des différents noyaux selon le seuil de discordance

En augmentant les exigences vis-à-vis de la non-discordance ($\hat{d} \rightarrow 0$), un nombre de plus en plus important de pratiques s'intègre dans le noyau. Cependant celui-ci contient toujours les pratiques P_1 , P_3 et P_8 . Réciproquement, en diminuant les exigences de non-discordance il y a de moins en moins de pratiques surclassantes et de plus en plus de pratiques sont incomparables, c'est à dire ni surclassantes ni surclassées.

III.4.3.3 Variation simultanée des seuils de concordance et de discordance

En faisant varier à la fois le seuil de concordance (de 0,5 à 1) et de discordance (de 0,5 à 0) pour sévérer les conditions de surclassement, le graphique présenté à la Figure 45 est obtenu.

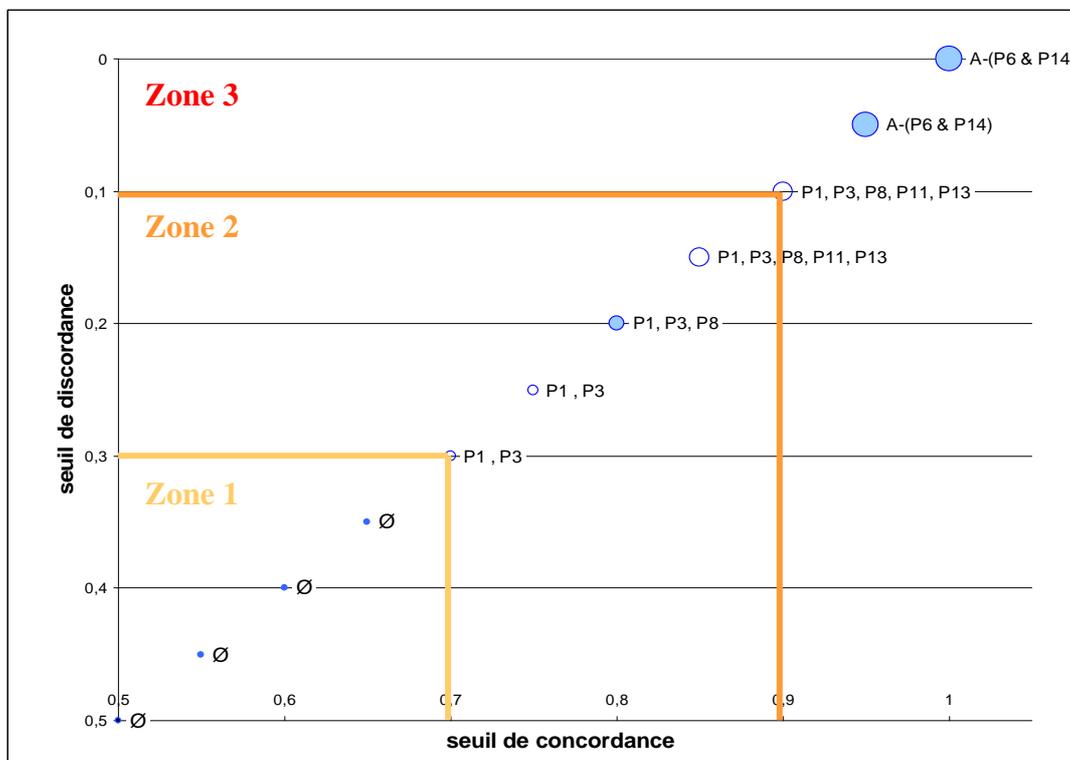


Figure 45: Évolution du noyau avec la sévérification des seuils de concordance et de discordance

Trois zones se dégagent de ce graphique :

- une zone 1 où les conditions de surclassement sont si peu sévères ($0,5 < \hat{c} < 0,7$ et $0,5 < \hat{d} < 0,3$) que toutes les pratiques se surclassent entre-elles. Il en résulte que le noyau est un ensemble vide puisqu'aucune pratique de celui-ci n'en surclasse une autre sans être elle-même surclassée. Il n'y a donc pas de choix possible
- une zone 3 où les conditions de surclassement sont si sévères ($0,9 < \hat{c} < 1$ et $0 < \hat{d} < 0,1$) que la majorité des pratiques ne sont ni surclassées, ni surclassantes. Il en résulte que le noyau est composé d'une grande quantité de pratiques incomparables entre elles. Il n'y a donc pas de choix possible.
- une zone 2 intermédiaire ($0,7 < \hat{c} < 0,9$ et $0,1 < \hat{d} < 0,3$) où seul un petit nombre de pratiques sont surclassantes. Cette zone intermédiaire est optimale pour faire un choix.

Cette analyse de sensibilité valide le choix des seuils $\hat{c} = 0,8$ et $\hat{d} = 0,2$ pour l'outil d'aide aux choix de pratiques de production plus propre et plus sûres.

III.4.3.4 Variation des poids des critères

Pour chaque critère, les poids ont été modifiés successivement sur la plage (0 - 1) en gardant les poids et les échelles des autres critères à leur valeur initiale. Les seuils de concordance et de discordance ont été choisis respectivement à 0,8 et 0,2 suite au test de sensibilité précédent. Les résultats de ce test de robustesse sont présentés sur la Figure 46.

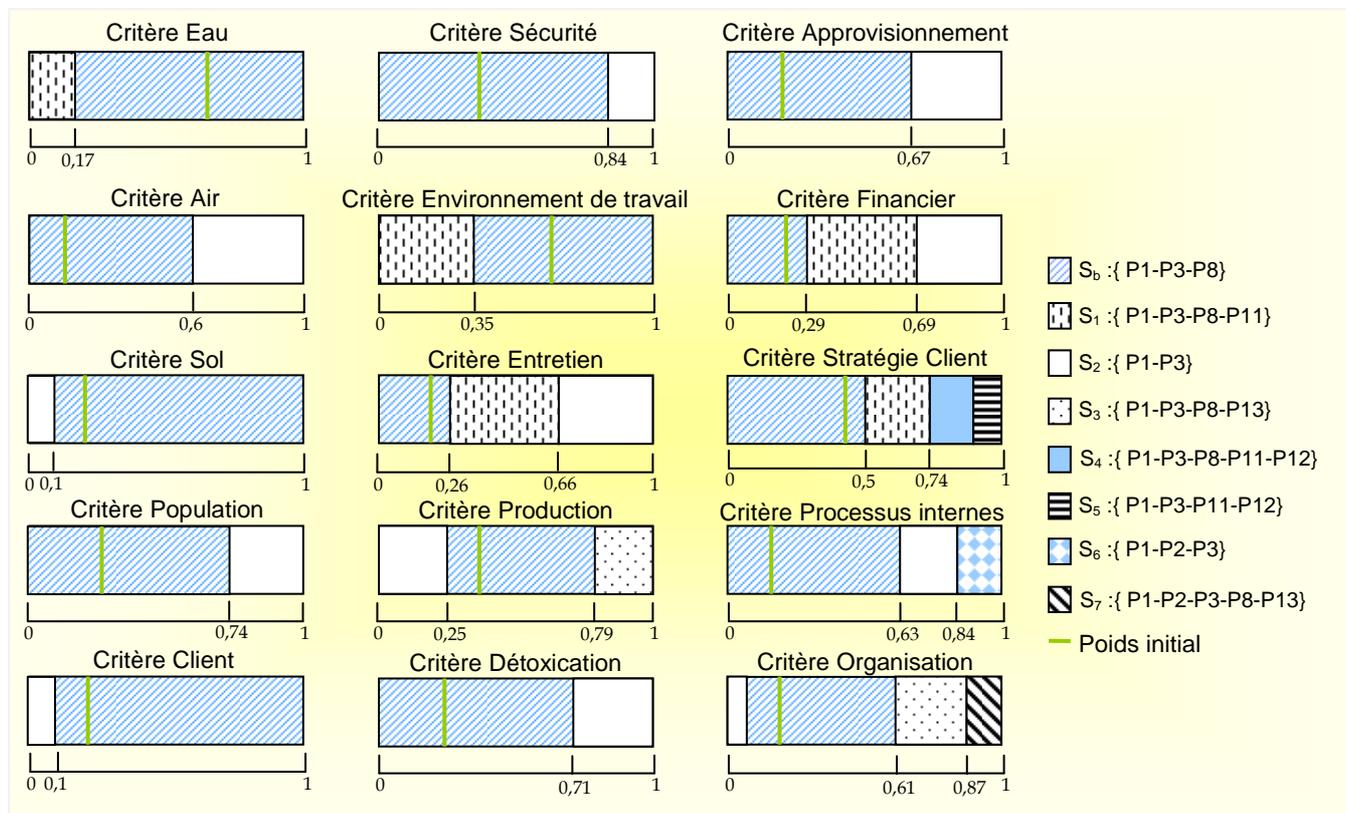


Figure 46: Plages de validité des noyaux avec la variation des poids des critères

La Figure 46 représente les plages de validité des différents noyaux obtenus lors de la variation des poids des critères entre 0 et 1. La solution de départ S_b : $\{P_1, P_3, P_8\}$ représentée par des hachures obliques est robuste puisque les plages de valeurs sont assez larges pour une majorité de critères. Notons cependant qu'une faible augmentation des poids dans les critères « Entretien », « Financier » et « Stratégie client » favoriserait l'apparition du noyau S_1 : $\{P_1, P_3, P_8, P_{11}\}$ représenté par des pointillés verticaux noirs. Ces critères sont donc plus sensibles à une variation de poids.

III.4.3.5 Variation des échelles

Comme il a été précédemment présenté, les évaluations quantitatives dépendent des poids des critères, eux-mêmes associés à une échelle numérique (cf. §II.4.3.2.2). Il a donc été indispensable de déterminer les effets de la variation des échelles attribuées aux critères sur le surclassement.

Pour ce faire, les échelles de chaque critère ont été modifiées successivement en gardant les poids des autres critères à leur valeur initiale ainsi que leurs échelles. Les seuils de

concordance et de discordance ont été choisis respectivement à 0,8 et 0,2 par soucis de cohérence. Les résultats de ce test de robustesse sont présentés dans le Tableau 45 suivant.

Tableau 45 : Résultats de la variation des échelles pour la stratégie Valorisation

Noyaux	{P1-P3-P8}	{P3-P8}	{P1-P3-P8-P13}
Eau	3-7, 2-8, 0-10		
Air	3-7, 2-8, 0-10		
Sol	3-7, 2-8, 0-10		
Population	3-7, 2-8, 0-10		
Client	3-7, 2-8, 0-10		
Sécurité	3-7, 2-8, 0-10		
Environnement de travail	0-10	3-7, 2-8	
Entretien	3-7, 2-8, 0-10		
Production	3-7, 2-8, 0-10		
Détoxification	3-7, 2-8, 0-10		
Approvisionnement	3-7, 2-8, 0-10		
Stratégie client	3-7, 2-8, 0-10		
Financier	3-7, 2-8, 0-10		
Processus internes	3-7, 2-8, 0-10		
Organisation	3-7		2-8, 0-10

L'analyse du Tableau 45 montre que le noyau {P₁, P₃, P₈} reste présent pour la majorité des échelles. Ce noyau est donc robuste quand à la variation des échelles. Cependant deux critères semblent légèrement sensibles aux variations d'échelles. Il s'agit des critères « Environnement de travail », et « Organisation ». Pour le premier il s'agit de la suppression de la pratique P₁ du noyau. Quand ce critère est évalué sur une échelle ayant une faible amplitude, P₃ surclasse P₁. Cela s'explique par le fait que P₁ a une meilleure note que P₃ sur ce critère. En diminuant l'importance de ce critère (diminution de l'amplitude), on crée un surclassement de P₃ sur P₁, ce qui rend cette pratique inadéquate.

Au contraire, en ce qui concerne le critère « Organisation » il y a introduction dans le noyau de la pratique P₁₃ qui n'est plus surclassée par P₃. Cela s'explique par le fait que P₁₃ a une meilleure note que P₃ sur ce critère. En donnant une plus grande importance à ce critère (augmentation de l'amplitude), ce surclassement n'existant plus, cette pratique qui semblait inadéquate devient une pratique à prendre en considération.

III.4.3.6 Variation simultanée des poids et des échelles

Pour chaque critère les poids ont été modifiés successivement sur la plage (0 - 1) en adaptant les échelles du critère considéré en fonction de ce poids. Cela a été réalisé en gardant les poids et les échelles des autres critères à leur valeur initiale. La variation à la fois des poids et des échelles n'a pas sensiblement modifié le noyau.

III.4.3.7 Conclusion sur l'étude de la robustesse

L'étude de la robustesse réalisée a consisté à faire varier les paramètres de base sur lesquels a été développée la méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS.

- Les seuils de concordance et de discordance ont été modifiés de manière isolée puis collectivement. Les résultats de ces modifications valident le choix des seuils $\hat{c}=0,8$ et $\hat{d}=0,2$ pour l'outil d'aide aux choix de pratiques de production plus propre et plus sûres.
- De même, en modifiant les poids des critères, il apparaît que la solution soit robuste puisque les plages de validité des résultats sont très larges.
- En dernier lieu, la variation des échelles attribuées aux critères n'a pas modifié sensiblement les résultats.

La méthode d'aide au choix de pratique est par conséquent une méthode robuste.

III.4.4 Conclusion

La méthode d'aide au choix de pratiques de production plus propre et plus sûre développée dans cette section est basée sur l'application de la méthode d'analyse multicritère ELECTRE I. Pour élaborer cette méthode, 86 pratiques de 4PS ont été recensées, évaluées de manière qualitative vis-à-vis des 15 critères de 4PS. Ces évaluations constituent le cœur de la méthode. En effet, celui-ci demeure inchangé ce qui n'est pas le cas de la matrice quantitative qui dépend des poids attribués aux critères. Lors de l'utilisation de la méthode, l'utilisateur a le choix de comparer plusieurs pratiques (parmi les 86) entre elles en modifiant les poids attribués aux critères en fonction de ses enjeux. La méthode d'aide au choix de pratiques permet d'éclairer les décideurs en proposant des pratiques surclassantes. Néanmoins il n'y a pas de résultat unique puisque la méthode respecte l'intransitivité et l'incomparabilité. L'utilisateur peut également modifier les seuils de concordance et de discordance en fonction de la sévérité qu'il désire accorder aux résultats. Une nouvelle étude de la robustesse est alors nécessaire pour vérifier la validité des résultats. La démarche d'utilisation de la méthode est décrite plus précisément dans la partie IV.

III.5 Conclusion sur la démarche d'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

Cette partie du mémoire avait pour objectif de présenter la démarche d'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS. Les méthodes qui y sont développées s'appuient sur un ensemble de critères de production plus propre et plus sûre.

L'objectif du chapitre III.2 était d'identifier et de structurer ces critères. Ce travail a nécessité en premier lieu une réflexion sur les contraintes et objectifs de l'évaluation ainsi que la recherche d'une démarche structurée. Cette réflexion a abouti à l'identification de l'utilisateur principal des méthodes (le chef d'entreprise), et du domaine sur lequel se porte cette évaluation (l'entreprise et son environnement). De plus, l'utilité d'une approche top-down a été démontrée. La mise en œuvre de cette approche top-down a consisté tout d'abord à modéliser les systèmes étudiés. Cette modélisation s'inspire à la fois du modèle MADS/MOSAR proposé par Périlhon (2003), et du modèle de typologie des risques proposé par Dassens (2007). La modélisation de l'entreprise a abouti à l'identification des sous-systèmes cibles de l'implémentation d'une pratique de 4PS. À partir du modèle élaboré, 15 critères de 4PS ont été identifiés en utilisant notamment la grille des systèmes sources de danger de la méthode MOSAR ainsi qu'une analyse fonctionnelle de l'atelier de traitement de surface réalisée avec la méthode SADT. En dernier lieu les critères de 4PS ont été pondérés. Cette pondération est basée sur une expertise (questionnaire) ainsi que l'utilisation de la méthode d'analyse multicritère MHM.

Toute cette structuration avait pour objectif d'une part d'identifier et d'organiser les indicateurs de 4PS permettant le diagnostic des impacts des pratiques de 4PS. D'autre part ces critères servent de base pour la méthode d'aide au choix d'une (de) pratiques adaptées (Figure 47).

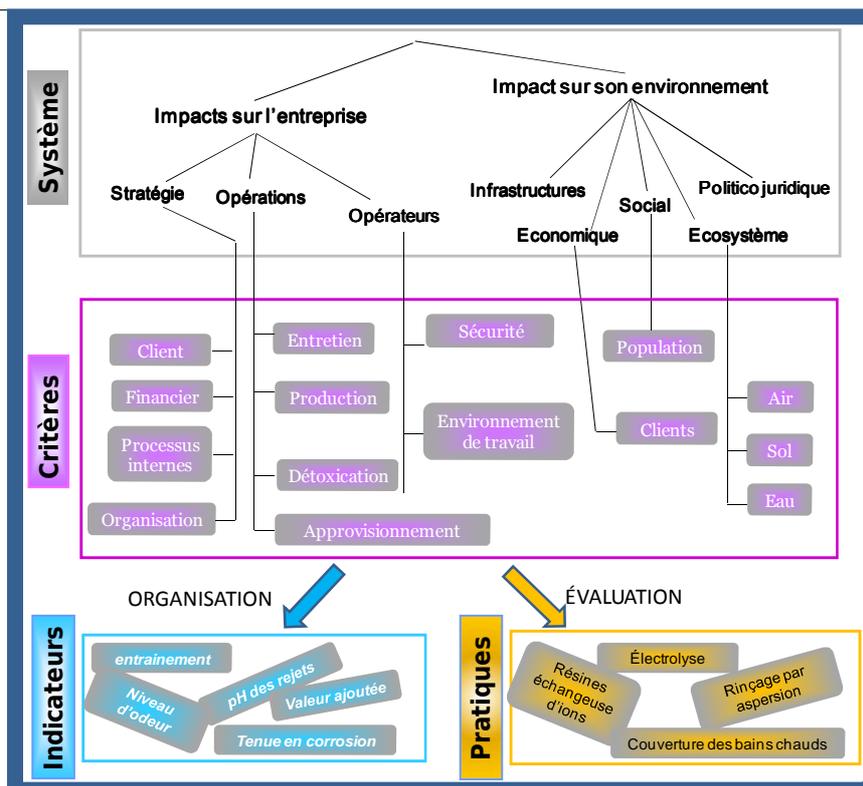


Figure 47 : Structure des méthodes proposées

Ainsi, dans le chapitre III.3, ont été présentées les différentes étapes de la construction de la méthode de diagnostic :

- ➔ L'identification des indicateurs qui a reposé sur l'association d'une étude bibliographique à une étude de terrain (visite sur site, entretien avec les industriels). Cette identification a permis de recenser près de 200 indicateurs potentiels.
- ➔ La sélection de 42 indicateurs au travers d'une grille de sélection multicritère.
- ➔ L'analyse des relations entre les indicateurs de 4PS via l'utilisation de la méthode MICMAC. À l'issue de cette étape les indicateurs clefs du système ont été identifiés (entraînement, productivité opérationnelle, valeur ajoutée, taux de productivité et fréquence des accidents du travail), la stabilité du système d'indicateur a été démontrée, et enfin le nombre d'indicateurs réduit (38 indicateurs de 4PS).
- ➔ En dernier lieu l'organisation et la formalisation des 38 indicateurs retenus ont conclu la construction de la méthode de diagnostic.

Le chapitre III.4 a permis de développer une méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS à partir de la méthode ELECTRE I. La construction de cette méthode a nécessité la recherche et la sélection des pratiques. 86 pratiques de 4PS ont été retenues pour cette méthode. Elles ont alors été évaluées vis-à-vis des critères de 4PS. L'évaluation a consisté en une expertise qualitative, puis à la transformation de cette expertise en notes. Le calcul de l'incertitude de l'évaluation a permis de s'affranchir de la part de subjectivité liée aux évaluations qualitatives. En dernier lieu, nous avons mis en évidence la robustesse de la méthode développée en faisant varier les valeurs initiales des paramètres de la méthode (seuils, poids, échelles).

La quatrième et dernière partie de ce mémoire s'attachera à décrire l'utilisation de la méthodologie ainsi élaborée et à la valider par le biais de cas d'étude.

Partie III : Démarche d'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS
Chapitre III.5: Conclusion sur la démarche d'élaboration de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

**PARTIE IV : DÉMARCHE
D'UTILISATION ET VALIDATION DE LA
MÉTHODOLOGIE AU TRAVERS DE CAS
D'ÉTUDE**

Partie IV : Démarche d'utilisation et validation de la méthodologie au travers de cas d'étude

Chapitre IV.1 : Démarche d'utilisation de la méthodologie et des outils d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

IV.1 Démarche d'utilisation de la méthodologie et des outils d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

IV.1.1 Démarche générale d'utilisation la méthodologie

Dans ce mémoire, une méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de production plus propre et plus sûres a été développée. Cette méthodologie regroupe deux méthodes :

→ une méthode de diagnostic des impacts de l'entreprise basée sur un système d'indicateur de 4PS

→ une méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS basée sur un outil d'analyse multicritère

Ces méthodes s'adressent aux entreprises exerçant des activités de traitement et revêtement des métaux par voie aqueuse qu'ils soient façonniers ou intégrés. Elles concernent plus particulièrement le chef d'entreprise car celui-ci apparaît le mieux placé pour la prise de décision en faveur de l'environnement (cf. § III.2.1.1). L'utilisation de cette méthodologie est formalisée et organisée par une démarche décrite ci-dessous et schématisée par la Figure 48.

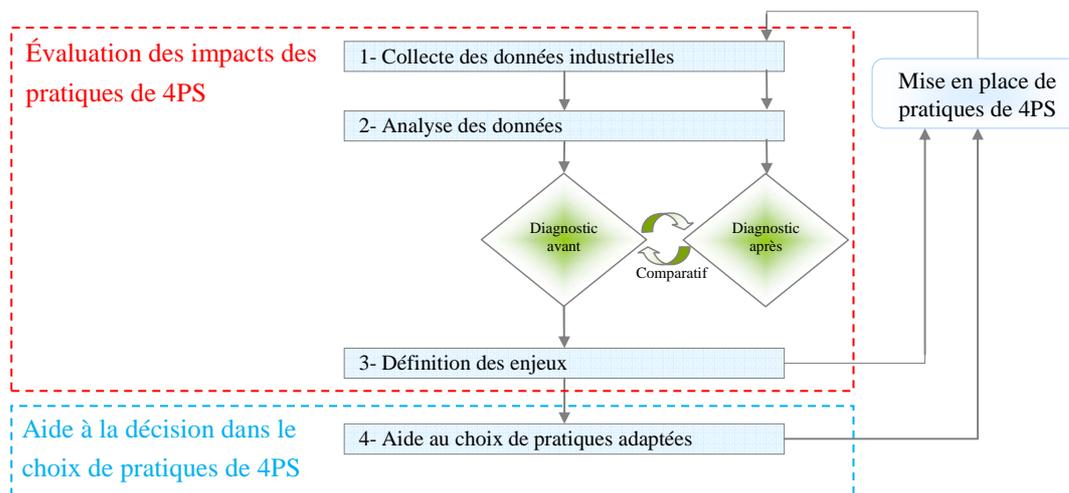


Figure 48: Schéma de la démarche d'utilisation de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

Comme le montre la Figure 48, cette démarche se déroule en 4 étapes principales:

- Collecte des données industrielles
- Analyse des données
- Définition des enjeux
- Aide au choix de pratiques adaptées.

Les trois premières étapes de la démarche proposée correspondent à l'utilisation de la méthode de diagnostic des impacts de pratiques de 4PS, tandis que la quatrième et dernière étape concerne la méthode d'aide à la décision dans le choix de pratiques adaptées. Les méthodes d'évaluation des impacts et d'aide au choix de pratiques de 4PS, bien que basées sur des critères communs, peuvent être utilisées indépendamment l'une de l'autre. Plusieurs cas de figure d'utilisation peuvent être envisagés :

→ L'industriel réalise un diagnostic de son entreprise. Cet état des lieux l'éclaire sur ses principaux enjeux en matière d'amélioration (étapes 1, 2 et 3).

- L'industriel réalise un diagnostic de son entreprise. Sur la base de cet état des lieux, il définit ses principaux enjeux en matière d'amélioration et décide la mise en place d'une pratique de 4PS. Suite à cette implémentation, un second diagnostic est réalisé et une étude comparative permet de visualiser les évolutions (étapes 1, 2, 3 puis 1, 2).
- L'industriel réalise un diagnostic de son entreprise. Sur la base de cet état des lieux, il définit ses principaux enjeux en matière d'amélioration. En utilisant la méthode d'aide au choix il cible les pratiques de 4PS répondant au mieux à ses enjeux et décide la mise en place d'une pratique de 4PS. Suite à cette implémentation, un second diagnostic est réalisé et une étude comparative permet de visualiser les évolutions (étapes 1, 2, 3, 4 puis 1, 2).
- L'industriel utilise la méthode d'aide au choix pour comparer des pratiques de 4PS (étape 4).

Dans la section suivante, les différentes étapes de la démarche ainsi que les différents outils associés seront présentés.

IV.1.2 Démarche de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS

L'utilisation de la méthode d'évaluation des impacts des pratiques de production plus propre et plus sûre va permettre aux industriels d'obtenir un premier état des lieux de leur entreprise, de vérifier leur conformité réglementaire (outil de diagnostic) mais également de mettre en avant les principaux enjeux de l'entreprise pour la mise en place de plans d'actions (outil d'évaluation). Il est à noter que l'objectif recherché n'est pas de se positionner en situation de contrôle des entreprises mais plutôt en situation de conseil en présentant notamment la maîtrise de la production et la maîtrise des impacts comme un plus pour l'entreprise. Les trois étapes de la méthode sont décrites dans les paragraphes suivants.

IV.1.2.1 Étape 1 : Collecte des données

La collecte des données repose essentiellement sur des entretiens avec l'industriel, des visites d'ateliers, des enquêtes auprès des opérateurs et sur les documents internes de ces ateliers (fiches de bain, fiches de données de sécurité, bilan de fonctionnement...etc.). Ce recueil de données de terrain est réalisé tant au niveau des chaînes de traitement, que de l'entreprise elle-même avec notamment une **fiche de recueil des données** conçue à cet effet (Figure 49). Les informations renseignées sont de plusieurs types. Il s'agit par exemple du volume des bains, de la température ou encore du pH des rejets, des phrases de risque des produits chimiques utilisées...etc. L'objectif principal de cette collecte est de connaître les caractéristiques des différents bains, le déroulement des opérations, le fonctionnement global de l'entreprise, et les flux de matière et d'énergie mis en jeu.

Partie IV : Démarche d'utilisation et validation de la méthodologie au travers de cas d'étude
 Chapitre IV.1 : Démarche d'utilisation de la méthodologie et des outils d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

Fiche de prise de données Evaluation des impacts liés aux pratiques de 4PS															
Description globale de l'entreprise															
Nom de la société															
Type d'atelier															
OPERATEURS			STRATEGIE					AUTRE							
Effectif total de l'entreprise			chiffre d'affaire annuel 2008 (€)					Energie moyenne consommée par jour (kW/j)							
Nombre moyen de personnes sont présentes par mois			Coûts de production (maintenance, achats)					Nombre de rebuts							
Nombre de personnel formé			Investissement annuel en matériel					Niveau sonore à l'extérieur							
Nombre d'accidents sur les 6 derniers mois			Production par jour (m2)					émergence extérieure							
Nombre d'heures travaillées durant les 6 derniers mois			Capacité de production estimée (m2/jour)												
Niveau sonore mesuré dans l'atelier															
Masse salariale (€)															
Description globale des opérations															
Temps requis pour le traitement d'un m2 de surface (min)															
Y a t il une station d'épuration ?															
Type de traitement d'élimination in situ ?	déchromatation														
	décyanuration														
	neutralisation														
	floculation														
	décantation														
	autre:...														
Quantité de déchets générés (t/an)															
Quantité de déchets réutilisés (t)															
Niveau d'odeur dans l'atelier		Pas d'odeur	Non gêné	Peu gêné	Géné	Très gêné	Extrêmement gêné								
rejets aqueux	élément	pH	température	consommation spécifique Q	volume d'effluent traité par jour	Ag	Al	As	Cd	Cr VI	Cr III	Cu	Fe	Hg	Ni
	surveillé? Oui/non														
	valeur réglementaire														
	valeur mesurée														
	état de conformité														
	élément	Azote global	CN (aisément libérables)	Tri-butyle-phosphate	Indice hydrocarbure	Zn	MES	AOX	F	Nitrites	DBO5	P	DCO	Sn	Pb
	surveillé?														
	valeur réglementaire														
	valeur mesurée														
	état de conformité														
rejets gazeux	élément	Acidité totale exprimée en H	HF, exprimé en F	NOx, exprimés en NO ₂	Alcalins, exprimés en OH	Ni	CN	SO ₂	NH ₃	Cr VI	Cr total				
	surveillé? Oui/non														
	valeur réglementaire (mg/m3)														
	valeur mesurée (mg/m3)														
	état de conformité														

Figure 49: Extrait de la fiche de recueil des données

IV.1.2.2 Étape 2 : Analyse des données

IV.1.2.2.1 Démarche de calcul

Cette étape concerne le traitement des données recueillies dans l'étape précédente. Les données recueillies sont en fait les paramètres utilisés pour le calcul des 38 indicateurs de 4PS permettant de quantifier les différents impacts de l'entreprise (cf. ANNEXE 8). Une fois ces indicateurs i_{4PS} calculés ils sont comparés à leurs échelles respectives pour en déduire la note $N_{i_{4PS}}$ correspondante sur l'échelle. Ces indicateurs alimentent les 15 critères de production plus propre et plus sûre décrits précédemment. Rappelons que les indicateurs d'un critère sont considérés équivalents c'est-à-dire que si le critère est défini par n indicateurs, chaque indicateur compte pour

Partie IV : Démarche d'utilisation et validation de la méthodologie au travers de cas d'étude

Chapitre IV.1 : Démarche d'utilisation de la méthodologie et des outils d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

1/n de la note de ce critère. L'impact au niveau de chaque critère IC_x (%) est alors obtenu par l'équation suivante:

$$IC_x = \frac{1}{n} \times \frac{\sum_{i=1}^n Ni_{4PS}}{N_{max}} \times 100 \quad (\text{Équation 10})$$

avec x : critère considéré
n : nombre d'indicateurs alimentant le critère
 N_{max} : note maximale de chaque indicateur sur son échelle qui est de 10

Les résultats de ce calcul sont alors visualisés sur un diagramme radar appelé **profil d'impact d'une entreprise** (Figure 50). Ce diagramme représente la performance de chaque critère par rapport à la performance «maximale». Cette performance maximale est atteinte si tous les indicateurs de l'ensemble des critères ont la valeur maximale de leurs échelles respectives. Le choix de ce type d'affichage des résultats s'est fait en concertation avec les industriels qui ont jugé plus parlante la visualisation sur un diagramme radar. De plus il a été décidé d'afficher prioritairement les aspects positifs de l'entreprise plutôt que ses impacts afin de suggérer les pistes d'amélioration plutôt que de pointer du doigt les aspects négatifs. Ainsi, plus le pourcentage pour un critère est élevé, meilleure est la performance sur le critère considéré.

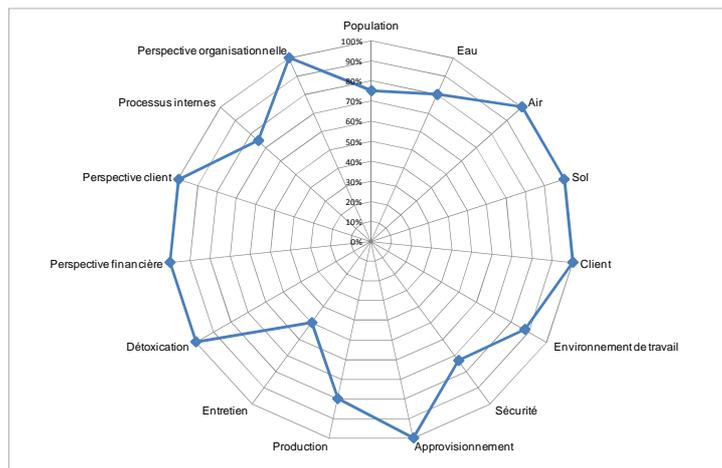


Figure 50 : Exemple de profil d'impact d'une entreprise

Le profil d'impact fictif présenté à titre d'exemple montre que :

- Globalement les critères Air, Sol, Client, Approvisionnement, détoxification, Perspective financière et Perspective client ont une très bonne performance.
- De plus des pistes d'amélioration se dessinent : amélioration des impacts au niveau des critères Population, Eau, Processus Internes, Entretien, Production, Sécurité et Environnement de travail.

IV.1.2.2.2 Exemple de calcul

➔ Données du terrain :

- DCO = 180mg/l
- DBO₅ = 85mg/l

➔ Calcul de la valeur de l'indicateur « Indice de biodégradabilité des rejets aqueux » ou $I_{biodég}$ avec:

Partie IV : Démarche d'utilisation et validation de la méthodologie au travers de cas d'étude

Chapitre IV.1 : Démarche d'utilisation de la méthodologie et des outils d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

$$I_{\text{biodég}} = \frac{\text{DCO}}{\text{DBO}_5} \quad (\text{Équation 11})$$

$$I_{\text{biodég}} = 2,12$$

→ Comparaison de la valeur de l'indicateur à son échelle :

- $I_{\text{biodég}} < 2$: facilement biodégradable → note de 10 sur l'échelle
- $I_{\text{biodég}} < 3$: biodégradable → note de 5 sur l'échelle
- $I_{\text{biodég}} > 3$: non biodégradable → note de 0 sur l'échelle

L'indicateur $I_{\text{biodég}}$ correspond à l'attribut biodégradable. Cet attribut a une note de 5 sur l'échelle [0-10] donc la note correspondant à l'indicateur « Indice de biodégradabilité des rejets aqueux », $N_{I_{\text{biodég}}} = 5$

→ Calcul de l'impact au niveau du critère IC_{eau}

L'indicateur $I_{\text{biodég}}$ alimente le critère EAU avec quatre autres indicateurs :

- pH des rejets (pH),
- température des rejets (T)
- charge toxique et polluante rejetée dans l'eau (C_e)
- suivi de charge toxique et polluante rejetée dans l'eau (SC_e).

Sa contribution est donc de 1/5 pour ce critère. Le calcul de l'impact du critère IC_{eau} s'effectue comme suit :

$$IC_{\text{eau}} = \frac{(N_{\text{pH}} + N_{I_{\text{biodég}}} + N_T + N_{C_e} + N_{SC_e})}{5 \times 10} \quad (\text{Équation 12})$$

Avec N_{pH} , $N_{I_{\text{biodég}}}$, N_T , N_{C_e} et N_{SC_e} respectivement les notes attribuées aux indicateurs pH, $I_{\text{biodég}}$, T, C_e , et SC_e respectivement sur leur échelle correspondante.

Étant donné le nombre de calculs nécessaires pour réaliser le diagnostic de l'entreprise, un tableau de bord d'indicateurs prototype a été construit pour simplifier la démarche (Figure 51). Dans cet outil, seules les données récoltées à l'étape 1 sont à insérer (flèche rouge), l'outil affiche alors directement le diagramme radar présentant les résultats du diagnostic de l'entreprise.

Partie IV : Démarche d'utilisation et validation de la méthodologie au travers de cas d'étude
Chapitre IV.1 : Démarche d'utilisation de la méthodologie et des outils d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

DONNEES / PARAMETRES	VALEUR PARAMETRE	INDICATEUR	UNITES	VALEUR INDICATEUR	ECHELLE	CONFORMITE	NOTE ECHELLE	CRITERE	Impact	PONDS CRITERE PC	IMPACT CRITERE IC
Niveau sonore mesuré à l'extérieur	42	Mesure du bruit à l'extérieur de l'atelier	NS1	dB(A)	échelle réglementaire: émergence en semaine de 7h à 22h	conforme	10	Population	0,5	1	0,50
émergence	5			5				Eau	0,9	0,65	0,90
Niveau sonore mesuré dans l'atelier	40	Mesure du bruit à l'intérieur	NS2	sans dimension	Niveau de gêne	calme	10	Air	1	0,13	1,00
pH des rejets	7,65	pH des rejets	pH	sans dimension	pH réglementaire	conforme	10	Sol	1,00	0,21	1,00
température	16,9	température des rejets	T	°C	T réglementaire	conforme	10	Client	1	1	1,00
DCO	180	Indice de biodégradabilité des rejets en eau	biolog	sans dimension	biodégradabilité	biodégradable	5	Environnement de travail	0,88	0,63	0,88
DBO5	85			2,12				Sécurité	0,73	0,37	0,73
Concentration du bain de traitement le plus contraignant à t=0, Cb (g/L)	Non nécessaire	Entrainement (ml/m2)	e	L/m2	2,64	Indicateur de suivi	10	Approvisionnement	1	0,2	1,00
Concentration dans le bain de rinçage associé à t=0, Cr0 (g/L)								Production	0,80	0,37	0,80
Concentration dans le bain de rinçage associé à t=0, Cr(t) (g/L)								Entretien	0,5	0,19	0,50
Surface des pièces rincées entre t= et t=0, S (m2)								Détoxification	1	0,24	1,00
Volume du bain de rinçage, V								Perspective financière	0,665	0,22	0,67
nombre d'heures de tenue au brouillard salin en rouille blanche (h)	70	Caractéristiques anti-corrosion	BS	heures	70	Classe du cahier des charges	très bon	Perspective client	1	0,43	1,00
niveau global de risques (voir tables)	IV	Niveau global de risques	NGR	sans dimension	IV	5 niveaux de risque : niveau I très haut; niveau II haut; niveau III moyennement; niveau IV moyennement bas; niveau V très bas; niveau VI très bon.	moyennement bas	Processus internes	0,75	0,16	0,75

Figure 51 : Aperçu du tableau de bord de diagnostic des impacts de pratiques de 4PS

IV.1.2.3 Étape 3 : Définition des enjeux

L'analyse des données a conduit au diagnostic de l'entreprise. La définition des enjeux est une étape clef de la méthodologie proposée car elle est une base de discussion entre les différents acteurs (donneurs d'ordre, experts...). Cette discussion a pour objectif :

- ➔ la validation des choix déjà engagés par le chef d'entreprise,
- ➔ la mise en évidence des points perfectibles et des pistes d'amélioration,
- ➔ l'établissement des priorités en matière d'amélioration à réaliser ou envisager.

D'après le profil d'impact précédent (Figure 50), il semble que les actions à mener pour améliorer les performances de l'entreprise doivent s'intéresser à la diminution des impacts sur la population et à la maîtrise de l'entretien par exemple.

Or la décision n'est pas uniquement rationnelle. Desthieux (2005) montre que « les motivations et raisons pour agir sont établies en fonction de croyances, de normes, et de valeurs qui se manifestent à travers les représentations qu'un acteur construit à partir d'une réalité perçue » [DESTHIEUX, 2005]. Par conséquent, l'étape de définition des enjeux permet de cibler les impacts prédominants de l'entreprise mais laisse l'industriel libre dans son choix ou non de mise en place de pratiques de production plus propre et plus sûre.

IV.1.2.4 Étapes 1-2 bis : Étude comparative des niveaux d'impacts

Après la mise en place d'une pratique de production propre un nouveau diagnostic doit être réalisé. Pour cela, il est nécessaire de refaire les étapes 1 et 2 avec les données liées à la nouvelle configuration de l'entreprise. Ainsi l'étude comparative des 2 niveaux d'impacts (en amont et en aval de l'implémentation de la pratique de 4PS) permet :

- **De vérifier que la pratique de production propre a bien les effets escomptés.** Par exemple si l'objectif de la pratique visait à minimiser les nuisances sonores pour la population, le second diagnostic permettra de visualiser cette réduction d'impact (Figure 52).
- **D'évaluer les autres impacts de cette pratique** sur l'entreprise et son environnement. Par exemple si l'utilisation de la pratique minimisant les nuisances sonores ne fait pas apparaître une plus grande nécessité d'entretien (Figure 52).

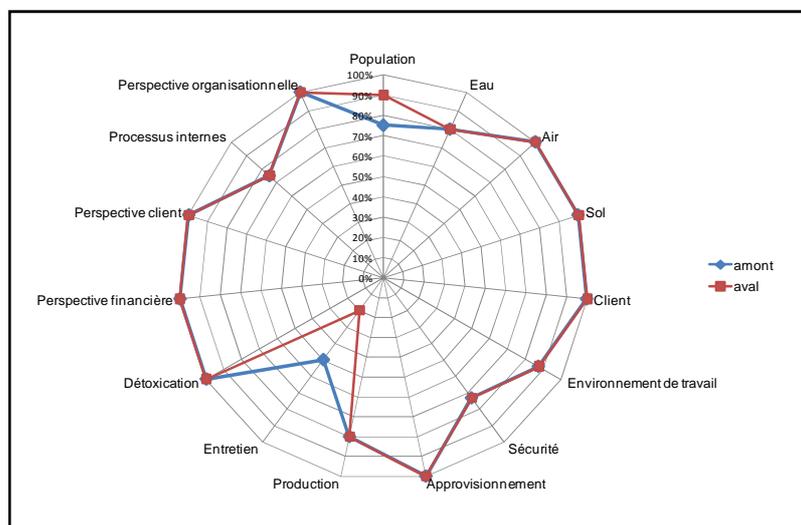


Figure 52 : Exemple de profil d'impact de l'entreprise en amont et en aval de l'implémentation

- **De déterminer l'impact de la mise en œuvre de la pratique sur la performance globale** de l'entreprise

Pour ce faire un indice de performance de l'implémentation de la pratique de 4PS sur l'entreprise et son environnement est calculé:

- Tout d'abord l'impact sur la performance globale de l'entreprise et de son environnement, est calculé. Pour ce faire, l'impact de chaque critère IC_x est pondéré au niveau des systèmes « entreprise » et « environnement »:

$$IPC_x = IC_x \times P_x \quad \text{(Équation 13)}$$

avec x : critère considéré
 IPC_x : impact pondéré du critère x
 P_x : poids du critère x au niveau de l'entreprise

Il est à noter que P_x est le produit des poids au niveau de chaque critère par celui du sous-système considéré.

- La performance globale de l'entreprise correspond alors à la somme totale des IPC_x .

$$\mathbf{Perf} = \sum_{x=1}^{15} \mathbf{IPC}_x \quad (\text{Équation 14})$$

- L'indice de performance de l'implémentation de la pratique de 4PS sur l'entreprise et son environnement est alors établi selon l'équation 14 :

$$\mathbf{I_{Perf}} = \frac{\mathbf{Perf_{finale}} - \mathbf{Perf_{initiale}}}{\mathbf{Perf_{finale}}} \quad (\text{Équation 15})$$

Si $I_{Perf} < 0$ alors l'implémentation de la pratique de 4PS a amélioré globalement la performance de l'entreprise

Si $I_{Perf} > 0$ alors l'implémentation de la pratique de 4PS a amélioré globalement la performance de l'entreprise.

- **D'identifier les éventuels nouveaux enjeux pour l'industriel.** De cette façon l'outil peut s'intégrer dans une démarche d'amélioration continue pour la mise en place de pratiques de production plus propre et plus sûre au sein de l'entreprise.
- **D'améliorer la connaissance des pratiques de production plus propre,** connaissance qui pourra être réinjectée au niveau de l'outil d'aide à la décision pour la mise à jour de l'évaluation qualitative des pratiques. Leroy (2001) parle du «*gain à tirer de la connaissance a priori du résultat d'une action déjà vécue, moyennant la connaissance du contexte*» [CHAUDET-BRESSY, 2002].

IV.1.3 Démarche d'aide à la décision dans le choix d'une pratique de 4PS

IV.1.3.1 Étape 4 : Aide au choix de pratiques de 4PS

L'utilisation de la méthode d'aide au choix permet aux industriels de sélectionner les pratiques de production propre répondant au mieux à leurs enjeux. Pour cela, la méthode compare les performances des pratiques de 4PS sur les 15 critères de production plus propre et plus sûre. La pratique ayant la meilleure performance globale sur l'ensemble des critères en fonction des enjeux du décideur est celle qui est préconisée. Cette aide au choix basé sur la méthode d'analyse multicritère ELECTRE I est réalisée par un outil informatique prototype (Figure 53). Le fonctionnement de cet outil est décrit succinctement dans les paragraphes suivants ; la notice d'utilisation de l'outil est présentée en l'ANNEXE 11.

Partie IV : Démarche d'utilisation et validation de la méthodologie au travers de cas d'étude

Chapitre IV.1 : Démarche d'utilisation de la méthodologie et des outils d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Critères de 4PS			Eau	Air	Sol	Population	Client
2								
3	Poids			0,65	0,13	0,21	0,27	0,22
4	Echelle			0-10	3-7	3-7	2-8	3-7
5								
6	Tableau 1b: Pratiques de production propre et leur évaluation aux yeux des critères							
7	emplacement d'intrant (RI)	Pratiques		Notes				
8								
9		Substitution des couches de conversion/passivation au chrome (VI) par des revêtements de conversion au chrome (III)	Pratique 1	7,5	7	6	6,5	4
10		Chromage à Froid	Pratique 2	7,5	6	5	2	6
11		Substitution du chromage hexavalent par le chromage trivalent à base de chlorures	Pratique 3	7,5	7	6	6,5	4
12		rinçage chimique ou procédé de lancy	Pratique 4	7,5	5	5	5	5
13		substitution dégraissages aux solvants chlorés par dégraissage aqueux ou solvants pétroliers	Pratique 5	7,5	6	4	6,5	4
		substitution des formulations de bain de zincage cyanuré en bain de zincage	Pratique 6	10	7	7	8	6

Figure 53: Extrait de l'outil informatique d'aide au choix

1. L'utilisateur **choisit les pratiques** qu'il souhaite comparer parmi les 86 pratiques de 4PS que fournit l'outil.
2. À la suite de cette sélection, il **attribue des poids aux critères**, dans la fourchette [0-1], en fonction de ses enjeux. Par exemple, si l'enjeu majeur pour l'industriel est la diminution des nuisances vis-à-vis de la population (critère POPULATION) et qu'il ne peut pas faire un gros investissement (critère FINANCIER), il lui suffit d'attribuer des poids plus importants sur ces 2 critères tout en diminuant les exigences sur les autres critères. Comme il a été dit au paragraphe III.4.2.1.2, l'évaluation semi-quantitative va être transformée en évaluation quantitative à partir de l'échelle associée aux critères, échelle qui elle-même est tributaire du poids du dit critère. Par conséquent, la modification du poids du critère entraîne automatiquement la modification de la valeur quantitative de l'évaluation (b sur l'échelle [0-10] ≠ b sur l'échelle [3-7]).
3. L'utilisateur **modifie ensuite les seuils de concordance et de discordance** s'il veut durcir ou au contraire mollir les conditions de surclassement. Ainsi l'outil sélectionne les pratiques dites «surclassantes» selon la méthode présentée dans la partie III, c'est-à-dire meilleures sur une majorité de critères. Pour l'exemple précédent il s'agit des pratiques ayant un bon effet sur les nuisances tout en présentant un investissement faible. Le surclassement est alors affiché dans un tableau au moyen d'une croix (Figure 54), cependant le graphe des résultats doit être fait manuellement. Ce tableau montre que la pratique P3 surclasse P2, P4 et P5 par exemple

Partie IV : Démarche d'utilisation et validation de la méthodologie au travers de cas d'étude

Chapitre IV.1 : Démarche d'utilisation de la méthodologie et des outils d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

Tableau : Établissement des relations de surclassement						
	Seuils de surclassement 0,7/ 0,2/ 0,1					
	Surclassement	Pratique P1	Pratique P2	Pratique P3	Pratique P4	Pratique P5
	Pratique P1					
	Pratique P2			x		
	Pratique P3					
	Pratique P4			x		
	Pratique P5			x		

Figure 54 : Tableau d'établissement des relations de surclassement

4. L'outil informatique présenté ici est basé sur des notes qui ont été attribuées à partir d'une évaluation qualitative des pratiques. Dans le but d'affiner son choix entre deux ou trois pratiques, le décideur peut **accéder à l'évaluation qualitative**. Ainsi il peut connaître les impacts réels des pratiques envisagées et aller plus loin dans son choix, ce que ne permet pas l'évaluation quantitative basée sur de l'attribution de notes. Pour illustrer ce propos prenons le nouvel exemple suivant. L'industriel hésite entre deux pratiques « chromage à froid » et « substitution du chromage hexavalent par du chromage trivalent » qui sont toutes deux surclassantes mais incomparables entre elles. En consultant les évaluations qualitatives relatives à ces deux pratiques (Tableau 46), il peut décider que sur le critère Sécurité par exemple, la diminution de l'acide chromique dans l'air représente un impact significatif plus que la minimisation de l'évaporation et par conséquent choisir la substitution du chromage hexavalent.

Tableau 46 : Évaluations qualitatives de deux pratiques incomparables

Pratique	Description	Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité
Substitution du chromage hexavalent par le chromage trivalent à base de chlorures	Cr(VI) est le métal le plus largement utilisé mais les inquiétudes concernant sa toxicité et son utilisation vont grandissantes. L'alternative la plus largement utilisée est le Cr(III)	Réduction de la toxicité sur l'environnement	Réduction des exigences de traitement de la pollution atmosphérique	Diminution du risque de contamination des sols par du Cr(VI)	Réduction de la toxicité sur l'environnement, meilleure image de l'entreprise	Résistance de corrosion inférieure, teinte des pièces différente pouvant ne pas satisfaire le client	Réduction des risques liés à la santé dus à la diminution de l'acide chromique dans l'air ambiant de l'atelier
Chromage à Froid	La température du bain de traitement Cr(VI) est maintenue à 18° par un système réfrigérant, et réduction de la concentration de 50%	Réduction de la consommation d'eau	Minimisation de l'évaporation de la solution	-	Mauvaise image du chrome VI	Meilleure qualité, pas d'apparition de rebord blanc	Minimisation de l'évaporation de la solution, réduction de l'exposition des employés, mais toujours du Cr(VI)

L'outil d'aide au choix d'une pratique de production plus propre n'a pas vocation de remplacer les décideurs ou les experts, mais plutôt d'éclairer leur choix en fonction de l'importance qu'ils accordent aux différents critères. Une étude de faisabilité technique et économique est alors indispensable pour vérifier que la mise en œuvre de la pratique de 4PS est cohérente avec la stratégie et les moyens de l'entreprise.

IV.1.4 Synthèse de la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

La méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS est mise en œuvre en quatre étapes principales. Il s'agit de:

- ➔ La collecte des données réalisée en utilisant la grille de collecte des données,
- ➔ L'analyse de ces données notamment par le biais d'un outil de diagnostic,
- ➔ La définition des enjeux à partir du profil d'impact de l'entreprise,
- ➔ L'**aide au choix de pratiques** en utilisant l'outil informatique d'aide au choix

Afin de valider la méthodologie et les outils proposés, la démarche a été mise en œuvre par le biais de quatre cas d'étude qui seront développés dans le chapitre suivant.

IV.2 Validation des méthodes et outils proposés

Quatre études de cas ont contribué à tester puis à valider la méthodologie d'évaluation des impacts de pratiques de production plus propre et plus sûre. Cette méthodologie a en effet été appliquée à des ateliers de traitement de surface des métaux façonniers et intégrés. Ce chapitre se subdivise en trois sections.

Le premier s'intéresse à la validation de l'outil de diagnostic. Cette validation est proposée au travers des trois cas d'études suivant :

- La substitution d'un bain de passivation au chrome VI par un bain de passivation au chrome III dans un atelier façonnier
- L'état des lieux d'un atelier intégré
- L'état des lieux d'un atelier façonnier

Nous présenterons donc dans ce chapitre le contexte général de ces différentes études, avant d'appliquer la méthode de diagnostic.

Le second chapitre concerne la validation de l'outil d'aide à la décision. La mise en œuvre d'un pilote de résines échangeuses d'ions dans un atelier façonnier sert de base à cette validation.

Dans le dernier chapitre nous proposons une discussion sur les avantages et limites de la méthodologie et des outils d'évaluation des impacts proposés dans ce mémoire de thèse.

IV.2.1 Validation de la méthode de diagnostic des impacts

IV.2.1.1 Cas d'étude 1 : Substitution d'un bain de passivation au chrome VI par un bain de passivation au chrome III dans un atelier intégré

IV.2.1.1.1 Contexte de l'étude

La Société A est un atelier façonnier qui réalise le traitement de surface de pièces à des fins décoratives et techniques. Ses clients sont issus de divers secteurs: électronique, mobilier médical, électroménager, robinetterie, automobile entre autres. Cet atelier possède six chaînes de traitement:

- 2 chaînes de zingage fonctionnant en automatique
- 1 chaîne d'argenture fonctionnant en automatique
- 1 chaîne de nickelage fonctionnant en automatique
- 1 chaîne d'argenture manuelle
- 1 chaîne de nickelage manuelle

Très soucieuse de ses impacts environnementaux la société A met en place régulièrement des actions visant à les réduire. C'est ainsi, qu'elle a souhaité remplacer un bain de passivation au chrome VI par un bain de passivation au chrome III et a souhaité réaliser le diagnostic de l'installation en amont et en aval de l'implémentation.

IV.2.1.1.2 Mise en œuvre

IV.2.1.1.2.1 Collecte des données

L'étape de collecte des données de l'entreprise A a nécessité un délai assez long. En effet, les informations requises pour la réalisation du diagnostic n'étaient pas facilement et directement disponibles. Des campagnes de mesure, la consultation des documents internes de l'entreprise (par exemple les déclarations d'activités faites à l'agence de l'eau), des entretiens et des visites de l'atelier ont permis d'acquérir les informations utiles.

IV.2.1.1.2.2 Analyse des données

Pour ne pas surcharger ce mémoire, nous présenterons le tableau de bord de ce cas d'études en **ANNEXE 12**. L'analyse des données récoltées auprès de la société A en amont et en aval du remplacement d'intrant permet d'obtenir le profil d'impact présenté sur la Figure 55:

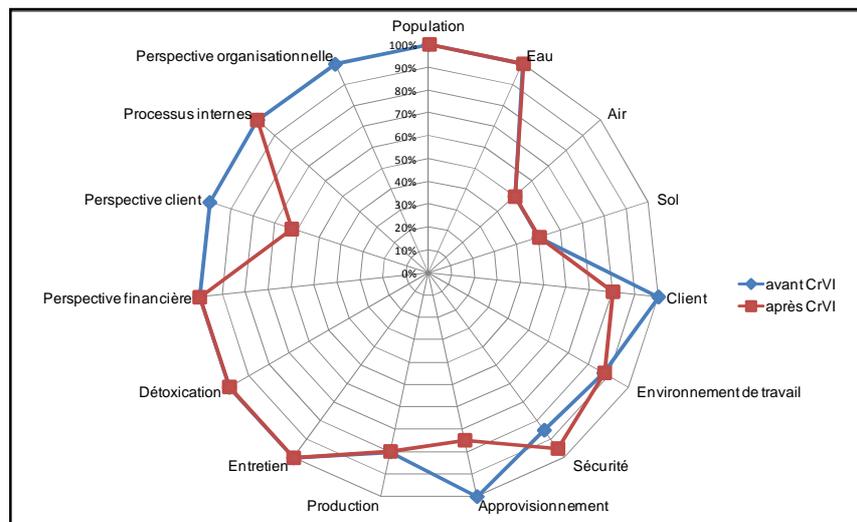


Figure 55 : Profil d'impact de la société A

La Figure 55 présente l'état des lieux amont (courbe bleue) et aval (courbe rouge) du remplacement du bain de passivation au CrVI par du CrIII. L'analyse du diagramme radar montre que :

- ➔ Avant le remplacement d'intrant la société A présente une assez bonne performance sur la majorité des critères de production plus propre et plus sûre. En effet pour 10 des 15 critères, la valeur de l'impact du critère IC_x est égale à la valeur maximale que peut prendre ce critère. Trois autres critères (Production, Sécurité et Environnement de travail) ont une performance supérieure à 80% par rapport à la performance maximale. Deux critères apparaissent moins performants. Il s'agit des critères air et sol.

Pour mieux comprendre cette moins bonne performance il est nécessaire de s'intéresser aux indicateurs alimentant ces deux critères.

- Au niveau du critère Air, cette faible performance provient de l'indicateur « charge toxique et polluante dans l'air ». Cet indicateur compare l'ensemble des paramètres réglementaires aux valeurs de l'arrêté ministériel du 30 juin 2006. Si l'un de ces paramètres n'est pas conforme alors l'indicateur est considéré non-conforme. Or le paramètre « acidité totale dans les rejets mesurée en H^+ », est au dessus du seuil réglementaire. Par conséquent, la performance au niveau du critère Air n'est pas entièrement satisfaisante.
- Au niveau du critère Sol, l'utilisation de substances possédant un très haut niveau de toxicité pour les sols est la cause de cette moins bonne performance (cyanure et zinc). Ces substances sont identifiées par des phrases de risques R50 et R53. Bien que la société soit en conformité réglementaire quant à la présence de bacs de rétention appropriés, il est encore possible d'améliorer les performances au niveau de ce critère en substituant par exemple les produits chimiques à base de cyanures.

Ces deux critères peuvent par conséquent représenter deux enjeux futurs de l'entreprise.

- ➔ À la suite du remplacement du bain de passivation il y a une modification visible du profil d'impact: quatre critères ont évolué. Il s'agit des critères Perspective Clients, Clients, Sécurité et Approvisionnement.
- Au niveau du critère Perspective Client la principale modification vient de l'indicateur « caractéristiques anticorrosion ». Cet indicateur mesure la qualité des revêtements en fonction de la durée pendant laquelle il n'y a pas d'apparition de rouille blanche à la surface d'une pièce immergée dans un brouillard salin. Le cahier des charges spécifie un minimum de 192 heures. La passivation au chrome VI permettait de répondre à ces spécifications. Lors de la modification de la formulation du bain, les pièces testées présentaient dès 120h des traces de rouille blanche. L'indicateur « caractéristiques anticorrosion » est par conséquent passé d'un niveau « très bon » à un niveau « bon ».
- De plus il y a eu une légère augmentation du « taux de satisfaction du client » qui concerne le nombre de réclamations reçues par rapport au nombre de pièces traitées. Le directeur de l'entreprise A estime que cette augmentation est de l'ordre de 3%. Ainsi, l'indicateur « taux de satisfaction du client » est passé d'un niveau « très satisfait » à un niveau « relativement satisfait ».
- Le critère Client a également été impacté. Rappelons que ce critère évalue les impacts sur l'environnement économique de l'entreprise. La société A a perdu de la clientèle suite à cette implémentation : le critère gain de clientèle est donc passé d'un niveau « bon » à un niveau « moins bon ».
- Au niveau du critère Approvisionnement c'est l'indicateur « intensité matière première » qui a été modifié. Cet indicateur mesure la masse de matière première par m^2 de surface traitée. Le chimiste de la société A a constaté que pour une production similaire, la quantité de produits chimiques utilisée pour le réajustement du bain de passivation, est passée d'environ 5kg tous les 15 jours (CrVI) à 10kg par jour (CrIII). Ainsi, cet indicateur est passé d'un niveau « bon » à un niveau « moins bon ».
- Enfin, une légère amélioration de la performance au niveau du critère Sécurité est observée. Le Niveau Global de Risque (NGR) caractérise le risque toxique généré par la présence de produits chimiques en fonctionnement normal de l'entreprise. Ce risque est

estimé à partir de la quantité de contaminant émise ainsi que de sa toxicité. La suppression du bain de passivation au chrome VI a donc un effet direct sur ce NGR qui passe d'un niveau « moyennement bas » à un niveau « bas » pour la chaîne de traitement considérée. Cependant du fait de la présence des autres chaînes, cet impact se traduit par une faible répercussion sur le diagramme radar.

D'autres impacts ont été identifiés, néanmoins ils n'ont pas pu être pris en compte à cause de la difficulté pour les estimer. Par exemple, l'apparition de flocs lors de la neutralisation au niveau de la station de traitement des effluents est l'un des effets qui a été constaté.

Dans le but de connaître l'impact de la mise en œuvre du bain de passivation au chrome III sur la performance globale de l'entreprise, l'indice de performance I_{Perf} a été calculé :

$$I_{Perf} = \frac{\sum_{x=1}^{15} IPC_{après\ CrIII} - \sum_{x=1}^{15} IPC_{avant\ CrIII}}{\sum_{x=1}^{15} IPC_{après\ CrVI}} \quad (\text{Équation 16})$$

$$I_{Perf} = \frac{1,88 - 1,75}{1,88} = -6,9\% \quad (\text{Équation 17})$$

Le calcul de l'indice montre que la performance globale de l'entreprise a diminué de l'ordre de 7% après le remplacement du bain de passivation au CrVI puisque $I_{Perf} < 0$. Ce résultat confirme le fait que l'implémentation d'une pratique peut avoir un impact localement positif (dans cet exemple sur le critère sécurité) mais que cette pratique génère une perte de performance à l'échelle globale de l'entreprise.

IV.2.1.1.3 Intérêt de l'étude réalisée

Cette étude réalisée dans la société A présente trois intérêts majeurs :

- D'une part, elle a permis de vérifier la facilité de mise en œuvre de la méthode de diagnostic des impacts et d'identifier les points bloquants. L'étape de collecte des données a été en effet, le principal frein à l'utilisation de la méthode. Malgré ces quelques difficultés la suite de la démarche a été réalisée de manière assez aisée.
- D'autre part, cette étude a permis de valider de manière empirique la méthode et les outils associés. Les profils d'impact de l'entreprise en amont et en aval de l'implémentation font ressortir les principaux enjeux pour l'industriel (critères Air et Sol), affichent les pertes ou gains de performance liés à l'implémentation de la pratique pour chaque critère. En dernier lieu le calcul de l'indice de performance évalue l'impact global du remplacement d'intrant. Les indicateurs utilisés permettent donc bien de rendre compte de la situation (profil d'impact), d'aider à la décision (principaux enjeux) et de mesurer les progrès (comparatif avant/après). Le chef d'entreprise de la société A a par ailleurs, déclaré que les profils d'impact présentés étaient en conformité avec la vision propre qu'il a de son entreprise. Par conséquent le modèle qui est à la base de la méthode de diagnostic est en complète adéquation avec la réalité industrielle.
- En dernier lieu, le chef d'entreprise a fait part de son intérêt quant à l'utilisation d'une telle méthode de diagnostic.

IV.2.1.2 Cas d'étude 2 : État des lieux d'un atelier intégré

De nombreuses différences existent entre ateliers façonniers et intégrés (Tableau 47). La méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS a été développée à partir de l'analyse d'un atelier façonnier. Le second cas d'étude proposé ici a donc pour objectif de vérifier la possibilité de transfert de cette méthodologie aux ateliers intégrés.

Tableau 47 : Différences entre ateliers de traitements de surfaces intégrés et façonniers [LAFORÉST, 2005c]

	Façonniers	Intégrés
Nombre d'ateliers (%)	30	70
Emplois (%)	31	69
CA (%)	20	80
Traitement de surface	Activité principale	Étape de la chaîne de production
Taille des sociétés	PME (le plus grand <200 salariés)	Moyenne → Grande
Moyens financier	Faibles	Moyen en fonction de l'activité principale de l'entreprise
Procédé de traitement	Procédés robustes, utilisables pour un grand nombre de pièces	Procédés spécifiques adaptés à la production de l'entreprise
Séries de pièces	Généralement petites plus ou moins récurrentes	Généralement importante et récurrentes
Pièces traitées	Très variées	Peu nombreuses
Surface traitée	Calcul difficile, estimation approximative	Plus facile à connaître grâce à la récurrence des pièces
Supports	Accrochage des pièces selon possibilités afin de limiter au maximum l'entraînement	Supports adaptés aux pièces traitées
Disponibilité de l'information	Nécessite des recherches poussées (étude des surfaces traitées, des consommations...)	Assez disponible et complète
Leviers de mise en œuvre de technologies propre	Se conformer aux contraintes réglementaires	Volonté d'améliorer les performances

IV.2.1.2.1 Contexte de l'étude

La Société B est un fabricant de boules de pétanques (boules de compétition et boules de loisir) possédant en son sein un atelier de traitement de surface. Le principal « client » est donc la société elle-même. Cet atelier possède deux chaînes de traitement:

- 1 chaîne de nickelage fonctionnant en automatique
- 1 chaîne de zingage fonctionnant en automatique

Outre le traitement de surface, la société a des activités de forge, de soudure, d'usinage, de polissage et de traitement thermique et possède également sa propre station de traitement des effluents.

Très soucieuse des ses impacts environnementaux la société B met en place régulièrement des actions visant à les réduire (destruction des condensateurs et transformateurs aux PCB en 2003 ; installation de disconnecteurs sur les arrivées d'eau de ville en 2006 ; mise en étanchéité de la fosse de trempe en 2008 par exemple) [DUPUY *et al.*, 2009]. C'est donc naturellement que la société a souhaité contribuer à la validation de cet outil par un état des lieux de leur atelier.

IV.2.1.2.2 Mise en œuvre

IV.2.1.2.2.1 Collecte des données

L'étape de collecte des données de l'entreprise B a été réalisée de manière assez rapide du fait de la révision en mai 2009 du bilan de fonctionnement décennal de l'entreprise. Une grande majorité des renseignements nécessaires au diagnostic y étant renseignée, il n'y a donc pas eu de visites de l'atelier pour cette collecte des données. Des discussions fréquentes avec l'industriel ont permis de compléter les données manquantes.

➔ Réflexion préliminaire sur le périmètre de l'étude

Dans le cas d'un atelier façonnier, l'atelier de traitement de surfaces s'apparente à l'entreprise. Par contre dans le cas des intégrés, l'atelier est un sous-système du système entreprise. Cette particularité soulève plusieurs difficultés. Pour certains indicateurs, il est :

- Impossible de quantifier la part de l'atelier dans l'impact global de l'entreprise. Un exemple compréhensible est celui de la contribution de l'atelier aux nuisances sonores pour les riverains. Pour ces indicateurs, l'évaluation sera réalisée au niveau de l'entreprise. Les indicateurs ayant été calculés au niveau de l'entreprise elle-même sont les suivants :
 - Gain de clientèle
 - Indicateur de gestion des déchets solides
 - Indice de risques
 - Excès de risque individuel
 - Mesure du bruit extérieur
 - Niveau d'odeur à l'extérieur
 - Productivité apparente du travail
 - Valeur ajoutée

En effet les indicateurs relatifs à la stratégie de l'entreprise (valeur ajoutée, productivité apparente, gain de clientèle) ne sont pas réductibles à l'atelier uniquement. De plus il aurait été difficile d'estimer la part du traitement de surface dans la valeur ajoutée ou dans le gain de clientèle. Les indicateurs qui alimentent le critère population (niveau d'odeur à l'extérieur, indice de risques) sont à déterminer au niveau global de l'entreprise pour éviter l'effet de masque.

- Un indicateur, le « taux de satisfaction du client » s'est avéré inadapté. En effet, dans le cas d'un atelier intégré, il n'y a pas de client à proprement parler puisque l'entreprise est son propre client. Cet indicateur doit donc être adapté au cas d'un atelier intégré. Après avoir constaté que les boules défectueuses ou non conformes sont retraitées en interne. L'indicateur « taux de satisfaction du client » a donc évolué en « taux de rebuts » calculé à partir des paramètres « nombre de pièces réalisées » et « nombre de pièces rebutées ».
- Le calcul des indicateurs au niveau de l'atelier s'est avéré plus délicat et a nécessité quelques précautions (Tableau 48)

Tableau 48 : Précautions prises pour le calcul des indicateurs

Indicateur	(Explication)
• Indicateur d'intensité énergétique	Il n'y avait pas de compteur électrique spécifique à l'atelier intégré. Dans l'atelier façonnier la quasi-totalité de la consommation électrique est liée à l'activité de traitement elle-même. Dans la société B le traitement de surface n'est pas le poste le plus énergivore. Il a fallu estimer la contribution de l'atelier à la consommation globale de l'entreprise.
• Taux de renouvellement de l'équipement	Pour le calcul de cet indicateur il faut être vigilant à bien tenir compte du chiffre d'affaire généré par l'atelier uniquement et de l'investissement annuel dans l'atelier dans un souci de cohérence. En effet si l'on tient compte du CA de l'entreprise entière, l'échelle associée à cet indicateur n'est alors plus adapté.

IV.2.1.2.2.2 Analyse des données

À partir des données récoltées à la société B le tableau de bord d'indicateurs a pu être complété (ANNEXE 13). Le profil d'impact présenté à la Figure 56 est alors obtenu.

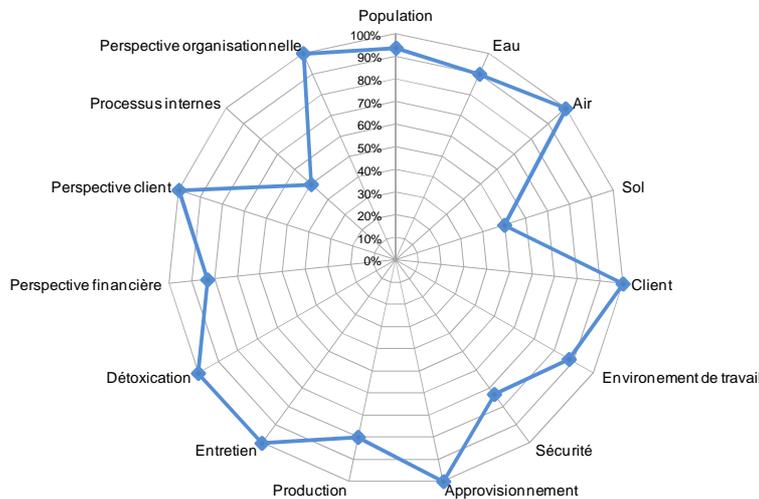


Figure 56 : Profil d'impact de la société B

Ce profil d'impact montre que la société B a une assez bonne performance sur la majorité des critères de production plus propre et plus sûre. Sept critères atteignent la performance maximale (Air, Client, Approvisionnement, Entretien, Détoxification, Perspective client et Perspective organisationnelle). De plus, pour cinq autres critères la performance obtenue est supérieure à 75% de la performance maximale. Seuls deux critères semblent être moins performants avec une performance de l'ordre de 50% et peuvent représenter les enjeux de l'entreprise. Il s'agit des critères sol et processus internes.

- Au niveau du critère sol, l'utilisation de substances possédant un très haut niveau de toxicité pour les sols est la cause de cette moins bonne performance. Ces substances sont identifiées par des phrases de risques R50 et R53. Comme la société A, malgré la conformité réglementaire de l'atelier liée à la présence de bacs de rétention appropriés, il est encore possible d'améliorer les performances au niveau de ce critère en substituant les produits chimiques utilisés par exemple.
- Au niveau du critère processus internes, la performance moindre vient du taux d'utilisation de l'équipement. Cet indicateur est le ratio entre la production de l'entreprise et sa capacité de production. Or, il y eu une forte diminution de l'activité de l'entreprise depuis les six dernières années, et la capacité de production est estimée au

double de la production actuelle. Par conséquent, le taux d'utilisation de l'équipement est faible.

IV.2.1.2.3 Intérêt de l'étude réalisée

Compte tenu du fait que la société B possède un atelier de traitement de surfaces intégré, l'intérêt de sa participation est multiple :

- D'une part, cette étude a permis de valider de nouveau la facilité de mise en œuvre de la méthode. Les difficultés relatives à l'étape de collecte des données n'ont cependant pas été rencontrées dans ce cas d'étude.
- D'autre part, ce cas d'étude a permis de vérifier que la méthodologie de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS développée dans le cadre d'un atelier façonnier est transférable vers un atelier intégré moyennant quelques modifications dans le calcul des indicateurs.
- En dernier lieu, ce cas d'étude a également confirmé la validité de l'information apportée par ce diagnostic puisque le profil d'impact présenté au responsable de l'atelier de traitement de surface de la société, lui a paru tout à fait clair et correspondait à la vision qu'il avait de ses principaux impacts.

IV.2.1.3 Cas d'étude 3 : État des lieux d'un atelier façonnier

IV.2.1.3.1 Contexte de l'étude

La Société C est un atelier façonnier. Succursale d'un grand groupe du secteur aéronautique, elle traite également avec d'autres petits clients du secteur médical, de l'éclairage public, de la mécanique ou encore de l'automobile. L'atelier est composé de 3 chaînes de traitement dont

- deux chaînes d'anodisation
- une chaîne de polissage électrolytique.

La société C est soumise à législation sur les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement dont les textes réglementaires sont regroupés dans le livre V-titre I du Code de l'Environnement.

IV.2.1.3.2 Mise en œuvre

IV.2.1.3.2.1 Collecte des données

L'étape de collecte des données de l'entreprise C a nécessité un délai assez long. Celui-ci est principalement dû au manque de disponibilité de certaines informations requises pour la réalisation du diagnostic. La recherche de ces informations a donc nécessité des campagnes mesures, ainsi que des entretiens fréquents avec le gérant de l'entreprise et le responsable de l'atelier. Par ailleurs, les documents internes de l'entreprise n'ont pas pu être consultés.

D'autre part, lors de cette collecte de données il a été nécessaire d'adapter deux indicateurs :

- L'indicateur « caractéristiques anticorrosion », n'a pu être déterminé car cette société ne possède pas le matériel nécessaire pour effectuer des tests de tenue au brouillard salin.

En échangeant avec le responsable de l'atelier, il a été mis en évidence que le critère jugeant de la qualité des pièces est l'épaisseur de la couche déposée. Cette épaisseur est contrôlée par durée et l'intensité du courant de dépôt. L'indicateur « **épaisseur de la couche** » a donc été utilisé dans ce cas, en lui associant une échelle binaire : conforme ou non-conforme au cahier des charges.

- L'indicateur « taux de satisfaction du client » a été également un point bloquant. En effet cet indicateur n'a pu être estimé par le responsable de l'atelier. En revanche, le **taux de rebuts** lui a semblé beaucoup plus parlant et facile à estimer. Cet indicateur a donc été utilisé. Il s'agit du rapport de pièces rebutées par le nombre de pièces traitées. Plus le taux de rebuts est élevé, moins le client (la société elle-même) est satisfait.

En dernier lieu, quatre indicateurs n'ont pu être renseignés. Il s'agit du taux de conformité au rapport de dilution, de l'entraînement, de l'indice de risque et de l'excès de risque individuel. En effet, l'industriel n'a pas souhaité aller plus loin dans la démarche de calcul des indicateurs. Dans le but de ne pas fausser l'étude, ces indicateurs n'ont pas été pris en compte lors du diagnostic de l'atelier. Néanmoins, il est évident que la suppression de ces indicateurs compromet la performance obtenue au niveau des critères production et population.

IV.2.1.3.2.2 Analyse des données

L'analyse des données récoltées a permis d'obtenir le profil d'impact suivant (Figure 57). Le tableau de bord d'indicateurs de cette étude de cas fait l'objet de l'**ANNEXE 14**.

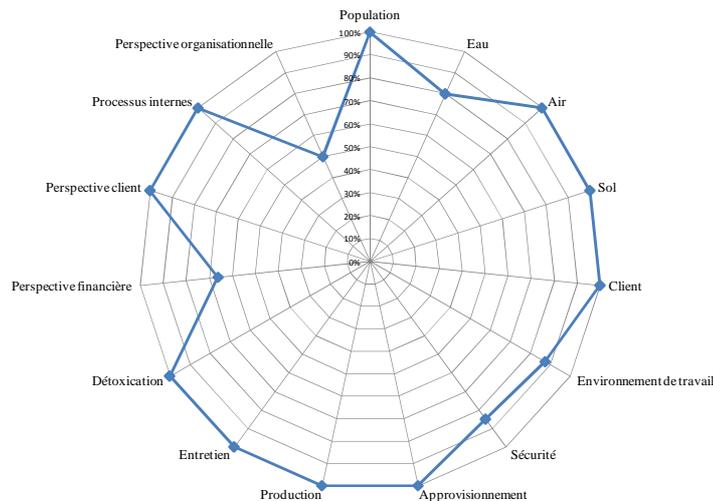


Figure 57: Profil d'impact de la société C

Ce profil d'impact montre que la société C a une assez bonne performance sur la majorité des critères de production plus propre et plus sûre. Dix critères atteignent en effet la performance maximale et deux autres critères ont une performance supérieure à 80%. Les critères Perspective financière, Perspective organisationnelle et Eau sont les critères les moins performants sur ce profil. Ils peuvent donc représenter des enjeux pour l'entreprise. Pour expliquer ces performances intéressons-nous aux indicateurs alimentant ces critères :

- Le critère Perspective financière est alimenté par le taux de valeur ajoutée et le taux de productivité apparente du travail. En consultant le tableau de bord de la société C, il apparaît que la valeur de ces indicateurs se situe dans la moyenne des statistiques du secteur. Il ne faut donc pas traduire cette performance comme une performance moindre, mais l'envisager comme une possibilité d'amélioration.

- La Perspective organisationnelle semble être le critère le moins performant pour cette entreprise. Cela est principalement lié au « taux de formation du personnel » qui est assez faible puisque 2 personnes seulement sont formées sur un effectif de 17 personnes. Étant donné que ce critère n'est alimenté que par deux indicateurs, cela se répercute de manière importante au niveau du profil d'impact.
- La performance au niveau du critère Eau est due aux rejets de la société, qui bien que conformes à la législation en vigueur, sont considérés non biodégradables puisque l'indice de biodégradabilité est supérieur à 3.

En dernier lieu, il convient d'émettre une réserve sur les résultats des critères Production et Population puisque quatre indicateurs d'évaluation n'ont pas été renseignés.

IV.2.1.3.3 Intérêt de l'étude réalisée

Cette étude réalisée dans un atelier façonnier présente deux intérêts majeurs.

- Tout d'abord elle permet de confirmer la validité de la méthode de diagnostic. De même que pour l'étude de cas concernant la substitution du bain de passivation, l'étape bloquant la mise en œuvre de la méthode est la collecte des données.
- D'autre part, ce cas d'étude fait ressortir l'une des principales limites de la méthode de diagnostic qui est la nécessité de renseigner l'ensemble des indicateurs. Pour ne pas pénaliser l'entreprise, les indicateurs non renseignés n'ont pas été pris en compte dans le calcul de l'impact du critère.

IV.2.1.4 Conclusion sur la validation de la méthode de diagnostic

Les trois cas d'étude montrent que :

- La méthode de diagnostic des impacts des pratiques de 4PS est réellement applicable sur le terrain. Les indicateurs utilisés permettent donc bien de rendre compte de la situation (profil d'impact), d'aider à la décision (principaux enjeux) et de mesurer les progrès (comparatif avant/après). De plus, les résultats obtenus sont conformes à la vision qu'ont les chefs d'entreprises de leurs ateliers.
- La méthode s'adapte tant aux ateliers façonniers qu'aux ateliers intégrés moyennant la modification de certains indicateurs.
- L'étape la plus chronophage est principalement la collecte des données.

IV.2.2 Validation de l'outil d'aide à la décision

IV.2.2.1 Cas d'étude 4 : Valorisation des effluents en sortie de station par des résines échangeuses d'ions

IV.2.2.1.1 Contexte de l'étude

Ce cas d'étude est également réalisé dans la société A. Cette société possède une station de traitement des effluents, fonctionnant en continu, et utilisant différents procédés de traitement des rejets (décyanuration, déchromatation, neutralisation, floculation, filtre presse, résines chélatantes...). Cependant la concentration en métaux dans les rejets (Zn^{2+} et Ni^{2+} principalement) n'est pas conforme à la législation en vigueur. De plus, dans un souci de diminution des consommations, l'entreprise souhaite pouvoir valoriser les effluents pour l'alimentation des bains de traitement. Or la concentration en métaux dans les effluents est trop élevée pour assurer une bonne qualité des dépôts si ceux-ci étaient réutilisés tel quels. En effet la réutilisation de ces eaux conduirait à une concentration des impuretés dans les bains de traitement et par conséquent à leur pollution. Pour cela l'entreprise souhaite acquérir un procédé qui permettrait d'éliminer les cations métalliques présents dans les effluents, afin d'une part d'être conforme à la législation et d'autre part de réutiliser les effluents ainsi traités.

IV.2.2.1.1 Mise en œuvre

Trois procédés semblent convenir pour atteindre une faible concentration en métaux dans les effluents en vue de leur régénération. Il s'agit de l'évaporation, l'échange d'ions et l'osmose inverse. Monsieur F. souhaite comparer ces trois pratiques et attribue les poids aux critères de 4PS (Tableau 49). Pour ce chef d'entreprise, les trois aspects les plus importants sont le coût financier (critère financier), la qualité future des pièces qui seront traitées avec l'eau recyclée (critère stratégie clients), et la conformité des effluents aqueux rejetés (critère eau). Il accorde également une grande importance aux critères population, production et processus internes. De même certains critères ne présentent aucune importance pour ce chef d'entreprise. Il s'agit des critères Air, Sol, client, Détoxification et Approvisionnement.

Tableau 49 : Poids attribués aux critères pour l'étude de cas résines

Critère	Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxification	Approvisionnement	Clients (perspective)	Financier	Processus internes	Organisation
Poids	1	0	0	1	0	0,1	0,2	0,3	1	0	0	1	1	1	0,5
Échelle	0-10	3-7	3-7	0-10	3-7	3-7	3-7	3-7	0-10	3-7	3-7	0-10	0-10	0-10	2-8
P1 : Évaporation	10,00	3,66	5,00	1,66	7,00	3,66	5,00	6,33	6,66	4,33	4,33	8,33	0,00	5,00	4,00
P2 : Résines échangeuses d'ions	10,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,66	10,00	4,33	3,66	8,33	3,30	5,00	5,00
P3 : Osmose inverse	8,33	5,00	5,00	5,00	6,33	4,33	5,00	6,33	10,00	5,66	6,33	5,00	8,33	6,66	7,00

Les seuils de surclassement sont 0,8 et 0,2 respectivement pour la concordance et la discordance. L'ensemble des calculs et des résultats étant présenté en ANNEXE 15 nous présentons ici le graphe de surclassement obtenu (Figure 58).

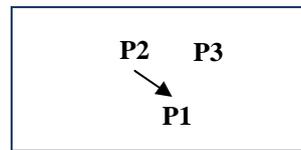


Figure 58 : Graphe de surclassement obtenu pour le cas d'étude Résines

Ce graphe montre que la pratique P2 (Résines échangeuses d'ions) surclasse la pratique P1 (Évaporation). En effet, l'analyse des évaluations relatives à ces deux pratiques (Tableau 50), montre que pour la majorité des critères de 4PS, P2 a une valeur supérieure à P1. La condition de concordance est donc vérifiée. Le pratique P1 a une évaluation supérieure à celle de P2 uniquement pour les critères Client, Entretien et Approvisionnement (en rouge). Or la différence entre les évaluations est trop faible pour autoriser le surclassement inverse. Cela justifie le surclassement de P1 par P2.

D'autre part la pratique P3 (Osmose inverse) est incomparable aux deux autres. En considérant le Tableau 50, il apparaît que les évaluations de P3 sont meilleures que celles de P1 pour une majorité des critères et notamment ceux dont le poids est nul. Les évaluations de P1 sont meilleures que celles de P3 pour trois critères (Client, Eau, et Perspective client). Les critères Eau et Perspective client ont un poids très important. Par conséquent, la condition de concordance est difficile à établir puisque rappelons-le l'indice de concordance est égal à la somme des poids des critères pour lesquels la relation de surclassement est vérifiée, divisé par la somme totale des poids. D'autre part, la différence entre les évaluations est assez élevée. Il en résulte que la condition de non discordance n'est pas respectée (l'indice de discordance étant le rapport de la plus grande différence entre les évaluations et l'échelle maximale de ce critère). Ainsi l'outil a conclu que ces deux pratiques sont incomparables entre elles.

Ce graphe permet donc d'éliminer du choix l'une des pratiques envisagées. Cependant le choix entre P2 et P3 nécessite une étude de faisabilité.

La société A fait le choix du procédé de résines échangeuses d'ions. Les effets attendus sont :

- une réduction de la consommation d'eau (*consommation spécifique*),
- une diminution des concentrations en métaux dans les rejets aqueux (*charge toxique et polluante dans l'eau rejetée*),
- un coût financier moindre.

IV.2.2.1.1 Analyse des données

Le diagnostic de l'entreprise est réalisé avant et après la mise en œuvre de cette résine échangeuse d'ions. Les tableaux de bord relatifs à cette étude de cas sont également présentés en ANNEXE 15. Les profils d'impacts obtenus sont représentés à la Figure 59.

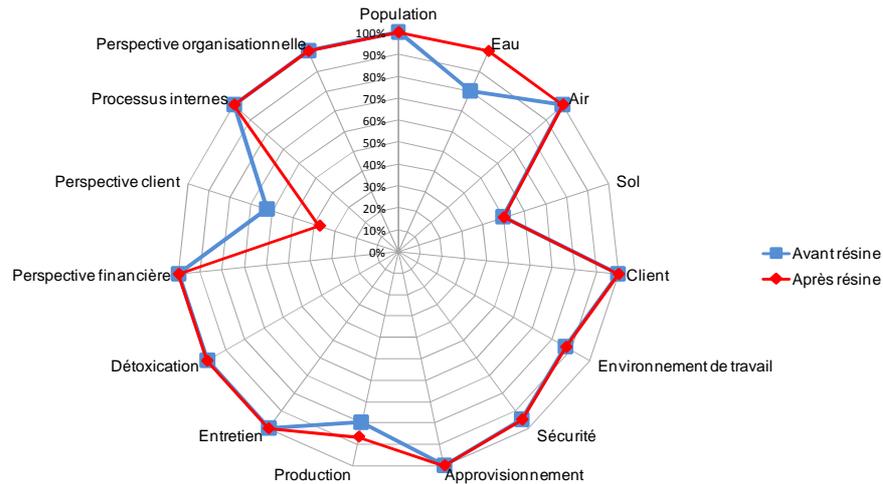


Figure 59 : État des lieux de l'atelier avant et après la mise en place d'une résine échangeuse d'ions

L'analyse du diagramme radar montre que :

Avant la mise en œuvre de la résine, la société A présente une assez bonne performance sur la majorité des critères de production plus propre et plus sûre. Toutefois quatre critères semblent être beaucoup moins performants et peuvent représenter les enjeux de l'entreprise. Il s'agit des critères eau, sol, production, et perspective client.

- Au niveau du critère eau, cette faible performance provient de l'indicateur « charge toxique et polluante dans l'eau ». Cet indicateur compare l'ensemble des paramètres réglementaires aux valeurs de l'arrêté ministériel du 30 juin 2006. Si l'un de ces paramètres n'est pas conforme alors l'indicateur est considéré non-conforme. Or les concentrations en zinc et nickel se sont avérées légèrement au dessus du seuil réglementaire. Par conséquent, la performance au niveau du critère eau n'est pas entièrement satisfaisante.
- Au niveau du critère sol, l'utilisation de substances possédant un très haut niveau de toxicité pour les sols est la cause de cette moins bonne performance (cyanures et zinc). Ces substances sont identifiées par des phrases de risques R50 et R53.
- En ce qui concerne la production, l'indicateur d'utilisation déchets est au niveau le plus bas de l'échelle c'est-à-dire moins de 25% de déchets réutilisés. L'industriel recycle déjà une partie de ses effluents dans les bains de rinçage. La valeur de cet indicateur peut encore être améliorée.
- Enfin le critère perspective client : cette performance est liée à l'indicateur caractéristiques anticorrosion qui, bien que satisfaisant vis-à-vis du cahier des charges pour la passivation au chrome III, ne permet pas d'obtenir le même nombre d'heure de tenue au brouillard salin que lors d'une passivation au chrome VI.
-

Après l'implémentation de la résine il y a une modification visible de l'état des lieux : trois critères ont évolué. Il s'agit des critères eau, client et production.

- Au niveau du critère Eau, l'indicateur « charge toxique et polluante dans l'eau » est, depuis la mise en place de la résine, passé d'un niveau non-conforme à un niveau conforme à la réglementation. En effet, les concentrations en zinc et nickel dans les effluents ont été réduites d'un facteur 10. Par conséquent, la pratique mise en œuvre a bien eu les effets escomptés.

- Une amélioration de la performance au niveau du critère Production est également observée. Cette amélioration est liée à l'indicateur d'utilisation déchets. En effet, les effluents sont revalorisés dans les bains de traitement. Cet indicateur est passé d'un niveau moyen à un niveau bon.
- Au niveau du critère Perspective client, une diminution de la performance est observée. Cette diminution provient de l'impossibilité du revêtement des pièces (indicateur caractéristiques anticorrosion) à cause de la présence de sels en trop grande concentration dans les bains de traitement. Les résines utilisées par l'industriel très adaptées pour retenir les cations bi et trivalents (affinité plus importante) laissent passer les sels. Ces sels perturbent l'électrodéposition. Cet effet n'avait pas été appréhendé. Pour réutiliser ses effluents de manière adéquate, l'industriel devra les mélanger à de l'eau de ville

Dans le but de connaître l'impact de la mise en œuvre de la résine sur la performance globale de l'entreprise, l'indice de performance I_{Perf} a été calculé :

$$I_{Perf} = \frac{\sum_{x=1}^{15} IPC_{après\ résine} - \sum_{x=1}^{15} IPC_{avant\ résine}}{\sum_{x=1}^{15} IPC_{après\ résine}} \quad (\text{Équation 18})$$

$$I_{Perf} = \frac{1,81 - 1,81}{1,81} = 0\% \quad (\text{Équation 19})$$

L'indice de performance est nul. Les effets bénéfiques étant compensés par les effets moins bons cela empêche de conclure sur l'impact sur la performance globale.

Étant donné que l'objectif prioritaire de l'industriel concernait la réduction des concentrations en métaux en sortie de station de traitement et qu'il accorde une grande importance à la qualité des pièces revêtues (Perspective Client), le recyclage des effluents dans les bains de traitement a été arrêté. Cette eau aurait pu être recyclée dans les bains de rinçage de préparation de surface, cependant cela n'a pas été possible car ils sont déjà alimentés en eau recyclée.

IV.2.2.1.1 Intérêt de l'étude réalisée

Cette étude a un grand intérêt puisqu'elle permet la mise en œuvre de la méthodologie d'évaluation des impacts de 4PS dans sa globalité. D'une part, l'utilisation de la méthode d'aide à la décision a permis de clarifier les souhaits du décideur et de comparer trois pratiques pour le traitement des effluents en vue de leur réutilisation. Cette comparaison a abouti à l'élimination de la pratique « évaporation » et donc de simplifier le choix entre les deux autres. Cependant, il n'a pas été possible d'aller plus loin puisque ces deux pratiques étaient incomparables. Dans un deuxième temps, la méthode de diagnostic des impacts a été utilisée pour estimer les effets de l'implémentation de résines échangeuses d'ions pour le traitement des effluents. La méthode a montré une nouvelle fois son applicabilité et sa capacité à visualiser les différents impacts relatifs aux pratiques de 4PS. En dernier lieu, l'entreprise a trouvé le profil d'impact et donc la présentation radar pertinente.

IV.2.3 Conclusion

Dans le cadre de ce travail de recherche, une méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS a été élaborée puis validée par le biais de quatre cas d'études. Les résultats de cette validation montrent :

- Une utilisation aisée des méthodes et outils,
- Une « relative » disponibilité des données nécessaires au calcul des indicateurs de 4PS,
- La représentation du profil d'impact sous forme de diagramme radar permet une meilleure compréhension des résultats pour les industriels,
- Une grande représentativité des résultats puisque les profils d'impacts présentés étaient en adéquation avec la vision des industriels de leur entreprise,
- Une adaptabilité de l'outil de diagnostic initial développé avec un atelier façonnier, pour son utilisation en atelier intégré.

Cette validation a également fait immerger quelques limites des méthodes

- ➔ La première concerne la nécessité de compléter l'ensemble des indicateurs de 4PS pour réaliser le diagnostic. Si un indicateur n'est pas renseigné, cela implique une diminution de la représentativité des résultats obtenus au niveau des critères considérés.
- ➔ La seconde limite vient de l'étape de collecte des données. La principale difficulté, ne vient pas en réalité l'absence d'information mais bien souvent de l'aspect qualitatif de l'information fournie. Or la méthode de diagnostic est basée sur de nombreux indicateurs quantitatifs. Il faut donc
 - soit rechercher les données quantitatives par le biais de mesures. Cette option entraîne pour l'industriel un surcoût financier, ce qui n'est pas souhaitable pour une méthode qui se veut rapide et simple.
 - Soit essayer de transformer les données qualitatives en données quantitatives par le biais d'estimation de l'industriel. Dans ce cas, c'est la valeur de l'estimation qui peut être remise en cause.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'implémentation de la production plus propre au sein des entreprises peut être ralentie par d'une part la variété des pratiques et d'autre part une difficile appréhension de l'impact global de leur mise en œuvre sur l'entreprise. En effet, bien que le contexte réglementaire européen et français oblige les industriels à la mise en œuvre de mesures préventives et des technologies propres, il ne propose pas forcément les moyens de faire le choix de pratiques adaptées. De plus, l'étude des méthodes d'évaluation environnementale existantes n'a pas permis de faire émerger une méthode adéquate permettant l'évaluation des impacts liés à l'implémentation de pratiques de production plus propre.

Nous avons donc choisi d'apporter une réponse à ces deux objectifs en élaborant une méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de production plus propre et plus sûre. Cette méthodologie a été élaborée pour le secteur du traitement de surfaces.

Pour élaborer la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS il a été nécessaire en premier lieu de chercher à mieux cerner le domaine étudié : l'Entreprise. L'entreprise est un système complexe mettant en interaction des ressources humaines, techniques et informationnelles. Afin d'appréhender cette complexité, une représentation systémique de l'entreprise a été initiée à partir du modèle MADS/MOSAR. En effet, nous avons montré qu'un parallèle pouvait être fait entre l'introduction d'une pratique de production plus propre et le modèle MADS puisque l'entreprise ainsi que son environnement proche peuvent être considérés comme les cibles potentielles de la modification envisagée. Cette représentation a abouti à l'identification de trois sous-systèmes du système Entreprise impacté et cinq sous-systèmes du système Environnement.

La deuxième étape de l'élaboration de la méthodologie a été de qualifier chacun de ces sous-systèmes en leur attribuant des critères permettant de juger des impacts sur ces sous-systèmes. Une analyse systémique détaillée de l'entreprise associée à une analyse fonctionnelle a permis de faire ressortir quinze critères de production plus propre et plus sûre. Les critères de 4PS ont alors été pondérés via une enquête réalisée auprès des experts du traitement de surfaces, et agrégées en utilisant la MHM.

Les trois premiers niveaux de cette structuration (systèmes, sous-systèmes, critères) constituent la partie générique de la méthodologie développée dans ce mémoire. Sur la base de ces critères deux méthodes plus spécifiques au secteur du traitement de surfaces ont été élaborées :

- ➔ La **méthode de diagnostic** des impacts qui repose sur l'utilisation de 38 indicateurs de 4PS renseignant les 15 critères précédemment définis. Ces indicateurs ont été identifiés dans la littérature, et par le biais de cas d'études, sélectionnés puis organisés. La méthode est mise en œuvre au travers de l'utilisation de deux outils principaux. Le premier outil est une grille de collecte des données permettant le recueil au niveau de l'installation des paramètres de calcul des 38 indicateurs. Le second est un tableau de bord permettant la synthèse des impacts au niveau des critères, ainsi que l'affichage des résultats sous forme de diagramme radar.
- ➔ La **méthode d'aide au choix de pratiques** qui fait émerger les pratiques les plus adaptées à chaque entreprise en comparant leurs performances sur les différents critères de 4PS. L'industriel dispose d'un panel de 86 pratiques recensées dans le BREF TSM. Cette méthode est mise en œuvre par le biais d'un outil informatique d'aide au choix dont les principes reposent sur ceux de la méthode d'analyse multicritère ELECTRE I.

L'utilisation de ces méthodes et outils est formalisée dans une démarche générale dont la Figure 60 reprend les principales étapes et outils associés.

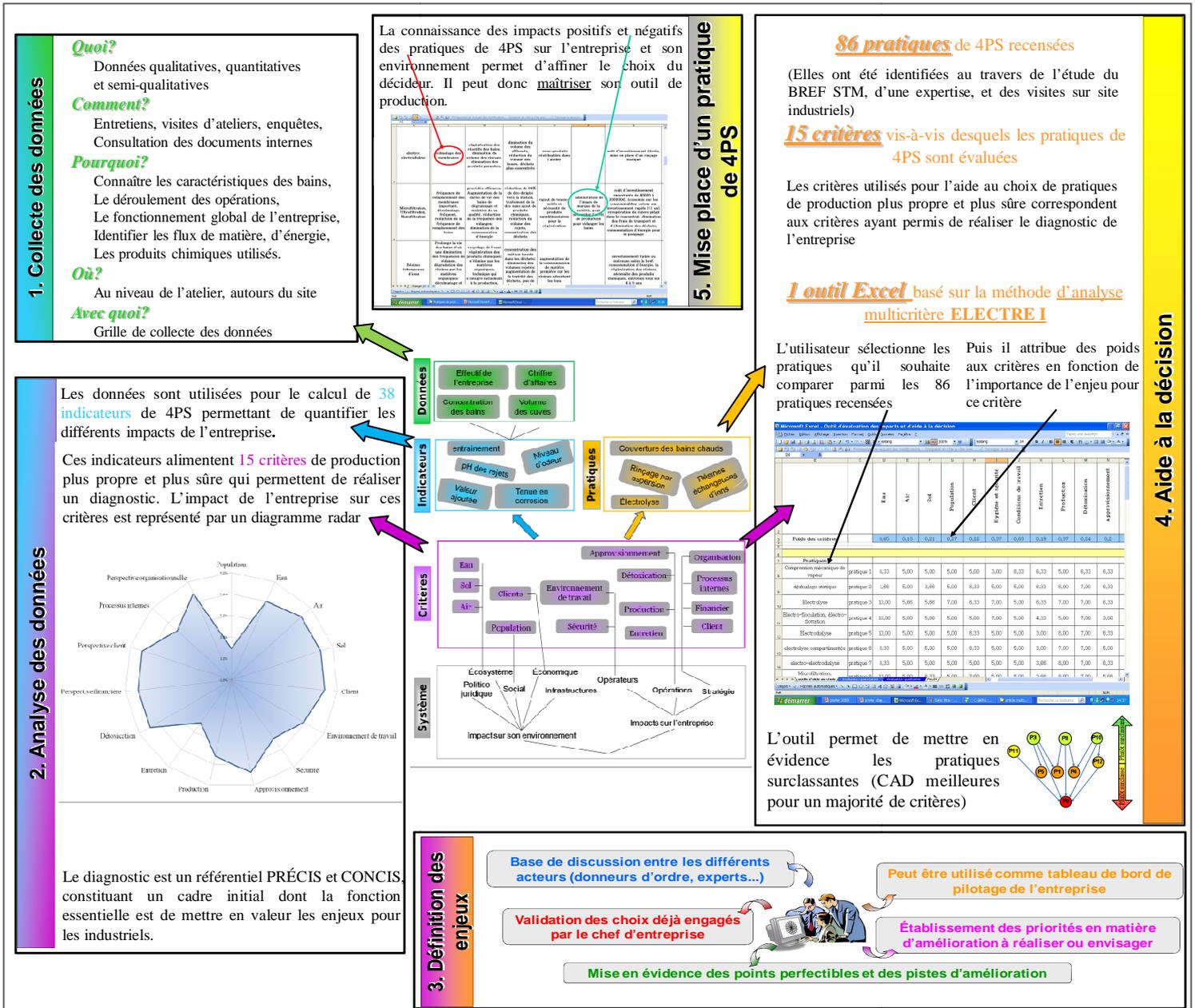


Figure 60 : Schéma récapitulatif de la démarche et des outils associés

En dernier lieu, la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS a été validée par le biais de quatre cas d'étude, dans trois ateliers de traitement de surfaces ligériens. Ces cas d'études montrent que les méthodes développées sont bien accueillies par les chefs d'entreprises et s'adaptent aux différents types d'ateliers de traitement de surface:

➔ La méthode de diagnostic et les outils développés dans ce mémoire permettent à l'industriel de mieux connaître son entreprise en prenant en compte à la fois les impacts environnementaux, à caractère sociaux, économiques ainsi que les risques. Le caractère innovant de la méthodologie d'évaluation des impacts vient du fait qu'elle a été développée à partir d'une analyse systémique. Cela permet de vérifier que la pratique de 4PS mise en œuvre a bien les effets escomptés. De plus le résultat du

diagnostic permet l'identification des éventuels nouveaux enjeux pour l'industriel. L'un des principaux avantages de la méthode de diagnostic proposée est sa contribution aux écotecnologies en proposant une approche novatrice. En effet contrairement aux autres types de méthodes développées au niveau de la Commission Européenne qui se basent sur une logique traditionnelle dans laquelle l'évolution se fait par la réglementation, la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS ne se positionne pas en situation de contrôle. Ainsi l'antagonisme entre performance environnementale et productivité généré par les contraintes exercées par la réglementation n'existe plus. Enfin, la représentation sous forme de diagramme radar permet une compréhension aisée des impacts et enjeux. Ces cas d'études ont permis de montrer également quelques limites de la méthode. En effet le premier désavantage vient de la nécessité de renseigner l'ensemble des indicateurs. La non disponibilité des données est un frein à l'utilisation de la méthode. Un autre point ayant été soulevé est celui de l'aspect qualitatif de certaines données. Contrairement au point précédent qui relevait d'une inexistence de l'information, dans ce cas l'information est connue mais difficilement quantifiable.

- ➔ En ce qui concerne la méthode d'aide au choix elle permet d'éclairer le décideur en comparant jusqu'à 16 pratiques simultanément. Cette méthode constitue donc un véritable support pour la prise de décision puisque d'une part elle permet de clarifier les besoins de l'industriel par l'attribution de poids aux critères, et d'autre part de dégager les pratiques qui s'en rapprochent le plus. Elle doit s'accompagner néanmoins d'une étude de faisabilité technique des solutions envisagées. L'un des points qui peut limiter cette méthode est la significativité des gains de performance. En effet, la méthode permet de décrire les impacts potentiels mais ne propose pas d'ordre de grandeur associé à ces impacts. Par exemple si une pratique a une bonne performance au niveau du critère EAU, on peut se poser la question de savoir pour quel pourcentage de performance il y a un réel gain pour l'industriel ?

Les perspectives de ce travail sont multiples.

- ➔ Tout d'abord, il serait intéressant de renouveler l'enquête ayant aboutie à la pondération des critères dans le but d'obtenir un plus grand nombre d'expertises. En effet, la faible représentativité du panel conduit à l'attribution de priorités discutables. Par exemple pour le sous-système Opérateurs, il apparaît que le critère Sécurité est largement moins important que le critère Environnement de travail. Bien que la notion de sécurité soit faiblement reconnue dans les PME [FAVARO, 1999], une certaine disproportion entre ces deux critères émerge. Par conséquent, une nouvelle enquête permettra de vérifier et valider les jugements émis par les experts. Cette perspective est d'autant plus importante que la méthode de diagnostic repose en grande partie sur les poids attribués à ces critères.
- ➔ Le second axe de recherche qui peut être intéressant de développer, concerne la sensibilité des cibles potentielles lors de l'évaluation des impacts. Effectivement, la susceptibilité d'endommagement dépend du niveau de sensibilité des enjeux vis-à-vis de certains aléas (par exemple : la moyenne d'âge de la population, l'ancienneté des installations, l'état des composants des systèmes techniques, la qualité du bâti...). Ce travail déjà initié durant cette thèse, notamment au travers de l'étude de la sensibilité du milieu extérieur [CIKANKOWITZ *et al.*, 2009], permet de caractériser la sensibilité de l'environnement proche de l'entreprise. Néanmoins, en ce qui concerne

les impacts sur l'entreprise, la recherche pourrait s'orienter vers la caractérisation de la sensibilité des cibles à l'intérieur de l'entreprise (opérateurs, opérations, stratégies) dans le but d'en tenir compte lors du diagnostic des impacts des pratiques de 4PS. Ainsi un important travail semble nécessaire afin d'intégrer cet aspect au tableau de bord de la méthode de diagnostic.

- ➔ Quatre cas d'études ont permis de valider la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS. Bien que ces cas d'études réalisés dans trois sociétés différentes aient montré une bonne adaptabilité de la méthodologie aux différents types d'ateliers, ainsi qu'un accueil favorable de la part des chefs d'entreprises, une des pistes de recherche qu'il conviendrait d'explorer est celle de la dissémination de cette méthodologie à plus grande échelle dans le même secteur d'activité. En général, le principal frein à l'utilisation de l'outil de diagnostic est la collecte des données. Il peut être intéressant de suivre l'évolution au niveau des aspects sociaux (développement de compétences par la formation, amélioration des relations avec les donneurs d'ordre...) d'un ensemble d'entreprises accompagnées dans la durée.
- ➔ Comme il a été dit précédemment, la méthodologie est générique jusqu'aux critères. Elle est donc transférable à un autre secteur d'activité. Il est évident que les indicateurs et les pratiques retenues devront être modifiés et adaptés aux secteurs étudiés. Le secteur du textile présente des similitudes avec le secteur du traitement de surfaces au niveau de la taille des entreprises, de leur mode de production (bains) ainsi que de la pollution générée (pollution aqueuse notamment). L'objectif de ce dernier axe de recherche proposé ici serait d'étudier la faisabilité de transfert de la méthodologie au secteur du textile.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A.

- [ADEME, 2007] Association De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie; site internet www2.ademe.fr; visité le 02/10/2007.
- [ADOLPHE *et al.*, 2006] Adolphe L., Beaumont J., Goger T., Joumard R., Maurin M. et Rousval B.; L'aide à l'évaluation environnementale des systèmes de transport: Propositions; Rapport de projet PIE; 119 p; 2006.
- [AERMC, 2002] Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse; Traitement de surfaces: Épuration des eaux 2^{ème} Edition; 287 p; 2002.
- [AGORA 21 *et al.*, 2002] Agora 21 et ARMINES; Glossaire pour le développement durable; 2002.
- [AIDA, 2009] AIDA- La réglementation des activités à risques; site internet www.ineris.fr/aida/; visité le 31/08/2009.
- [ANAND *et al.*, 1996] Anand Raj P. et Nagesh Kumar D.; Ranking of river basin alternatives using ELECTRE; Hydrological Sciences Journal; volume 41; Issue 5; p 697-713; 1996.
- [ARIST, 2009] ARIST Bourgogne - Technologies Propres et Sobres; site internet www.technologies-propres.com; visité le 13/07/2009.
- [BARPI, 2007] Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles; Pollution de la rivière Cher par déversement d'effluents pollués le 14 septembre 2005; volume n°31236; 4 p; disponible sur le site internet www.aria.developpement-durable.gouv.fr; consulté le 07/05/2007.

B.

- [BARTHÉLÉMY *et al.*, 2000] Barthélémy B. et Quibel J.; Gestion des risques de l'entreprise; Techniques de l'ingénieur, traité de l'entreprise industrielle; volume SE1; Issue n° AG 1100; p 1-16; 2000.
- [BAURAING *et al.*, 2000] Bauraing E., Nicolas J. et Von Frenckell M.; Mission de soutien à la mise en place d'un système de management environnemental dans les PME: Indicateurs de performance environnementale et stratégie de communication; Rapport; 63 p; 2000.
- [BEN MENA, 2000] Ben Mena S.; Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision; Biotechnologie, agronomie, Société et Environnement B.A.S.E.; volume 4; Issue 2; p 83-93; 2000.
- [BENOIT, 2002] Benoit V.; Analyse technique, économique, environnementale et sociale de trois filières de production d'hydrogène par la méthode Multicriterial Analysis for Sustainable Industrial Technologies (MASIT); rapport; 89 p; 2002.
- [BERRAH, 2002] Berrah L.; L'indicateur de performance. Concepts et Applications; Éditions Cépaduès; ISBN 2854285670; 171 p; 2002.
- [BIAU, 2007] BIAU J. B.; Évaluation des impacts environnementaux, choix d'une méthode; rapport de stage de Master EDF; 57 p; 2007.
- [BLÎNDU, 2004] Blîndu I.; Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydraulique; thèse.sci; n° 336 ID; 304 p; 2004.

- [BONNARD *et al.*, 2006] Bonnard N., Falcy M. et Protois J. C.; Fiche toxicologique du cyanure de sodium et du cyanure de potassium FT 111; 6 p; Disponible sur le site internet www.inrs.fr; visité le 22/11/2006.
- BOURGUIGNON *et al.*, 2007] Bourguignon B. et Norotte T.; Dossier d'études d'impact, de danger et de déchets pour la société EUROTHAL; Rapport; 58 p; 2007.
- [BOUVIER, 1998] Bouvier H., Gaudret De La Mauricière, G., Lê Quang X., Mahieu J. C., Perrin P. et Dimerman S.; Ateliers de traitement de surface: "Prévention des risques chimiques" santé, sécurité des personnes; Publication INRS; volume ED 827; 60 p; 1998.
- [BOUYSSOU *ET AL.*, 2006] Bouyssou D., Dubois D., Pirlot M. et Prade H.; Concepts et méthodes pour l'aide à la décision - Analyse multicritère; Éditions Hermès; volume 3; 327 p; 2006.
- [BRAESCH, 1995] Braesch C. et Haurat A.; La modélisation systémique en entreprise; Éditions Hermès; ISBN 2866015088; 288p; 1995.
- [BREF STM, 2005] Prévention et réduction intégrées de la pollution; Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour le traitement de surface des métaux et matières plastiques; 546 p; 2005.
- [BRUNDTLAND, 1988] Brundtland G. H.; Notre avenir à tous; Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement; 454 p; 1988.
- e.*
- [CARPP, 2002] Centre des activités régionales pour une production propre; Alternatives de prévention de la pollution à la source dans le secteur du traitement de surfaces; 158 p; Disponible sur www.cprac.org; 2002.
- [CASEAU, 2002] Caseau P.; Les ACV entre Comptabilités Matières et Aides à la Décision; Académie des Technologies Publications; p 36-40; 2002.
- [CHARPULAT, 2007a] Charpulat V.; Modélisation, Principes, Intérêts, Concepts et Mise en Œuvre; Séminaire du GEM-Risques; Sophia-Antipolis; 2007a.
- [CHARPULAT, 2007b] Charpulat V.; Vérification et validation de modèles de systèmes complexes: application à la Modélisation d'Entreprise; p 136; 2007b.
- [CHAUDET-BRESSY, 2002] Chaudet-Bressy F.; Apport du retour d'expérience à la maîtrise des risques relatifs à l'hygiène, la sécurité et l'environnement, dans les petits établissements industriels. Application à l'industrie du traitement thermique; thèse.sci; 285 p; 2002.
- [CHAUSSADE, 2007] Chaussade J. L.; Motivation et freins pour produire autrement; Université d'été de l'environnement; Lyon; 2007.
- [CIKANKOWITZ *et al.*, 2009] Cikankowitz A., Raymond G., Piatyszek É. et Laforest V.; Comment évaluer la sensibilité intrinsèque des milieux récepteurs et l'intégrer dans une méthodologie globale d'évaluation des performances environnementales?; Déchets Sciences & techniques; 14p; article soumis en mars 2009.
- [CNRS, 2009] Centre national de recherche scientifique; La pollution métallique; 2 p; Disponible sur www.cnrs.fr; 2009.

D.

- [DAOUD, 2009] Daoud W.; Développement d'un système de management intégré de l'éco-conception des appareillages électriques de moyenne tension; thèse.sci; 231 p; 2009.
- [DASSENS, 2007] Dassens A.; Méthode pour une approche globale de l'analyse des risques en entreprise; 280 p; thèse.sci; 2007.
- [D'AUTEUIL *et al.*, 2003] D'Auteuil C. et Bonneau C.; Guide sur les indicateurs; Secrétariat du conseil du trésor QUÉBEC; 47 p; Disponible sur www.tresor.gouv.qc.ca; 2003.
- [DEBRAY, 1997] Debray B.; Système d'aide à la décision pour le traitement des déchets industriels spéciaux; thèse.sci; 313 p; 1997.
- [DEL VECCHIO, 2006] Del vecchio S.; Mesure quantitative des impacts de risque en contexte d'impartition; thèse.sci; 109 p; 2006.
- [DEPOERS *et al.*, 2002] Depoers F., Reynaud E. et Maunoury G. S.; Indicateurs de développement durable; 139 p; 2002.
- [DESPOUY, 2006] Despouy T.; Analyse géographique des risques liés au transport routier des matières dangereuses dans la Loire; rapport de stage à la DDE (42); 105 p; 2006.
- [DESTHIEUX, 2005] Desthieux G.; Approche systémique et participative du diagnostic urbain : processus de représentation cognitive du système urbain en vue de l'élaboration d'indicateurs géographiques; thèse.sci; n°3216; 237 p; 2005.
- [DESTHIEUX *et al.*, 2004] Desthieux G., Joerin F. et Golay F.; Systemic modeling tool of indicators. Application to urban diagnosis; 8th World Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics; 5 p; 2004.
- [DONNELLY *et al.*, 2007] Donnelly A., Jones M., O'Mahony T. et Byrne G.; Selecting environmental indicator for use in strategic environmental assessment; Environmental Impact Assessment Review; volume 27; Issue 2; p 161-175; 2007.
- [DOR *et al.*, 2005] Dor F., Zmirou D., Bard D., Volatier J. L., Pichard A., Laurier D., Mur J. M., Guyonnet D. et Hours M.; Estimations de l'impact sanitaire d'une pollution environnementale et évaluation quantitative des risques sanitaires; Rapport InVS/Afsset; 160 p; 2005.
- [DRIRE, 2006] Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement; site internet www.drire.gouv.fr; visité le 04/11/2006.
- [DROGOUL, 2006] Drogoul A.; Évaluation du niveau de risque lors de la mise en place d'une pratique de production plus propre dans un atelier de traitement de surfaces; rapport de stage de Master EMSE; 116 p; 2006.
- [DUMONT, 2008] Dumont D.; Accidentologie de l'activité de traitements de surfaces; 8 p; Disponible sur le site www.aria.developpement-durable.gouv.fr; visité le 27/10/2008.
- [DUPUY *et al.*, 2009] Dupuy A. et Couvent C.; Bilan de fonctionnement décennal de la société LA BOULE OBUT; 77 p; 2009.

E.

- [EAURMC, 2009] Agence de l'eau Rhône - Méditerranée - Corse; Site internet www.eaurmc.fr; visité le 23/08/2009.
- [EEA, 2005] European Environmental Agency; EEA core set of indicators Guide; 38 p; 2005.
- [EL BOUAZZAOU, 2008] El Bouazzaoui I.; L'empreinte écologique à l'échelle 'micro': Un outil d'évaluation environnementale et de communication sur l'efficacité de l'entreprise dans sa démarche continue de réduction des impacts de ses activités industrielles; thèse.sci; 252 p; 2008.

7.

- [FAVARO, 1999] Favaro M.; La prise en charge de la sécurité dans les PME. Quelques réflexions préalables à la conception d'actions de prévention; Cahier de notes documentaires- hygiène et sécurité du travail; volume n°174; 12 p; 1999.
- [FRÄMLING, 1996] Främling K.; Modélisation et apprentissage des préférences par réseaux de neurones pour l'aide à la décision multicritère; thèse.sci; 303 p; 1996.

8.

- [GARDES, 2001] Gardes L.; Méthodologie d'analyse des dysfonctionnements des systèmes pour une meilleure maîtrise des risques industriels dans les PME: Application au secteur du traitement de surfaces; thèse.sci; 218 p; 2001.
- [GAULT, 2009] Gault G.; Quelle perception de l'environnement chez les dirigeants de PME - Résultats d'un nouveau sondage ADEME/TNS SOFRES; Colloque PM4E: Environnement et Maitrise de l'énergie; 2009.
- [GIANNETTI *et al.*, 2008] Giannetti B. F., Bonilla S. H., Silva I. R. et Almeida C. M. V. B.; Cleaner production practices in a medium size gold-plated jewelry company in Brazil: when little changes make the difference; Journal of Cleaner Production; volume 16, issue 10; p 1106-1117; 2008.
- [GIRARDIN *et al.*, 2005] Girardin P., Guichard L. et Bockstaller C.; Indicateurs et tableaux de bord; Éditions Tec&Doc; ISBN 2-7430-0807-5; 40 p; 2005.
- [GODET, 2001] Godet M.; Manuel de prospective stratégique. L'art et la méthode; Éditions Dunod; ISBN 210 005856 8; 412 p; 2001.
- [GONDRAN, 2001] Gondran N.; Système de diffusion d'information pour encourager les PME-PMI à améliorer leurs performances environnementales; thèse.sci; 364 p; 2001.
- [GONZALÈS, 2008] Gonzalès C.; Introduction aux journées Ecotech-LR sur l'éco-conception et l'écologie industrielle; Colloque Ecotech-LR de Montpellier; 2008.

9.

- [HARSCOET, 2007] Harscoet E.; Développement d'une comptabilité environnementale orientée vers la création de la valeur: l'application à un investissement de prévention des pollutions; thèse.sci; 373 p; 2007.

9.

- [INRS, 2001] Institut national de recherche et de sécurité; Cuves de traitement de surfaces, guide pratique de ventilation n°2; Publications INRS; volume ED 651; 23 p; 2001.
- [IPPC, 1996] Directive 96/61/CE du conseil du 24 septembre 1996 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution; JOUE n°257; 1996.
- [IRC, 2004] International Water and Sanitation Centre; Monitoring Millennium Developments Goals - A review of experiences and challenges; Rapport; 81 p; Disponible sur le site www.watermonitoringalliance.net; visité le 17/09/2009; 2004.
- [ISO 14001, 2004] Norme NF EN ISO 14001; Système de management environnemental, Exigences et lignes pour son utilisation; 25 p; 2004.
- [ISO 9001, 2008] Norme NF EN ISO 9001; Systèmes de management de la qualité - Exigences; volume X50-131; 2008.

9.

- [JOERIN, 1997] Joerin F.; Proposition d'une approche par utilisation de SIG et de méthodes d'analyse multicritère; thèse.sci; n°1755; 269 p; 1997.

2.

- [KABONGO, 2004] Kabongo J.; Intégrer économie et écologie: le cas de l'industrie canadienne; Vertigo; volume 5; Issue 2; 12 p; 2004.
- [KAPLAN et al., 1996] Kaplan R. et Norton D. P.; Linking the Balanced ScoreCard to strategy; California management review; volume 39; Issue 1; p 53-79; 1996.
- [KJAERHEIM, 2003] Kjaerheim G.; Cleaner production and sustainability; Journal of Cleaner Production; volume 13; p 329-339; 2003.
- [KOWALSKI, 2006] Kowalski K.; Aide à la décision par l'analyse sémantique et la simulation des interactions dans l'organcube, modèle qualitatif général d'audit pour les entreprises; thèse.sci; 431 p; 2006.
- [KRIPPENDORFF, 2004] Krippendorff K.; Content Analysis - An introduction to its methodology - second edition; Sage Publications; ISBN 0-7619-1545-1; 413 p; 2004.

L.

- [LACOSTE, 2003] Lacoste L.; Pilotage de la performance: quelles solutions pour quelles entreprises? Rapport ENMP; 44 p; 2003.
- [LAFOREST, 2008] Laforest V.; Applying Best Available Techniques in Environmental Management Accounting: from the definition to an assessment method; E.M.A.N.; 2008.
- [LAFOREST, 2003] Laforest V.; Rapport de Projet ENVIREDOX; 2003.
- [LAFOREST, 2005c] Laforest V.; Rapport de projet PIPSI 2ème année; 23 p; 2005.
- [LAFOREST, 1999] Laforest V.; Technologies Propres: Méthode de minimisation des rejets et de choix des procédés de valorisation des effluents: Application aux ateliers de traitement de surface; thèse.sci; 218 p; 1999.

- [LAFOREST *et al.*, 2006] Laforest V. et Cikankowitz A.; Contextes législatifs et institutionnels français: application au secteur du traitement de surface; Rapport de projet Zéro Plus; 54p; 2006.
- [LAFOREST, 2000] Laforest V., Debray B., Grange D. et Bourgois J.; Technologies propres et traitement de surface; Déchets Sciences & Techniques; volume 18; p 33-38; 2000.
- [LANNOY *et al.*, 2001] Lannoy A. et Procaccia H.; L'utilisation du jugement d'expert en sûreté de fonctionnement; Éditions Tec & DOC; ISBN 2-7430-0484-3; 392 p; 2001.
- [LAURAS, 2004] Lauras M.; Méthodes de diagnostic et d'évaluation de performances pour la gestion de chaînes logistiques: Application à la coopération maison-mère - filiales internationales dans un groupe pharmaceutique et cosmétique; thèse.sci; n°2119; 197 p; 2004.
- [LE MOIGNE, 1987] Le Moigne J. L.; Qu'est-ce qu'un modèle? ; Confrontations Psychiatriques, numéro spécial consacré aux MODELES; 21 p; 1987.
- [LE MOIGNE, 1977] Le Moigne J. L.; La théorie du système général, théorie de la modélisation; Presse Universitaire de France; 258 p; 1977.
- [LE PROGRÈS, 2007] La Tribune Le Progrès; Interdiction de consommer les végétaux autoproduits hors serre; article parut en juin 2007.
- [LEBLANC, 2005] Leblanc M.; Les accidents du travail et les maladies professionnelles dans la région Nord-Pas-De-Calais; Intersections Nord Pas De Calais; volume 25; 16 p; 2005.
- [LEVEILLARD *et al.*, 2006] Leveillard F., Laforest V., Piatyszek E. et Bourgois J.; Estimation et réduction de l'entraînement sur une chaîne d'un atelier de traitement de surface; Rapport; 15p; 2006.
- [LOI, 1985] Arrêté du 26 septembre 1985 relatif aux installations de traitement de surface; JO du 16/11/1985.
- [LOI 2006, 2006] Arrêté du 30 juin 2006 relatif aux installations de traitement de surface soumises à autorisation au titre de la rubrique 2565 de la nomenclature des installations classées; JO du 05/09/2006.
- [LUPAN *et al.*, 2006] Lupan R., Kobi A., Robledo C., Delamarre A. et Christofol H.; Modélisation et évaluation de la performance en conception; 6^{ème} conférence francophone de modélisation et simulation MOSIM'06; 10 p; 2006.
- M.*
- [MAES, 1996] Maes M.; Technologies propres et sobres - l'économie émergente; Éditions Pierre Johanet et ses fils; 348 p; 1996.
- [MAHIEU, 1985] Mahieu J. C.; Préparation des surfaces métalliques. Décapage-Dégraissage-Polissage; Publications de l'INRS; 10 p; 1985.
- [MATHIEU, 2004] Mathieu H.; Modélisation conjointe de l'infrastructure et des processus pour l'administration pro-active de l'entreprise distribuée; thèse.sci; 252 p; 2004.
- [MAYSTRE *et al.*, 1994] Maystre L. Y., Pictet J. et Simos J.; Méthodes multicritères ELECTRE: Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale; Presses polytechniques et universitaires romandes; ISBN 2-88074-267-6; 323 p; 1994.
- [MEGARTSI, 1997] Megartsi R.; Étude comparative des méthodes d'analyse des systèmes de production; Rapport de Master Université de droit d'Aix-Marseille; 78 p; 1997.

- [MENGUAL, 2005] Mengual P. G.; Contribution à la caractérisation de la vulnérabilité des PME-PMI aux inondations: Vers un instrument méthodologique d'autodiagnostic; thèse.sci; 225 p; 2005.
- [MORAIS et al., 2006] Morais D. C. et Almeida A. T.; Water supply system decision making using multicriteria analysis; Water SA; volume 32; Issue 2; p 229-236; 2006.
- [MUIRAS et al., 1995] Muiras J. M., Sutter B. et Guillaus J. C.; Traitements de surface: Techniques de réduction de déchets; Publications du CETIM; ISBN 2-85400-339-X; 134 p; 1995.

O.

- [Olsthoorn et al., 2001] Olsthoorn X., Tyteca D., Wehrmeyer W. et Wagner M.; Environmental indicators for business: a review of the literature and standardisation methods; Journal of Cleaner Production; volume 9; Issue 5; p 453-463; 2001.

P.

- [PÉPIOT, 2005] Pépiot G.; Modélisation des entreprises sur la base des compétences; thèse.sci; n°3300; 257 p; 2005.
- [PÉRILHON, 2003] Périlhon P.; MOSAR: Présentation de la méthode; Techniques de l'ingénieur; volume SE 4061; 16 p; 2003.
- [PÉRILHON, 2006] Périlhon P.; Systémique et risques: Application a une méthode générique d'analyse de risques; Conférence MADS-MOSAR; 88 p; 2006.
- [PERRIN, 2006] Perrin L.; Les méthodes d'analyse de risques; Conférence MADS-MOSAR; 17 p; 2006.
- [PERSONNE, 1998] Personne M.; Contribution à la méthodologie d'intégration de l'environnement dans les PME-PMI: Évaluation des performances environnementales; thèse.sci; 293 p; 1998.
- [PINGAUD, 2003] Pingaud H.; Solutions pratiques : Logistiques & Supply Chain, Quels sont les outils et systèmes d'information de la logistique et de la supply chain; Éditions WEKA; 36 p; 2003.
- [POURCEL et al., 2005] Pourcel C. et Gourc D.; Modélisation d'entreprises par les processus. Activités, organisation & applications; Éditions Cépaduès; ISBN 2.85428.663.4 ; 166 p; 2005.

2.

- [QUÉRÉ et al., 2007] Quéré L., Legrand S. et Kobierska F.; Demande d'autorisation à exploiter d'EUROTHAL; Rapport de Mater EMSE; 54 p; 2007.

R.

- [RENAUDAT, 2000] Renaudat E.; Traitement de surfaces: impacts et solutions; Décision environnement; volume 86; p 30-33; 2000.
- [RENNINGS et al., 2001] Rennings K. et Zwick T.; The employment impact of Cleaner Production on the firm level - Empirical evidence from a survey in five European countries; IJIM; 41 p; 2001.
- [REPETTI, 2004] Repetti A.; Un concept de monitoring participatif au service des villes en développement. Approche méthodologique et réalisation d'un observatoire urbain; thèse.sci; n°2903; 220 p; 2004.

- [REYNE, 1991] Reyne M.; Le diagnostic technico-économique de l'entreprise; Éditions Hermès; ISBN:2-86601-262-3; 86 p; 1991.
- [RILEY, 2001] Riley J.; Multidisciplinary indicators of impact and change - Key issues for identification and summary; Agriculture, Ecosystems & Environment; volume 87; Issue n°2; p 245-259; 2001.
- [ROBERT, 2001] Le Petit Robert, Dictionnaire de la langue française; 2842 p; 2001.
- [RODRIGUEZ, 2006] Rodriguez T.; Identification d'indicateurs de développement durable dans le contexte côtier et lagunaire du territoire de Thau; Rapport de stage de Master AGROCAMPUS de Rennes; 104 p; 2006.
- [ROUSSAT, 2007] Roussat N.; Optimisation des stratégies de gestion du contenu "matières premières et énergie" des déchets produits et utilisés sur un territoire urbanisé. Application aux déchets de démolition du Grand Lyon; thèse.sci; 283 p; 2007.
- [ROY, 1985] Roy B.; Méthodologie multicritère d'aide à la décision; Éditions Économica; 423 p; 1985.

S.

- [SAATY, 1984] Saaty T. L.; Decision making for leaders; Editions ESF; ISBN 2-7101-0491-1; 232 p; 1984.
- [SAUVANT, 2003] Sauvant D.; Principes généraux de modélisation systémique; Publication de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon; 11 p; 2003.
- [SCHÄRLIG, 1985] Schärli A.; Décider sur plusieurs critères, panorama de l'aide à la décision multicritère; Presses polytechniques et universitaires romandes; ISBN 2-88074-073-8; 304 p; 1985.
- [SCHÄRLIG, 1996] Schärli A.; Pratiquer Electre et Prométhée: Un complément à décider sur plusieurs critères; Presses polytechniques et universitaires romandes; ISBN 2-88074-340-0; 173 p; 1996.
- [SESSI, 2007] SESSI; Enquête annuelle d'entreprise 2007; Disponible sur le site www.industrie.gouv.fr/sessi/enquetes; visité le 16/07/2008.
- [SFTS, 2006] Société Forézienne de traitement de surfaces; Documents internes; 2006.

7.

- [TENIERE-BUCHOT, 1989] Tenière-Buchot P. F.; L'ABC du pouvoir, Agir Bâtir Conquérir... et sourire; Les éditions d'organisation; ISBN 2 7081 0962 6; 238 p; 1989.
- [TIXIER, 2002] Tixier J.; Méthodologie d'évaluation du niveau de risque d'un site industriel de type Seveso, basée sur la gravité des accidents majeurs et la vulnérabilité de l'environnement; thèse.sci; 2002.
- [TYTECA, 2002] Tyteca D.; Problématique des indicateurs environnementaux et de développement durable; congrès de la Société de l'Industrie Minérale; 15 p; 2002.

U.

- [UNEP, 2001] Programme des Nations Unies pour l'Environnement; Cleaner production; Disponible sur le site www.unep.fr/pc/cp/understanding_cp/home.htm; visité le 17/01/2008; 2001.

[UNNIKRISHNAN *et al.*, 2006] Unnikrishnan Seema et Hegde D. S.; An analysis of cleaner production and its impact on health hazards in the workplace; Environment International; volume 32; Issue 1; p 87-94; 2006.

v.

[VALLESPIR *et al.*, 2003] Vallespir B., Braesch C., Charpulat V. et Crestani D.; L'intégration en modélisation d'entreprise: Les chemins d'U.E.M.L. ; 4^{ème} conférence francophone de MODélisation et SIMulation MOSIM; 6 p; 2003.

[VAN BERKEL, 2002a] Van Berkel R.; Application of Cleaner Production Principles and Tools for Eco-Efficient Minerals Processing; Green Processing Conference; p 57-69; 2002.

[VAN BERKEL, 2007] Van Berkel R.; Cleaner production and eco-efficiency initiatives in Western Australia 1996–2004; Journal of Cleaner Production; volume 15; Issue 8-9; p 741-755; 2007.

[VAN BERKEL, 2002b] Van Berkel R.; Cleaner production uptake in small to medium sized enterprises; Waste and Recycle Conference; 2002.

[VERDEL, 2000] Verdel T.; Méthodologies d'évaluation globale des risques: Applications potentielles au Génie Civil; Presses de l'ENPC; p 23-28; 2000.

[VINCKE *et al.*, 1989] Vincke P. et Roy B.; L'aide multicritère à la décision; Éditions de l'Université de Bruxelles ; ISBN 2-8004-0970-3 ; 180 p; 1989.

w.

[WEIDENHAUPT *et al.*, 2000] Weidenhaupt A. et Meier M. A.; Analyse du cycle de vie . Application aux systèmes de dépollution; Techniques de l'ingénieur- Traité de l'Environnement; volume G 5810; 14 p; 2000.

[WERY, 2001] Wery M.; Décapage chimique des surfaces métalliques; Techniques de l'ingénieur - Traité des Matériaux métalliques; volume M 1456; 16 p; 2001.

[WERY, 1998] Wery M.; Dégraissage; Techniques de l'ingénieur - Traité des Matériaux métalliques; volume m 1450; 26 p; 1998.

z.

[ZARIFIAN, 1990] Zarifian P.; La nouvelle productivité; Éditions L'Harmattan; 212 p; 1990.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE 1 : Synthèse des méthodes d'évaluation environnementale
- ANNEXE 2 : Méthodes de modélisation simples
- ANNEXE 3 : Grille d'identification des critères de 4PS
- ANNEXE 4 : Questionnaire de pondération des critères
- ANNEXE 5 : Liste des indicateurs potentiels
- ANNEXE 6 : Matrice de sélection des indicateurs par criblage
- ANNEXE 7 : Liste des indicateurs non retenus
- ANNEXE 8 : Indicateurs de 4PS
- ANNEXE 9 : Matrice qualitative
- ANNEXE 10 : Matrice semi-qualitative
- ANNEXE 11 : Notice d'utilisation de l'outil informatique
- ANNEXE 12 : Tableau de bord de la société A
- ANNEXE 13 : Tableau de bord de la société B
- ANNEXE 14 : Tableau de bord de la société C
- ANNEXE 15 : Étude de cas résines

ANNEXE 1 : MÉTHODES D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALES

Méthode	Objectif	Type d'approche	Type d'impact	Avantages	Inconvénients	Utilisation finale	Source
ACV	Bilan environnemental d'un produit le long de son cycle de vie	<u>Produit</u>	Global et Multi-impacts: effet de serre, eutrophisation, destruction de la couche d'ozone...	Normalisé, stade du cycle de vie le plus impactant, Consensus Exhaustivité,	Mal adaptée à l'évaluation des dommages locaux, certains impacts non pris en compte : bruit...	Communication, éco-conception, évaluation, Aide à la décision,	[CASEAU, 2002] [ISO 14040, 1997]
Bilan Carbone	Estimations directes et indirectes des GES provenant d'activités industrielles ou de collectivités territoriales	<u>Site</u>	Global et Mono-impact: Effet de serre	Plus simple que l'ACV, expertise rigoureuse et transparente	Choix du périmètre d'application engendre des ambiguïtés. Un seul impact pris en compte	Aide à la décision, communication	[ADEME, 2007]
CORINAIR	Recensement des émissions de polluants atmosphériques d'activités industrielles	<u>Site</u>	Global et Multi-impacts: smog, qualité de l'air, eutrophisation...	Transparence et cohérence, comparaison entre pays	Ciblé sur la pollution atmosphérique	Communication, aide à la décision	[BOUSCAREN <i>et al.</i> , 1989] [EEA, 2007]
Eco-efficiency	Rendre l'éco-efficacité mesurable,	<u>Produit</u>	Consommation de M ¹ ^{ères} , d'énergie, émissions dans l'air, l'eau, le sol, santé	Prend en compte les approches ACV et LCC, Adapté à l'ISO 14040	Les coefficients de pondération pour une note unique sont dangereux, évaluation économique prospective	Aide à la décision stratégique	[VAN BERKEL, 2007a] [VAN BERKEL, 2007b] [WBCSD, 1999]
Eco-indicator 99	Évaluation de l'impact environnemental d'1 produit sur son cycle de vie, et comparer 2 produits	<u>Produit</u>	Dommages sur la santé humaine, sur la qualité des écosystèmes, sur les ressources naturelles	Traduit simplement l'inventaire du cycle de vie en indicateurs	Incertitudes importantes, donc ne peut servir d'outil d'éco-labellisation	Comparaison de produits, éco-conception,	[BIAU, 2007] [WEIDENHAUPT <i>et al.</i> , 2000]
envIMPACT	Outil d'analyse des risques carbone à l'usage des gestionnaires de fonds	<u>Site</u>	Global et Mono-impact: Effet de serre	S'adapte au secteur financier de l'entreprise	Informations nécessaires à l'évaluation des entreprises peu accessibles	Aide à la décision	[BIAU, 2007]
EPS coach	Accompagner les entreprises dans leur démarche de maîtrise des consommations et GES	<u>Site</u>	Global et Multi-impact: Efficacité énergétique, effet de serre	Comptabilité énergétique, Impact de la structure de production sur la consommation et sur les GES	Cette démarche n'a de sens que dans Le cas d'une approche pluriannuelle	Audit énergétique applicable à toute entreprise quelle qu'en soit la taille et l'activité	[BIAU, 2007]
EPS system	Comparer les impacts de 2 produits sur l'environnement	<u>Produit</u>	Global et Multi-impact: santé, capacité de production des écosystèmes, ressources,	1 seule unité (ELU) Degré d'incertitude	Simplification du résultat risquée car niveau d'agrégation élevé avec un seul indicateur final	Comparaison de produits, éco-conception	[BIAU, 2007]

			biodiversité				
Étude d'impact	Apprécier les conséquences des projets sur l'environnement pour en limiter les impacts négatifs	<u>Site</u>	Local et Multi-impact: cours d'eau à proximité, nappes phréatiques, faune, flore, bruit, paysage...	Étude exhaustive qui aborde différents aspects (environnemental, sociétal, financier)	Cette étude est essentiellement descriptive. Prend en compte uniquement l'impact local	Demande d'autorisation à exploiter	[BENOIT, 2002] [LOI 1976, 1976]
Évaluation de la politique environnementale	Indicateur de réussite à moyen terme de la politique environnementale d'une entreprise	<u>Site</u>	Management économique, intégré de l'environnement, management social	Valorisation d'une démarche de développement durable auprès des investisseurs	Peu d'impact sur le comportement des firmes, risque de confusion entre critères environnementaux, sociaux et économiques	Communication, évaluation	[BARKAWI <i>et al.</i> , 2008]
Évaluation des risques pour les écosystèmes	Évaluer la menace visant un élément particulier de l'environnement d'un site	<u>Site</u>	Local : Biodiversité, ressources biologiques sauvages, agricoles, et forestières	Rigoureux, peu d'incertitude scientifique	Communication difficile, Ne tient pas compte des enjeux indirects (GES, eutrophisation)	Aide à la décision dans la gestion de sites	[INERIS, 2003]
Green-E	Aide dans la démarche de management environnemental, identifie les processus générant le plus de nuisances	<u>Site</u>	énergie primaire, CO ₂ , santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique, utilisation de ressources	Visualisation des coûts associés au cycle de vie Analyse de conformité réglementaire, mise à jour régulière	La conformité réglementaire uniquement au droit suisse	Aide au management environnemental	[ECOINTESYS - LIFE CYCLE SYSTEMS, 2009]
Integrated substance chain management	Réduire l'impact environnemental global de la chaîne de substances utilisées au cours du cycle de vie du produit étudié	<u>Produit</u>	Global : Consommation de ressources	Méthodologie bien structurée et complète permettant une vision globale du problème	Méthode longue et solutions généralement coûteuses	Aide à la décision et à l'innovation	[BIAU, 2007] [DAWEI <i>et al.</i> , 2004]
MASIT	Comparer les nouvelles technologies aux technologies de référence afin d'identifier les améliorations significatives sur des points du DD. Méthode qui dérive de l'ACV	<u>Produit</u>	La réglementation, environnement, risques industriels et technologiques, économie et social, technique	Démarche structurée qui offre une vision d'ensemble des technologies dans leur contexte, pousse à une recherche de critères d'évaluation pertinents	Méthode lourde à appliquer	Comparaison de technologies selon une vision globale	[BENOIT, 2002] [RAFENBERG, 2001]
MePSS	Méthodologie pour le développement d'offres innovantes, proposer des systèmes produit-service plus bénéfiques pour l'entreprise, le client et l'environnement	<u>Produit</u>	Local et Multi-impacts : Santé humaine, écosystème, consommation des ressources	Méthode complète et sérieuse adaptable à toute situation et prenant en compte tous les paramètres nécessaires à la conception d'un produit-service innovant	Méthode lourde à appliquer	Aide à l'innovation	[VAN HALEN <i>et al.</i> , 2005]
Méthode biotope	Quantification de l'impact d'un projet ou d'une activité sur la biodiversité, étude des gains et pertes en biotope	<u>Site</u>	Local et Mono-impact: biodiversité	Compare simplement des projets similaires sur la base de leurs impacts sur la biodiversité, adaptable	Pas de prise en compte des mesures de mitigation prises par les industriels	Aide à la décision, communication	[VATTENFALL ; 2000] cité dans [BIAU, 2007]
Monitoring and	Mesure, analyse, diagnostic et rapport	<u>Site</u>	Local et Mono-impact:	Amélioration du rendement	De l'instrumentation	Aide à la réduction	[BIAU, 2007]

targeting	de la consommation d'énergie des procédés et des bâtiments afin d'identifier les postes les plus gourmands		Efficacité énergétique	énergétique des équipements, réduction des coûts énergétiques, meilleures pratiques d'exploitation	supplémentaire est souvent nécessaire pour obtenir tous les relevés de consommation du système et assurer son efficacité	de la consommation d'énergie, suivi	
SafeClimate	Comptabiliser les émissions directes et indirectes de CO ₂ et mettre en place des actions de réduction des émissions dans toute organisation (entreprise, institution...)	<u>Site</u>	<u>Global et Mono-impact:</u> Émission de CO ₂	Méthode « pas à pas » des études séparées sur chacun des domaines permettent d'accompagner le porteur de projet, outil transparent, pédagogique	Seul le CO ₂ est pris en compte parmi les gaz à effet de serre Outil assez rigide, l'utilisateur a peu de marge de manœuvre possibles	Aide à la réduction des émissions de CO ₂ , communication	[BLANCHARD <i>et al.</i> , 2004]
ScanRwin	Surveillance des consommations énergétiques d'une entreprise	<u>Site</u>	<u>Local et Mono-impact:</u> Efficacité énergétique	Grande simplicité d'utilisation, le logiciel fonctionne de manière autonome	-	Aide à la surveillance des consommations énergétiques	[DENORME ENERGY SYSTEM, 2004]
The GHG protocol (Greenhouse gas Protocol)	Fournir un cadre méthodologique pour la comptabilisation des émissions d'une entreprise et réduction des GES d'un projet	<u>Site</u>	<u>Global et Mono-impact:</u> Effet de serre	Transparence de la méthode, approche à divers niveaux selon les données dont on dispose	Procédure de calcul qui peut être longue,	Communication, aide à la décision, déclaration des émissions	[WBCSD, 1999] [BIAU, 2007] [BLANCHARD <i>et al.</i> , 2004]

ANNEXE 2: MÉTHODES DE MODÉLISATION SIMPLES ÉTUDIÉES

SADT (Structured Analysis and Design Technique)

La méthode SADT ²⁶, proposée à la fin des années 70 par Doug Ross, permet une analyse structurée des systèmes. Cette méthode fut utilisée pour la modélisation de systèmes logiciels, puis fut standardisée et rendue publique sous le nom d'IDEF0. Elle a pour objectif la réalisation de schémas directeurs qui permettent de connaître la situation d'une entreprise, et de spécifier les différentes fonctions du système à concevoir, à partir d'une analyse des besoins [MEGARTSI, 1997]

SADT introduit le principe de décomposition fonctionnelle et la modélisation par la représentation graphique des activités (Figure 62) [ABDMOULEH, 2004]. Les processus sont décrits à travers une approche systémique en ce sens où tout système complexe est une structure composée de systèmes plus simples en interaction [LAURAS, 2004]. Le modèle est basé sur des concepts de

- boîtes d'activités représentées par des rectangles portant la fonction globale,
- d'entrées/sorties (flèches) représentant les contraintes existant entre les activités [NANCY, 2007]. Les entrées de matière d'œuvre (flèches de gauche) sont transformées par le processus tandis que les données de contrôle en modifient la mise en œuvre (flèches du dessus). Les sorties représentent ce qui est produit par le système (flèches de droite). Les entrées doivent être suffisantes pour produire les sorties avec l'aide des données de contrôle et des ressources disponibles (supports) [LUPAN *et al.*, 2006].

La méthode part d'une approche descendante de décomposition des activités du système (Figure 63). Le premier niveau du modèle est assez abstrait : la boîte-mère. Il s'agit d'une description générale du système à étudier. La décomposition en sous-fonctions de cette boîte-mère permet d'affiner la perception du système et de sa structure. Ce principe de décomposition fonctionnelle permet donc de jouer sur le niveau d'abstraction tout en garantissant une cohérence entre les différents degrés de finesse.

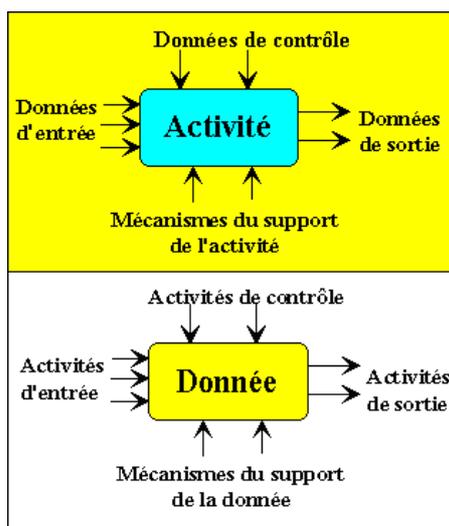


Figure 61 : Actigramme et Datagramme

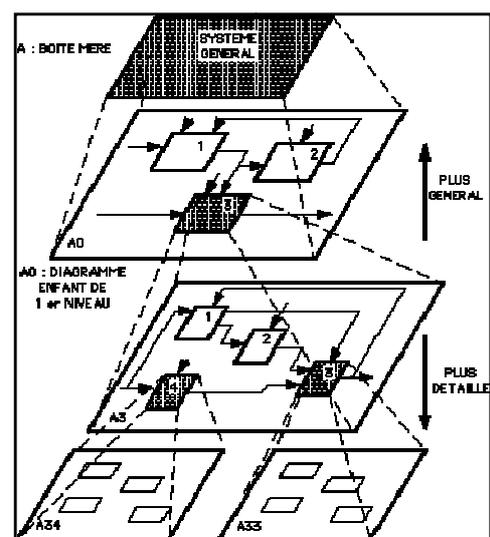


Figure 62 : Représentation globale du système

²⁶ SADT est une marque déposée de SofTech (USA) et d'IGL Technologie (France)

La méthode SADT permet la décomposition des activités de manière modulaire, hiérarchique et structurée, ce qui facilite la compréhension des problèmes étudiés. Cependant la non-distinction des différents types de flux entrant et sortant, la non-évolution dans le temps, le formalisme graphique ainsi que le manque de sémantique de la méthode contribuent à rendre cette méthode confuse dans l'interprétation du modèle et statique.

La méthode GRAI (Grphe à Résultats et Activités Inter-reliés)

GRAI a été développée par les professeurs Pun et Doumeingts au début des années 90 dans le but de mettre en évidence le système décisionnel et informationnel des entreprises de bien et de services. Elle a pour objectif l'identification des composants d'une organisation ainsi que leurs relations statique et dynamique. Elle est basée sur une approche systémique [PÉPIOT, 2005].

La méthode propose la représentation de l'entreprise à travers différentes vues : fonction, information, ressources, et organisation, matérialisées par la grille GRAI (Figure 64) [LUPAN *et al.*, 2006]. La grille matérialise la situation des différents centres de décision ainsi que les liens de subordination et de synchronisation qui les relient, les activités associées à chacun de ces centres ainsi que les supports nécessaires à l'exécution de l'activité [PÉPIOT, 2005] [MEGARTSI, 1997]. La méthode s'appuie également sur le concept de réseaux GRAI qui décrivent de manière détaillée des activités d'un centre de décision planifié dans la grille GRAI.

Fonction H/P	Informations Externes	Gérer les produits		Planifier la produc- tion	Gérer les ressources		Informa- tion internes
		Acheter	Approvi- sionner		Humaines	Technolo- giques	
H- P-				↓ ↓ ↓			
H- P-			→	Centre de décision	←		
H- P-			↓	↓ ↓ ↓			

Figure 63: La grille GRAI

Les points forts de la méthode GRAI résident dans le fait qu'elle est bien adaptée pour analyser globalement le système de production, puisqu'elle permet une représentation synthétique et hiérarchique des fonctions, et que sa mise en œuvre ainsi que son exploitation est aisée. Cependant la méthode favorise la vue fonction au détriment de la vue organisation ce qui empêche une approche globale ou intégrative. De plus la difficulté à distinguer clairement le système opérant, d'information et de décision et la multiplication des activités rend les réseaux GRAI complexes et donc inadaptés à la plupart des systèmes industriels [MEGARTSI, 1997]

OSSAD (Office Support Systems Analysis and Design)

L'approche OSSAD est née dans le cadre des projets ESPRIT financés par l'Union Européenne en 1989. L'objectif de la méthode est la gestion des problèmes organisationnels de la bureautique. L'approche OSSAD propose 2 niveaux pour modéliser le réel :

- le modèle abstrait définit les objectifs d'une organisation en la représentant en terme de fonction (marketing, production, finance) et de paquets d'information échangés entre elles (statistiques, contrats...) (Figure 65). Le modèle est affiné par la décomposition des fonctions en sous-fonctions, jusqu'au niveau de l'activité (fonction non-décomposable).

- le modèle descriptif définit les ressources humaines et technologiques de l'organisation en se décomposant en 3 types de formalismes graphiques : la matrice des activités-rôles qui représente la répartition des moyens humains pour atteindre les objectifs, le graphe des rôles qui montre la circulation des informations entre les différents rôles, et le graphe des opérations qui précise le déroulement des procédures en modélisant les opérations exécutées par les rôles ainsi que les outils utilisés [GLASSEY *et al.*, 2002] [KOWALSKI, 2006].

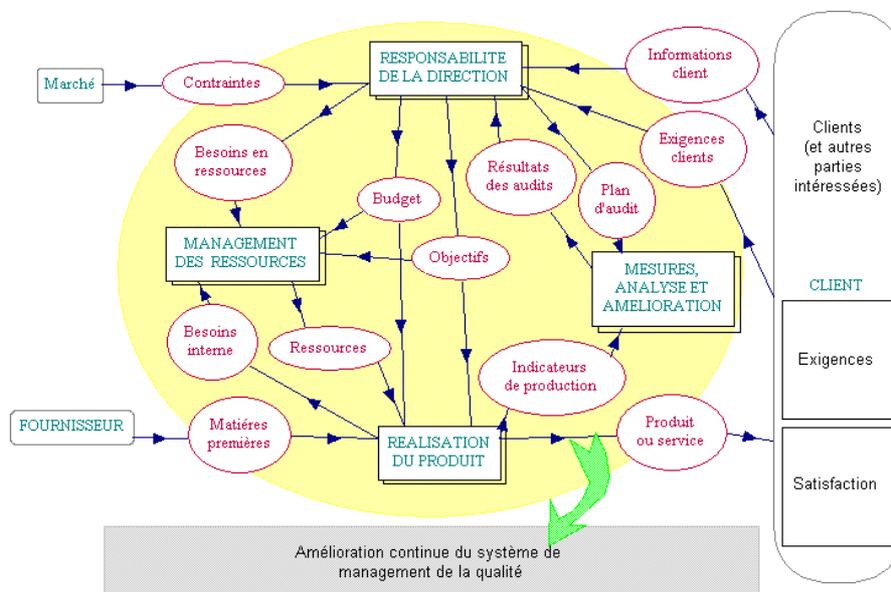


Figure 64 : Exemple de cartographie des processus du modèle abstrait

OSSAD permet de couvrir tous les aspects de la modélisation des processus. De plus la décomposition du modèle abstrait permet un bon niveau d'abstraction de la méthode. Cependant cette méthode n'est pas très flexible pour s'adapter à d'autres types d'organisation.

UML (Unified Modeling Language)

UML est un langage de modélisation orienté objet, qui envisage le système comme un ensemble fini d'objets qui collaborent pour assurer une mission globale. Cette collaboration se réalise suivant le modèle comportemental particulier de chaque objet. Deux objets ayant le même modèle comportemental appartiennent alors à la même classe. La difficulté réside alors dans l'identification des classes d'objets nécessaire au fonctionnement du système. En

général, afin de caractériser les classes, et les objets de classe, il est nécessaire d'identifier les membres de classes qui se divisent en 3 catégories [MEGARTSI, 1997]:

- Les attributs (ou données) permettent d'associer des valeurs aux objets de classe
- Les opérations assurent la description des services offerts par chaque objet
- Les relations traduisent les interdépendances entre les classes.

La modélisation UML permet de modéliser les concepts sur 9 vues conduisant à 9 types diagrammes :

-Le diagramme de cas d'utilisation représente les fonctions du système du point de vue des utilisateurs. Il a pour but de décrire les interactions entre un système et son environnement. Les acteurs interagissent avec le système en provoquant des évènements, des actes ou en récupérant les résultats des cas d'utilisation.

-Le diagramme d'activités décrit les flux entre activités au sein d'un système. Cela permet de représenter le comportement d'une méthode ou d'un processus métier en représentant exactement la séquence des activités (Figure 66).

-Le diagramme de classe modélise la structure statique des systèmes en termes de classe et de relation. La classe est représentée par un rectangle dans lequel figure les éléments textuels qui précisent ses caractéristiques.

-Le diagramme de séquence est une représentation des objets et de leur relation selon une ligne temporelle : la circulation de l'information est alors décrite de manière chronologique. Ces diagrammes sont en général utilisés pour la modélisation de systèmes informatiques cependant les processus opérationnel peuvent être modélisés en mettant l'accent sur la circulation de l'information.

-Le diagramme de collaboration permet une représentation spatiale des objets modélisés, de leurs liens et interactions.

-Le diagramme de composants montre les composants physiques d'une application.

-Le diagramme de transition montre le comportement dynamique d'un objet en termes d'états, d'activités, de transition et d'évènements.

-Le diagramme d'objets schématise les objets et leur lien en une instance donnée. Un objet étant un élément particulier d'une classe.

-Le diagramme de déploiement

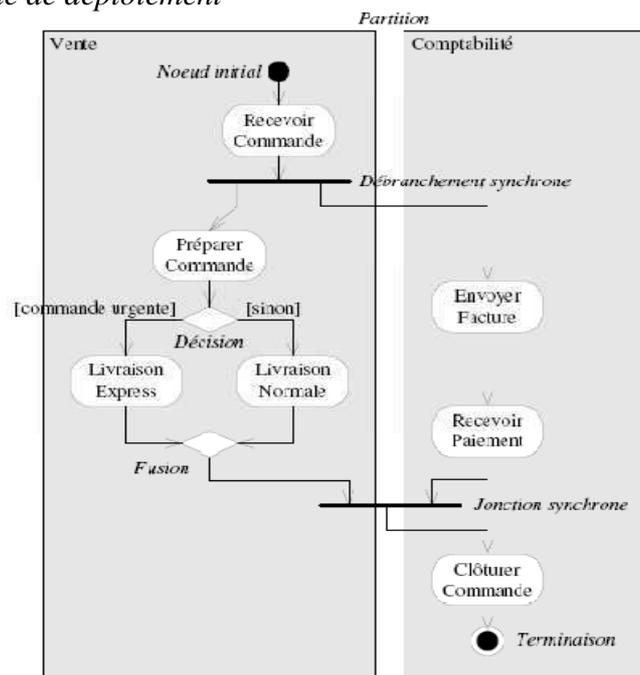


Figure 65 : Diagramme d'activité

UML est une méthode générique, et extensible. UML répond parfaitement aux besoins de formalisation, cependant ne permet pas l'identification des classes ni des objets.

ACNOS

La méthode ACNOS a été élaborée dans l'objectif de la modélisation et la formulation des activités non structurées ou semi-structurées dans les entreprises manufacturières. ACNOS s'appuie sur le concept d'activité (Figure 67). L'activité est caractérisée par des entrées/sorties fonctionnelles (de gauche à droite), des entrées/sorties de contrôle qui fournissent des informations sur l'exécution de l'activité (en haut), ainsi que des entrées/sorties ressources qui informent de l'état d'utilisation des ressources (en bas). En outre les coûts associés à l'exécution d'une occurrence de l'activité ainsi que les temps d'exécution sont représentés.

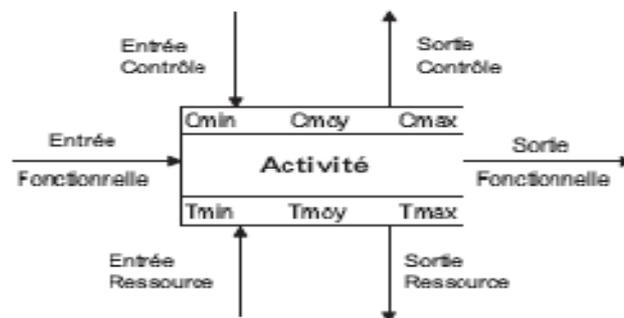


Figure 66: Représentation de l'activité selon ACNOS.

Cette méthode permet l'identification et l'inventaire des ressources nécessaires à chaque activité. De plus l'approche d'ACNOS permet la représentation des relations entre les activités, leurs enchaînements logique et temporel au sein des processus. Cependant l'utilisation de nombreuses entrées/sorties au niveau de l'activité en fait une méthode difficile de compréhension et d'utilisation [PÉPIOT, 2005].

ANNEXE 3 : GRILLE D'IDENTIFICATION DES CRITÈRES DE 4PS

Système source de danger lié à une pratique de 4PS	Cibles
A - Systèmes source de danger d'origine mécanique	
A-1 systèmes sous pression (gaz/vapeur/hydraulique)	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (accident du travail) • Opérations (arrêt de la production/ nécessité de maintenance) • Social (nuisances sonores)
A-2 systèmes sous contrainte mécanique	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (accident du travail) • Opérations (arrêt de la production/ nécessité de maintenance)
A-3 systèmes en mouvement	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (accident du travail) • Opérations (arrêt de la production/ nécessité de maintenance)
A-4 systèmes nécessitant une manutention	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (accident du travail) • Opérations (arrêt de la production/ nécessité de maintenance)
A-5 systèmes sources d'explosion d'origine physique	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Ne concerne pas le traitement de surface</i>
A-6 systèmes sources de chute de hauteur	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (accident du travail) • Opérations (maintenance)
A-7 systèmes sources de chute de plain-pied	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (accident du travail)
A-8 systèmes sources de blessures	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (accident du travail)
A-9 systèmes sources de bruits et de vibrations	<ul style="list-style-type: none"> • Social (nuisances sonores) • Opérateurs (nuisances sonores, maladies)
B - Systèmes sources de danger d'origine chimique	
B-1 systèmes sources de réactions chimiques	<ul style="list-style-type: none"> • Écosystème (diminution de la pollution de l'eau de l'air et des sols, toxicité des réactants) • Opérateurs (dégagements gazeux, maladies) • Opérations (arrêt de la production, nécessité de réapprovisionnement, corrosion des équipements, perte de matière première) • Stratégie (Qualité du traitement)
B-2 systèmes sources d'explosion	<ul style="list-style-type: none"> • Économique (perte des clients) • Écosystème (pollution de l'eau de l'air et des sols) • Opérateurs (accident du travail, maladies) • Opérations (destruction de l'outil de production, nécessité de réapprovisionnement) • Social (projections, incendie, nuisances sonores) • Stratégie (impact financier)
B-3 systèmes sources de toxicité et d'agressivité	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (intoxication, maladie) • Social (intoxication) • Écosystème (diminution de la toxicité des rejets dans l'eau et le sol) • Opération (traitement des effluents, corrosion des équipements)
B-4 systèmes sources de pollution et d'odeurs	<ul style="list-style-type: none"> • Social (nuisances olfactives) • Écosystème (pollution de l'eau, de l'air et du sol) • Opération (traitement des effluents) • Opérateurs (nuisances olfactives)
B-5 systèmes source de manque d'oxygène	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (maladie, intoxication)
C - Systèmes sources de danger d'origine électrique	
C-1 systèmes mettant en œuvre de l'électricité à courant continu ou alternatif	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (électrocution) • Opérations (diminution de la consommation électrique,

	<ul style="list-style-type: none"> • maintenance du matériel • Stratégie (Meilleure qualité des revêtements électrochimiques)
C-2 systèmes sources d'électricité statique	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (électrocution)
C-3 systèmes condensateurs de puissance électrique	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (électrocution) • Opérations (diminution de la consommation électrique)
C-4 systèmes générateurs de haute fréquence	<i>Ne concerne pas le traitement de surface</i>
D - Systèmes sources de danger de développement d'incendie	
D-1 systèmes sources d'allumage	<ul style="list-style-type: none"> • Opérations (incendie: destruction de l'atelier)
D-2 systèmes sources liés aux cloisonnements	<ul style="list-style-type: none"> • Social (diminution des risques de propagation des incendies) • Opérations (diminution des risques de propagation de l'incendie)
D-3 systèmes sources liés aux matériaux	<ul style="list-style-type: none"> • Écosystème (pollution de l'eau, de l'air et du sol par des réactifs inflammables) • Opérateurs (nuisances olfactives, brûlures)
D-4 systèmes sources liés à la ventilation	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (diminution de la toxicité dans l'air) • Opération (traitement des effluents gazeux, nécessité de maintenance, diminution de la corrosion du matériel) • Stratégie (aspect financier : extracteur d'air, aspect client : diminution de la corrosion de pièces)
D-5 systèmes sources liés à l'extinction	<ul style="list-style-type: none"> • Social (nuisances sonores) • Opération (traitement des effluents) • Opérateurs (formation) • Écosystème (pollution des eaux et du sol due à l'extinction)
E - Systèmes source de danger liés aux rayonnements	
<i>Ne concerne pas le traitement de surface</i>	
F - Systèmes source de danger de nature biologique	
<i>Ne concerne pas le traitement de surface</i>	
G – L'homme source de danger	
G-1 Opérateurs en situation normale	<ul style="list-style-type: none"> • Opérateurs (accident du au manque de compétence) • Opérations (maîtrise du procédé de production,) • Stratégie (nécessité de formation, gestion du personnel) • Écosystème (diminution des pollutions, économies dans la consommation d'eau,
G-2 en situation de malveillance	<ul style="list-style-type: none"> • Écosystème (pollution de l'eau, de l'air et du sol) • Stratégie (Qualité du traitement)
H - Systèmes source de danger liés à l'environnement actif	
<i>Ne concerne pas le traitement de surface</i>	
I - Systèmes source de danger d'origine économique et sociale	
<i>Ne concerne pas le traitement de surface</i>	

ANNEXE 4 : QUESTIONNAIRE DE PONDÉRATION DES CRITÈRES DE 4PS

1. Identification des participants

Nom :

Profession :

Organisme :

2. Consignes

L'objectif de cette enquête est de comparer deux à deux des éléments.

Répondez aux questions suivantes selon le degré d'importance d'un élément par rapport à un autre. Pour cela, remplissez les cases correspondantes en se référant au tableau suivant :

Degré d'importance

1
3
5
7
9
1/3
1/5
1/7
1/9

Définition

Importance égale des 2 éléments
Un élément est un peu plus important que l'autre
Un élément est plus important que l'autre
Un élément est beaucoup plus important que l'autre
Un élément est absolument plus important que l'autre
Un élément est un peu moins important que l'autre
Un élément est moins important que l'autre
Un élément est beaucoup moins important que l'autre
Un élément est absolument moins important que l'autre

Ces degrés d'importance sont tirés de la Méthode Hiérarchique multicritère de Saaty (1981).

Exemple pratique :

Selon vous, parmi l'ensemble des outils d'information existants, quel importance donneriez vous à un outil vis-à-vis des autres ?

Pour l'exemple les journaux télévisés sont un peu plus important que la presse. Par contre les journaux télévisés sont moins importants que l'utilisation d'internet pour se tenir informé.

Sens de
lecture



INFORMATION	Journaux télévisés	Presse écrite	Radio	Internet
Journaux télévisés	1	3	5	1/5
Presse écrite		1	3	1/7
Radio			1	1/9
Internet				1

3. Questionnaire

3.1. Selon vous, par rapport à l'ensemble des opérations d'une entreprise, quelle est l'importance de chaque fonctions vis-à-vis des autres fonctions. Par exemple quelle importance donneriez-vous à la fonction d'« Approvisionnement » vis-à-vis de la fonction de « Production » ?

OPERATIONS	Approvisionnement	Production	Entretien	Détoxication
Approvisionnement	1			
Production		1		
Entretien			1	
Détoxication				1

- L'**approvisionnement** s'assure que tout ce qui est nécessaire à la production sera disponible au moment de la fabrication. Il réapprovisionne les stocks en émettant des demandes d'achat et supervise la gestion des magasins en s'assurant du bon stockage des produits.
- La **production**, a en charge la fabrication des produits finaux de l'entreprise ce qui implique la gestion des quantités produites, de la qualité de la production et du respect des délais de fabrication prévus.
- L'**entretien** vise maintenir le bon fonctionnement de la chaîne de production soit en intervenant sur les pannes éventuelles, soit en assurant une maintenance permanente de l'outil de production.
- La **détoxication** permet le traitement des effluents issus de la production dans le but de justifier la conformité réglementaire de l'entreprise.

3.2. Pensez-vous qu'aux vues des stratégies dont dispose l'entreprise une des 4 perspectives suivantes soit plus décisives qu'une autre pour le développement de son entreprise ? Autrement dit, le développement de stratégies financières est il prépondérant vis-à-vis de stratégies basées sur l'organisationnel.

SRATEGIES	Financier	Organisation	Processus internes	Satisfaction du client
Financier	1			
Organisation		1		
Processus internes			1	
Satisfaction du client				1

- La perspective **financière** repose sur la croissance et la diversification du chiffre d'affaires, hausse de la productivité, meilleure utilisation de l'actif.
- La perspective **client** vise le respect du cahier des charges et spécifications du client
- La perspective **processus internes** a pour intérêt d'optimiser l'efficacité et l'effectivité des processus afin de générer la plus-value escomptée à travers des actions menées au niveau des processus d'innovation, des processus de production et de service après vente.
- La perspective **organisationnelle** permet la gestion de l'organisation de l'entreprise et le développement de sa capacité d'adaptation notamment à travers des fonctions support comme les Ressources Humaines ou la Direction du Système d'Information.

3.3. Selon vous dans quelle mesure la «Sécurité» possède t'elle davantage ou moins d'importance pour les opérateurs que l'«Environnement de travail »?

OPERATEURS	Environnement de travail	Sécurité
Environnement de travail	1	
Sécurité		1

3.4. Pour le secteur du traitement de surface, dans quelle mesure les impacts sur un milieu affectent-ils plus l'écosystème que les impacts sur un autre milieu ? Par exemple les impacts sur le milieu aqueux affectent-ils plus l'écosystème que les impacts sur l'air ?

ECOSYSTEME	Eau	Air	Sol
Eau	1		
Air		1	
Sol			1

3.5. Comment estimez-vous la priorité des éléments ci-dessous dans leur contribution au bon fonctionnement d'une entreprise ?

ENTREPRISE	Stratégie	Opérateurs	Opérations
Stratégie	1		
Opérateurs		1	
Opérations			1

3.6. L'environnement d'une entreprise possède différentes composantes. Quelle priorité donneriez-vous à chaque composante vis-à-vis des autres en cas d'impacts de l'entreprise sur son environnement ?

ENVIRONNEMENT	Économique	Écosystème	Social
Économique	1		
Écosystème		1	
Social			1

- L'environnement **économique** composé de différents acteurs économiques et financiers (clients, fournisseurs, actionnaires, banques, assureurs)
- L'écosystème ou environnement naturel
- L'environnement **social** représentant les individus ou groupes d'individus

4. Échelles pour les indicateurs

L'objectif est d'attribuer des échelles de valeur aux indicateurs

4.1. Pour le taux de présentéisme qui évalue la proportion moyenne de temps de présence des salariés par mois, l'échelle suivante vous paraît-elle adaptée ?

>96% : très bon

De 85% à 96% : bon

<85% : médiocre

Oui

Non, sinon proposez une échelle qui vous paraît plus adaptée

4.2. Pour le taux de satisfaction du client, qui évalue le degré de satisfaction des clients, l'échelle suivante vous paraît-elle adaptée ?

<1% de réclamations : très satisfait

< 5% de réclamations : relativement satisfait

<10% de réclamation : ni satisfait ni mécontent

> 10% de réclamations : relativement mécontent

>50% de réclamations : très mécontent

Oui

Non, sinon proposez une échelle qui vous paraît plus adaptée

4.3. Pour le taux de renouvellement des équipements, qui représente la part du chiffre d'affaire réinvestie dans le renouvellement des équipements, l'échelle suivante vous paraît-elle adaptée ?

<5% du chiffre d'affaire réinvesti : faible

De 5% à 10% du chiffre d'affaire réinvesti : bon

> 10% du chiffre d'affaire réinvesti : fort

Oui

Non, sinon proposez une échelle qui vous paraît plus adaptée

ANNEXE 5 : LISTE DES INDICATEURS POTENTIELS

Écosystème

1. Bénéfice écologique net normalisé [WEIDENHAUPT *et al.*, 2000]
2. Charge hydraulique (volume d'eaux usées/jour) [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007]
3. Charge toxique et polluante dans l'air rejeté [DEPOERS *et al.*, 2002]
4. Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée [DEPOERS *et al.*, 2002]
5. Contribution à la dégradation de la couche d'ozone [IFEN, 2001]
6. Efficience écologique [WEIDENHAUPT *et al.*, 2000]
7. Émission de substances participant à l'acidification [DEPOERS *et al.*, 2002]
8. Émission totale de gaz à effet de serre [IFEN, 2001] [DEPOERS *et al.*, 2002]
9. Indice air [RHODIA, 1999]
10. Indice de biodégradabilité des rejets dans l'eau [DEPOERS *et al.*, 2002]
11. Indice de charge toxique et métallique rejetée dans l'eau [DEPOERS *et al.*, 2002]
12. Indice de conformité [PERSONNE, 1998]
13. Indice eau [RHODIA, 1999]
14. Indices ATMO et IQA (qualité de l'air) [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007]
15. Niveau d'odeur [ROGNON *et al.*, 2000]
16. pH de l'effluent à traiter [DROGOUL, 2006]
17. pH des rejets [LOI 2006, 2006] [BAURAING *et al.*, 2000]
18. Pollution équivalente brute PEB [DROGOUL, 2006]
19. Potentiel de danger des substances [DARMENDRAIL, 2001b]
20. Potentiel de mobilisation de la source de pollution vers le milieu [DARMENDRAIL, 2001a]
21. Potentiel de transfert milieu-cible [DARMENDRAIL, 2001b]
22. Prélèvements annuels d'eau dans la nappe phréatique [PSA, 2006]
23. Quantité de solvants émis (t) [PERSONNE, 1998]
24. Quantité, concentration, toxicité des fuites/ profondeur de la nappe [DROGOUL, 2006]
25. Rejets accidentels [DROGOUL, 2006]
26. Suivi de charge toxique et métallique rejetée dans l'air [DEPOERS *et al.*, 2002]
27. Suivi de charge toxique et métallique rejetée dans l'eau [DEPOERS *et al.*, 2002]
28. Surface couverte [REYNE, 1991]
29. Surface totale au sol utilisée à des fins de production [REYNE, 1991]
30. Taux de conformité des rejets [LOI 2006, 2006]
31. Taux de mortalité piscicole [BARPI, 2007]
32. Taux de polluants dans le sol [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007] [LE PROGRÈS, 2007]
33. Taux de polluants dans les légumes [LE PROGRÈS, 2007]
34. Température des rejets [LOI 2006, 2006] [BAURAING *et al.*, 2000]

Économique

35. Degré de fiabilité des fournisseurs [BERRAH, 2002] [BONNEFOUS *et al.*, 2001]
36. Délai d'obtention des réactifs [BONNEFOUS *et al.*, 2001]
37. Délai de fabrication [BERRAH, 2002]
38. Délai de livraison [REYNE, 1991]
39. Fréquence de livraison [REYNE, 1991]
40. Gain de clientèle [LACOSTE, 2003]
41. Nombre de fournisseurs [LACOSTE, 2003] [BERRAH, 2002]
42. Nombre de nouveaux fournisseurs [LACOSTE, 2003]
43. Qualité des fournisseurs [LACOSTE, 2003]
44. Taux de nouveaux clients [BERRAH, 2002]

Social

45. Concentration moyenne inhalée [INERIS, 2003]
46. Dose Journalière d'exposition [INERIS, 2003]
47. Excès de risque individuel [INERIS, 2003]
48. Information de la population [LE PROGRÈS, 2007]
49. Mesure du bruit extérieur [BAURAING *et al.*, 2000]
50. Niveau d'odeur à l'extérieur [ROGNON *et al.*, 2000] [BAURAING *et al.*, 2000]
51. Nombre de plaintes de riverains au sujet de nuisances esthétiques [BAURAING *et al.*, 2000]
52. Nombre de plaintes des riverains concernant la qualité des eaux [DROGOUL, 2006]
53. Nuisances dues au trafic des camions [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007]
54. Pourcentage de personnes satisfaites de l'état de l'environnement et du cadre de vie [IFEN, 2001]

Opérateurs

55. Date des dernières formations à la sécurité [ORÉE, 1996]
56. Effectif global [BERRAH, 2002]
57. État de la signalisation [SFTS, 2006]
58. Indicateur de conformité des cuves [LOI 2006, 2006] [BAURAING *et al.*, 2000]
59. Indicateur de risque éco-toxicologique [PERRODIN *et al.*, 2004]
60. Indicateur de risque toxicologique [PERRODIN *et al.*, 2004]
61. Indice d'émission [INRS, 2001]
62. Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique [TIXIER, 2002]
63. Indice de dangerosité pour un effet de surpression [TIXIER, 2002]
64. Indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide I_{poll} [TIXIER, 2002]
65. Indice de fréquence des accidents avec arrêts [CRAM, 2009]
66. Indice de gravité des incapacités permanentes [CRAM, 2009]
67. Indice de risque [INERIS, 2003]
68. Indice de toxicité des bains [INRS, 2001]
69. Indice de toxicité des réactifs stockés [INRS, 2001]
70. Mesure du bruit intérieur [PERSONNE, 1998] [CRAM, 2007] [BAURAING *et al.*, 2000]
71. Niveau d'odeur à l'intérieure de l'atelier [ROGNON *et al.*, 2000]
72. Niveau global de risque (NGR) [INRS, 2001]
73. Nombre d'accidents avec arrêt [CRAM, 2009]
74. Nombre d'accidents de fuites de produits ou de mélange [DROGOUL, 2006]
75. Nombre d'accidents mortels [DROGOUL, 2006]
76. Nombre d'heures supplémentaires effectuées par salarié et par mois [BERRAH, 2002]
77. Nombre de brûlures chimiques [DROGOUL, 2006]
78. Nombre de brûlures thermiques [DROGOUL, 2006]
79. Nombre de catastrophes technologiques [IFEN, 2001]
80. Nombre de chutes de personnes [DROGOUL, 2006]
81. Nombre de maladies avec arrêt [CRAM, 2009]
82. Nombre de maladies avec incapacité permanente [CRAM, 2009]
83. Nombre de maladies mortelles [CRAM, 2009]
84. Quotient de danger [DOR *et al.*, 2005]
85. Respect du port des EPI [SFTS, 2006]
86. Taux d'absentéisme [BERRAH, 2002]
87. Taux d'exercices d'évacuation en situation d'urgence [LE PROGRÈS, 2007]
88. Taux de conformité dans le repérage des produits et des cuves [BARPI, 2007] [SFTS, 2006]
89. Taux de formation des employés aux états d'urgence [LE PROGRÈS, 2007]
90. Taux de formation du personnel [SFTS, 2006]
91. Taux de formation du personnel à la manipulation des appareils [SFTS, 2006]
92. Taux de fréquence des accidents du travail [CRAM, 2009]
93. Taux de gravité des accidents et arrêts du travail [CRAM, 2009] [BERRAH, 2002]
94. Taux de présentéisme [BONNEFOUS *et al.*, 2001]
95. Taux de renouvellement des formations à la sécurité [LE PROGRÈS, 2007]
96. Taux de satisfaction de personnes satisfaites de leurs conditions de travail [IFEN, 2001]
97. Taux de satisfaction des employés [BERRAH, 2002]

Opérations

98. Besoin en énergie en période de travail [SFTS, 2006]
99. Besoin en énergie pour la remise en température après un arrêt de nuit ou week-end [SFTS, 2006]
100. Caractéristiques anticorrosion (Nombre d'heure de tenue au brouillard salin) [SFTS, 2006]
101. Consommation brute d'énergie [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007] [ISO 14001, 2004] [PERSONNE, 1998]
102. Consommation brute de matière première [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007] [ISO 14001, 2004]
103. Consommation brute en eau [PSA 2006] [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007] [PERSONNE, 1998]
104. Consommation d'eau totale rapportée à un indicateur d'activité (Q prélevé-Q Orejet en m³/j*IA) [Orée, 1996]
105. Consommation de matières recyclées [DEPOERS *et al.*, 2002]
106. Consommation spécifique (L/m²/fdr) [LOI 2006, 2006] [LAFOREST, 1999]
107. Couverture en stock [BERRAH, 2002]
108. Débit de l'effluent à traiter [DROGOUL, 2006]
109. Débit total d'eau prélevé de toute origine (m³/j) [ORÉE, 1996]
110. Débit total des rejets (m³/j) [ORÉE, 1996] [BAURAING *et al.*, 2000]
111. Durée moyenne de dépannage [BERRAH, 2002]
112. Efficacité dans l'utilisation des matières premières et de l'énergie [ISO 14001, 2004]
113. Efficacité du temps de production [COSTE-CHAREYRE *et al.*, 2007]
114. Efficacité globale [REYNE, 1991]
115. Energy unit index [FIJAL, 2007]
116. Entrainement [LAFOREST, 1999] [LEVEILLARD *et al.*, 2006]
117. Évolution de l'état de santé des employés [IFEN, 2001]
118. Fréquence de vidange des bains [SFTS, 2006]
119. Heures de maintenance effectuées [SFTS, 2006]
120. Indicateur d'intensité boues [BOURGUIGNON *et al.*, 2007]
121. Indicateur d'intensité déchet [BURNHAM, 2007]
122. Indicateur d'intensité eau [BURNHAM, 2007]
123. Indicateur d'utilisation déchet [BURNHAM, 2007]
124. Indicateur de gestion des déchets solides [LOI 2006, 2006]
125. Indicateur intensité de matières premières [BURNHAM, 2007]
126. Indicateur intensité du cycle de vie [BURNHAM, 2007]
127. Indicateurs d'intensité énergétique [BURNHAM, 2007]
128. Mesure du bruit [BAURAING *et al.*, 2000]
129. Niveau de gestion des déchets [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007]
130. Nombre de salariés de maintenance [DROGOUL, 2006]
131. Nombre moyen d'heures de formation par an et par catégorie d'employés [PSA, 2006]
132. Nombre, taux, fréquence des maladies professionnelles, troubles musculo-squelettiques, troubles oculaires, troubles auditifs [DROGOUL, 2006]
133. Packaging unit index [FIJAL, 2007]
134. Pourcentage de déchets recyclés [ISO 14001, 2004]
135. Pourcentage de matériaux recyclés utilisés dans les emballages [ISO 14001, 2004]
136. Product unit index [FIJAL, 2007]
137. Quantité annuelle de DIB [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007] [PERSONNE, 1998]
138. Quantité de boues produites (t) [ORÉE, 1996] [BAURAING *et al.*, 2000]
139. Quantité de déchets générés (t) [BAURAING *et al.*, 2000]
140. Quantité de déchets valorisés en interne (% ou t) [ORÉE, 1996]
141. Quantité de produits achetés par unité de temps [DROGOUL, 2006]
142. Quantité de réactifs utilisés en station [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007]
143. Raw materials unit index [FIJAL, 2007]
144. Taux d'inactivité du matériel [REYNE, 1991]
145. Taux d'utilisation de l'équipement [BERRAH, 2002] [REYNE, 1991]
146. Taux de conformité aux rapports de dilution des bains de rinçage [LAFOREST, 1999]
147. Taux de fiabilité des équipements [BONNEFOUS *et al.*, 2001]
148. Taux de production de boues [DROGOUL, 2006]
149. Taux de recyclage des eaux [PSA, 2006]

- 150. Temps de fonctionnement en continu de la chaîne [DROGOUL, 2006]
- 151. Temps de traitement des effluents [DROGOUL, 2006]
- 152. Waste generation unit index [FIJAL, 2007]

Stratégie

- 153. Argent investi en formation/ CA [REYNE, 1991]
- 154. Argent investi en R&D [BERGERON, 2000]
- 155. Besoin d'anticipation [BONNEFOUS *et al.*, 2001]
- 156. Chiffre d'affaires [LACOSTE, 2003] [REYNE, 1991]
- 157. Chiffre d'affaires/ employés [LACOSTE, 2003]
- 158. Chiffre d'affaires/ fournisseurs [LACOSTE, 2003]
- 159. Chiffre de ventes [DROGOUL, 2006]
- 160. Coût annuel de traitement des déchets [BOURGUIGNON *et al.*, 2007] [QUÉRÉ *et al.*, 2007]
- 161. Coût des investissements environnementaux [PERSONNE, 1998]
- 162. Coût du suivi des licences [LACOSTE, 2003]
- 163. Coût total de l'eau utilisée pour fabriquer les produits (k€/ IA) [ORÉE, 1996]
- 164. Degré de transformation [REYNE, 1991]
- 165. Dépenses d'entretien de l'installation à risque [IFEN, 2001]
- 166. Dépenses d'entretien et de maintenance du patrimoine bâti / dépenses de réhabilitation [IFEN, 2001]
- 167. Fiabilité des employés [BARPI, 2007]
- 168. Indice d'évolution des ressources naturelles dans les inputs utilisés [IFEN, 2001]
- 169. Investissement moyen annuel [REYNE, 1991]
- 170. Mise en place d'une politique environnementale [BAURAING *et al.*, 2000]
- 171. Nombre de nouvelles embauches [LACOSTE, 2003]
- 172. Nombre de poursuites judiciaires [ISO 14001, 2004]
- 173. Nombre de projets arrêtés [LACOSTE, 2003]
- 174. Nombre de projets hors délai [LACOSTE, 2003]
- 175. Nombre de réclamations et de plaintes [BAURAING *et al.*, 2000]
- 176. Part relative des investissements dans l'environnement / investissements totaux [IFEN, 2001]
- 177. Pourcentage de bénéfice net [BERGERON, 2000]
- 178. Productivité apparente du travail [REYNE, 1991]
- 179. Productivité opérationnelle [BERRAH, 2002]
- 180. Ratio coût de transport/ coût de produit [REYNE, 1991]
- 181. Ratio de productivité [DROGOUL, 2006]
- 182. Respect des délais de livraison [REYNE, 1991]
- 183. Salaire moyen mensuel par catégorie d'employés [PSA, 2006]
- 184. Taux de conformité des produits [ISO 14001, 2004]
- 185. Taux de croissance des ventes [BERGERON, 2000]
- 186. Taux de défaut d'une pièce [BONNEFOUS *et al.*, 2001]
- 187. Taux de fuites [BERRAH, 2002]
- 188. Taux de main de d'œuvre [BERRAH, 2002]
- 189. Taux de non-conformité [BERRAH, 2002]
- 190. Taux de pièces conformes du premier coup [BONNEFOUS *et al.*, 2001]
- 191. Taux de rebut [REYNE, 1991]
- 192. Taux de renouvellement de l'équipement [REYNE, 1991]
- 193. Taux de retour des produits [BERGERON, 2000]
- 194. Taux de satisfaction du client [BERRAH, 2002] [ISO 14001, 2004] [LACOSTE, 2003]
- 195. Taux de sous-utilisation du personnel [BERRAH, 2002]
- 196. Taux de sur-utilisation du personnel [BERRAH, 2002]
- 197. Valeur ajoutée [REYNE, 1991]

ANNEXE 6 : MATRICE DE SÉLECTION DES INDICATEURS PAR CRIBLAGE

Indicateur	Note globale	Pertinence					Justesse d'analyse				Données			
		B	Cé	Cn	Cs	T	R	O	Réf	U	F	M	P	S
		9	8	9	2	8	1	7	3	2	4	7	3	3
1. Argent investi en formation/ chiffre d'affaire	76%	X	X	X		X		X		X	X	X	X	
2. Argent investi en R&D	67%		X	X				X	X		X	X	X	
3. Besoin d'anticipation	1,6%							X			X			
4. Besoin en énergie en période de travail	49%			X		X	X			X	X	X	X	X
5. Besoins en énergie pour la remise en température après un arrêt de nuit ou week-end	49%			X		X	X			X	X	X	X	X
6. Caractéristiques anticorrosion	88%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
7. Charge toxique et polluante dans l'air rejeté	87%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
8. Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée	88%	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X
9. Chiffre d'affaires/ employé	57%		X	X		X		X			X	X		
10. Concentration moyenne inhalée	88%	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X
11. Consommation brute d'énergie	66%	X	X	X				X			X	X	X	X
12. Consommation brute de matière première	66%	X	X	X				X			X	X	X	X
13. Consommation de matières recyclées	92%	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
14. Consommation spécifique (l/m2/fdr)	93%	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X
15. Coût annuel de traitement des déchets	70%	X	X	X		X		X			X	X		
16. Coût des investissements environnementaux	65%	X		X				X	X		X	X	X	
17. Coût du suivi des licences	53%			X				X	X		X	X	X	
18. Coût total de l'eau utilisée pour	1,2%			X										

fabriquer les produits (k€/ IA)

19.	Débit de l'effluent à traiter	75%	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
20.	Débit total des rejets	92%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
21.	Degré de transformation	63%		X			X	X	X		X	X	X		
22.	Délai de fabrication	68%	X	X	X		X	X					X		
23.	Délai de livraison	37%									X				
24.	Dépenses d'entretien de l'installation à risque	35%	X		X		X								
25.	Durée moyenne de dépannage	40%			X				X		X	X	X		
26.	Effectif global	67%			X	X	X	X	X		X	X	X		
27.	Efficacité globale	36%	X						X		X	X			
28.	Émission de substances appauvrissant la couche d'ozone	59%		X	X		X	X	X	X					
29.	Émission de substances participant à l'acidification	76%	X	X	X		X	X	X	X	X				
30.	Émission totale de gaz à effet de serre	76%	X	X	X		X	X	X	X	X				
31.	Energy unit index	89%	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		
32.	Entrainement	89%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
33.	Excès de risque individuel	80%	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
34.	Fréquence de livraison	51%			X		X		X		X	X	X		
35.	Gain en clientèle	93%	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
36.	Indicateur d'intensité déchet	93%	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
37.	Indicateur d'intensité eau	93%	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
38.	Indicateur d'utilisation déchet	89%	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		
39.	Indicateur de conformité des cuves	77%		X	X		X	X	X	X	X	X	X		
40.	Indicateur de gestion déchet	89%	X	X	X	X	X	X	X		X	X			X
41.	Indicateur de risque éco-toxicologique	36%	X				X	X							
42.	Indicateur intensité de matière première	93%	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
43.	Indicateurs d'intensité boues	93%	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
44.	Indicateurs d'intensité énergétique	93%	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
45.	Indice d'émission	97%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

46. Indice de biodégradabilité des rejets dans l'eau	81%	X	X			X	X	X	X		X	X	X	X
47. Indice de charge toxique et métallique rejetée dans l'eau	77%	X	X	X			X	X	X		X			X
48. Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique	88%	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
49. Indice de dangerosité pour un effet de surpression I _{surp}	88%	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
50. Indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide I _{poll}	77%	X	X	X			X	X	X		X			X
51. Indice de dangerosité pour un effet de toxicité due au gaz I _{tox}	37%	X						X		X		X		
52. Indice de gravité	88%	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		
53. Indice de risque	88%	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X
54. Indice de toxicité des bains	76%	X	X	X		X		X	X		X		X	X
55. Indice de toxicité des réactifs stockés	76%	X	X	X		X		X	X		X		X	X
56. Information de la population	23%	X	X	X		X	X	X						
57. Integrated environmental assessment index for cleaner production technologies	1,9%								X		X			
58. Investissement moyen annuel	89%	X	X	X			X	X	X		X	X	X	X
59. Mesure du bruit à l'extérieur de l'atelier	75%	X	X	X		X		X	X	X	X	X		X
60. Mesure du bruit à l'intérieur de l'atelier	75%	X	X	X		X		X	X	X	X	X		X
61. Mise en place d'une politique environnementale	1%			X										
62. Niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	81%	X	X	X			X	X	X	X		X		X
63. Niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	81%	X	X	X			X	X	X	X		X		X
64. Niveau de gestion des déchets	49%		X	X			X			X	X		X	
65. Niveau global de risque (NGR)	76%	X	X	X		X		X	X		X		X	X
66. Nombre d'accidents avec arrêt	92%	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X
67. Nombre d'accidents de fuites de produits ou de mélange	79%	X		X			X	X	X		X	X	X	X
68. Nombre d'heures supplémentaires effectuées par salarié	93%	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X

et par mois													
69.	Nombre de brûlures chimiques	88%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
70.	Nombre de brûlures thermiques	56%	X		X			X			X	X	X
71.	Nombre de catastrophes technologiques	53%		X	X			X		X	X	X	X
72.	Nombre de chutes de personnes	56%	X		X			X			X	X	X
73.	Nombre de maladies avec arrêt	92%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
74.	Nombre de maladies avec incapacité permanente	66%			X		X	X	X	X	X	X	X
75.	Nombre de plaintes des riverains concernant la qualité des eaux, les nuisances olfactives, et esthétiques	53%	X		X			X	X		X		
76.	Nombre moyen d'heures de formation par an et par catégorie d'employés	66%		X	X			X	X	X	X	X	X
77.	Nuisances dues au trafic des camions	92%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
78.	Packaging unit index	80%	X	X	X		X	X	X	X	X		X
79.	Part relative des investissements dans l'environnement / investissements totaux	89%	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
80.	Ph de l'effluent à traiter	79%	X		X	X		X	X	X	X	X	X
81.	Ph des rejets	88%	X	x	X	X	X	X	X	X	X	X	X
82.	Pourcentage de déchets recyclés	92%	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
83.	Pourcentage de matériaux recyclés utilisés dans les emballages	64%		X	X		X	X	X	X	X		
84.	Product unit index	89%	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
85.	Productivité opérationnelle	89%	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
86.	Qualité des fournisseurs	51%	X	X	X	X		X					
87.	Quantité annuelle de DIB	73%	X	X	X		X	X			X	X	
88.	Quantité de boues produites	64%	X	X	X	X			X	X	X	X	
89.	Quantité de déchets générés	64%	X	X	X	X			X	X	X	X	
90.	Quantité de déchets valorisés en interne (% ou t)	92%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

91.	Quantité de réactifs utilisés en station	75%	X										
92.	Quantité de solvants émis (t)	68%	X	X	X		X	X	X				
93.	Quotient de danger	88%	X										
94.	Ratio coût de transport/ coût de produit	53%			X			X	X		X	X	X
95.	Ratio de productivité	24%					X	X					
96.	Raw materials unit index	89%	X	X	X		X						
97.	Rejets accidentels	92%	X										
98.	Respect des délais de livraison	57%	X	X	X	X	X				X		
99.	Respect du port des EPI	64%	X	X	X	X		X			X	X	
100.	Suivi de charge toxique et polluante dans l'air rejeté	87%	X		X								
101.	Suivi de charge toxique et polluante dans l'eau rejetée	88%	X		X	X							
102.	Surface couverte	56%			X			X	X	X	X	X	X
103.	Taux d'utilisation de l'équipement	72%	X	X	X		X		X	X	X		
104.	Taux de conformité aux rapports de dilution des bains de rinçage	87%	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
105.	Taux de conformité dans le repérage des produits et des cuves	77%		X	X		X						
106.	Taux de conformité des rejets	96%	X										
107.	Taux de fiabilité des équipements	62%			X		X	X	X		X	X	
108.	Taux de formation du personnel à la manipulation des appareils	92%	X										
109.	Taux de formation du personnel à la sécurité	92%	X	X	X		X						
110.	Taux de fréquence des accidents et arrêts du travail	88%	X										
111.	Taux de fuites	63%	X	X	X			X	X		X		
112.	Taux de main de d'œuvre	24%					X	X					
113.	Taux de non-conformité	92%	X										
114.	Taux de nouveaux clients	63%	X	X	X			X	X		X		

115.	Taux de polluants dans le sol	71%	X	X	X		X	X	X		X			
116.	Taux de présentéisme	89%	X		X	X	X							
117.	Taux de production de boues	88%	X		X	X	X							
118.	Taux de productivité apparente du travail	75%	X	X	X	X	X	X			X	X		
119.	Taux de recyclage des eaux	93%	X		X	X	X	X						
120.	Taux de renouvellement de l'équipement	89%	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X
121.	Taux de retour des produits	89%	X		X	X	X							
122.	Taux de satisfaction de personnes satisfaites de leurs conditions de travail	48%	X	X	X			X						
123.	Taux de satisfaction des employés	76%	X	X	X			X	X		X	X	X	
124.	Taux de satisfaction du client	76%	X		X		X	X	X		X	X	X	
125.	Température des rejets	88%	X											
126.	Temps de fonctionnement en continu de la chaîne	64%			X		X	X	X		X	X	X	
127.	Temps de traitement des effluents	71%		X	X		X	X	X		X	X		
128.	Valeur ajoutée	92%	X		X	X	X	X						
129.	Waste generation unit index	89%	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X

ANNEXE 7 : INDICATEURS N'AYANT PAS ÉTÉ RETENUS

n°	Intitulé	Source	Définition	Type	Méthode de calcul	Unités	Raison de l'exclusion
1.	Argent investi en formation/ CA	[REYNE, 1991]	Évalue l'effort que fait l'entreprise pour former son personnel	Quantitatif	Argent inv =Budget formation/ chiffre d'affaires	%	Redondant avec le taux de formation du personnel
2.	Argent investi en R&D	[BERGERON, 2000]	Estime la part du chiffre d'affaires réinvestit pour les besoins d'innovation	Quantitatif	R&D=Investissement moyen annuel en R&D/ chiffre d'affaires	%	Pas de lien direct avec la mise en œuvre d'une pratique de 4PS
3.	Bénéfice écologique net normalisé	[WEIDENHAUPT et al., 2000]	Estime l'efficacité du système de traitement de gaz. Il représente la différence entre les bénéfiques et les impacts environnementaux normalisés divisée par le volume des rejets gazeux.	Quantitatif	$NEB_N = \frac{EBene(pt) - EBurd(pt)}{Volume.de.rejets.gazeux(m^3)}$ Plus le NEB _N est élevé plus le système est efficace	Point/m ³	Trop ciblé sur les systèmes de traitement des gaz
4.	Bénéfice environnemental d'un procédé	[WEIDENHAUPT et al., 2000]	Représente le bénéfice environnemental des systèmes de traitement des rejets gazeux	Quantitatif	Calculé avec la méthode ECO-indicator 95	point/m ³ gaz	Trop ciblé sur les systèmes de traitement des gaz
5.	Besoin d'anticipation	[BONNEFOUS et al., 2001]	Estime le temps de consommation des stocks	Quantitatif	Temps moyen entre deux commandes	Unité de temps	L'indicateur intensité matière première est plus pertinent pour évaluer l'impact sur les stocks
6.	Besoin en énergie en période de travail	[SFTS, 2006]	Estime les puissances nécessaires au maintien de la température des bains en période de travail	Quantitatif	Suivi des puissances au niveau du compteur électrique	kW	Trop dépendant du type de bains utilisés, de la température ambiante (saison) et des appareillages utilisés
7.	Besoins en énergie pour la remise en température après un arrêt de nuit ou week-end	[SFTS, 2006]	Estime les puissances nécessaires à la remise en température de fonctionnement après arrêt	Quantitatif	Suivi des puissances au niveau du compteur électrique	kW	Trop dépendant du type de bains utilisés, de la température ambiante (saison) et des appareillages utilisés
8.	Charge hydraulique	[BOURGUIGNON et al., 2007] [QUÉRÉ et al., 2007]	Estime le volume d'eaux usées à traiter par jour	Quantitatif	Mesure	volume d'eaux usées/jour	Utilisé comme paramètre pour le calcul de l'indicateur « quantité de réactifs utilisée en station »
9.	Chiffre d'affaires	[LACOSTE, 2003] ; [REYNE, 1991]	Évalue le produit des ventes de l'entreprise	Quantitatif	Pourra être comparé au chiffre d'affaire de l'année précédent la mise en place de la stratégie de production propre (mieux, - bon)	€	Paramètre servant au calcul de l'indicateur Valeur Ajoutée
10.	Chiffre d'affaires/ employé	[LACOSTE, 2003]	Mesure la rentabilité des employés	Quantitatif	Chiffre d'affaires/ effectif	€ / personnes	Lien avec l'évaluation des impacts des pratiques de 4PS

11.	Chiffre d'affaires/ fournisseurs	[LACOSTE, 2003]	Estime la part du chiffre d'affaire créée par les fournisseurs	Quantitatif	CA/ nombre de fournisseur	€/ fournisseurs	Lien avec l'évaluation des impacts des pratiques de 4PS ?
12.	Chiffre de ventes	[DROGOU, 2006]	-	Quantitatif	-		Mal renseigné
13.	Concentration moyenne inhalée	[INERIS, 2003]	Correspond à la dose d'exposition lorsque la voie d'exposition est la voie respiratoire. Lorsque l'on considère des expositions de longue durée, on s'intéresse à la concentration moyenne inhalée par jour	Quantitatif	$CI = \left(\sum_i (C_i \times t_i) \right) \times F \times \frac{T}{T_m}$ <p>Pour les polluants à effet avec seuil T=T_m C_i : concentration de polluant dans l'air inhalé pendant la fraction de temps t_i (mg/m³) t_i : fraction du temps d'exposition à la concentration C_i pendant une journée F : Fréquence ou taux d'exposition (temps d'exposition/nombre d'unité de temps de l'année) adimensionnel T : Nombre d'années d'exposition (années) T_m : Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée</p>	mg/m ³ ou µg/m ³	Utilisé comme paramètre pour le calcul de l'indicateur « Indice de risque »
14.	Consommation brute d'énergie	[PERSONNE, 1998] ; [BOURGUIGNON <i>et al.</i> , 2007]	Évalue la consommation totale d'énergie (de toutes sources) sur l'atelier par unité de temps	Quantitatif	Relevé au compteur	MJ /jour	Trop dépendant de la production ;
15.	Consommation brute de matière première	[QUÉRÉ <i>et al.</i> , 2007] ; [ISO 14001, 2004]	Évalue la consommation totale de matière sur l'atelier par unité de temps	Quantitatif	Fiche de tenue des stocks	Kg/jour	Paramètre servant à calculer l'indicateur « Intensité Matière Première » jugé plus pertinent
16.	Consommation brute en eau	[QUÉRÉ <i>et al.</i> , 2007] [PERSONNE, 1998]	Évalue la consommation totale d'eau sur l'atelier par unité de temps	Quantitatif	Relevé au compteur	(m ³ /jour)	Trop dépendant de la production ;
17.	Consommation d'eau totale rapportée à un indicateur d'activité	[ORÉE, 1996]	Estime la consommation d'eau totale rapportée à un indicateur d'activité	Quantitatif	$consommation = \frac{Q_{prélevé} - Q_{rejet}}{IA}$	(m ³ / jour/ IA)	Redondant avec l'indicateur consommation spécifique
18.	Consommation de matières recyclées	[DEPOERS <i>et al.</i> , 2002]	Évalue la part de matériaux recyclés utilisés comme matières premières.	Quantitatif	Quantité de matériaux recyclés x100 /quantité de matière première utilisée	%	Redondant avec l'indicateur d'utilisation déchet
19.	Contribution à la dégradation de la couche d'ozone	[IFEN, 2001]	-	-	-		Le traitement de surface contribue peu aux effets globaux
20.	Coût annuel de traitement des déchets	[BOURGUIGNON <i>et al.</i> , 2007]	Estime les dépenses engendrées par le traitement des déchets (taxes, transport,	Quantitatif	∑ coûts liés au traitement des déchets /an	€/ an	Le coût n'est pas vraiment l'aspect pertinent, l'indicateur

		[QUÈRE <i>et al.</i> , 2007]	énergie)				intensité déchet l'est plus
21.	Coût des investissements environnementaux	[PERSONNE, 1998]	Estime l'effort de l'entreprise pour la protection de l'environnement	Quantitatif	Budget environnement	€	Le coût n'est pas vraiment utile en soit : la part des investissements est plus adéquate
22.	Coût du suivi des licences	[LACOSTE, 2003]	-	Quantitatif	-	€	Peu pertinent dans une PME de traitement de surface
23.	Coût total de l'eau utilisée pour fabriquer les produits	[ORÉE, 1996]	Évalue les redevances à reverser aux agences de l'eau	Quantitatif	Factures	k € / indicateur d'activité	Le coût est très dépendant du prix unitaire qui peut varier. Un indicateur basé sur les volumes d'eau est donc plus adéquat
24.	Couverture en stock	[BERRAH, 2002]	Évalue le taux de couverture des stocks	Quantitatif	Stock moyen ou instantané / consommation de la période de référence	Sans dimension	Pas utile dans le cadre de la problématique d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS
25.	Date des dernières formations à la sécurité	[DROGOUL, 2006]	Permet de juger l'ancienneté des informations données aux salariés concernant la sécurité	Qualitatif	Suivi	Sans dimensions	La notion de date ne parait pas pertinente, le plus judicieux serait la fréquence des formations.
26.	Débit de l'effluent à traiter	[DROGOUL, 2006]	Permet d'évaluer si l'on se trouve dans les conditions (capacité) de traitement par la station de traitement	Quantitatif	Mesure du débit en amont de la station de traitement	(m ³ /jour)	Peu d'utilité de cet indicateur
27.	Débit total d'eau prélevée de toute origine	[ORÉE, 1996]	Estime la consommation d'eau	Quantitatif	Relevé au débitmètre	m ³ /j	La consommation par rapport à unité de production serait plus judicieuse
28.	Débit total des rejets	[ORÉE, 1996]	Évalue le débit des rejets	Quantitatif	Mesure à l'aide d'un débitmètre	m ³ /jour	Redondant avec la consommation spécifique qui est plus adéquate dans le secteur du traitement de surfaces
29.	Degré de fiabilité des fournisseurs	[BONNEFOUS <i>et al.</i> , 2001] ; [BERRAH, 2002]	Évalue la capacité des fournisseurs à respecter les délais de livraison	Quantitatif	Nombre de livraisons conformes au délai / nombre de livraisons	%	La mise en place d'une pratique de 4PS n'a pas d'impact significatif sur la qualité du fournisseur
30.	Degré de transformation	[REYNE, 1991]	Caractérise le niveau industriel de l'entreprise (40% : élevé, 15% faible)	Quantitatif	$d_{transformation} = \frac{VA}{CA} = \frac{CA - \sum consommation}{CA}$ VA : valeur ajoutée et CA : chiffre d'affaires	%	N'apporte pas plus d'information que l'indicateur Valeur ajoutée

31.	Délai d'obtention des réactifs	[BONNEFOUS <i>et al.</i> , 2001]	Estime le temps nécessaire pour obtenir les réactifs après commande chez le fournisseur	Quantitatif	Temps moyen de livraison	Unité de temps	Pas d'échelle de référence (long, moyen, court ?)
32.	Délai de fabrication	[BERRAH, 2002]	Estime la durée moyenne entre la sortie de la matière première et le stockage du produit fini	Quantitatif	Durée moyenne entre la réception des pièces brutes et l'expédition des pièces traitées	Unité de temps	Trop dépendant du type de traitement que la pièce doit subir
33.	Délai de livraison aux clients	[REYNE, 1991]	Estime le délai moyen de livraison aux clients	Quantitatif	Suivi du traitement des commandes	Unité de temps	Pas d'échelle de référence (long, moyen, court ?)
34.	Dépenses d'entretien de l'installation à risque	[IFEN, 2001]	Évalue le coût des dépenses pour l'entretien de l'installation	Quantitatif	Budget d'entretien	€	Trop subjectif. Le taux de renouvellement de l'équipement est plus pertinent
35.	Dépenses d'entretien et de maintenance du patrimoine bâti / dépenses de réhabilitation	[IFEN, 2001]	Estime les coûts d'entretien et de maintenance	Quantitatif	Investissement moyen annuel dans l'entretien du bâti / chiffre d'affaires	€	Est-il nécessaire de dissocier les dépenses d'entretien du bâti de celles de l'entretien général ?
36.	Dose Journalière d'exposition	[INERIS, 2003]	Représente la quantité de polluants mis en contact au niveau des surfaces d'échange tel que les parois alvéolaires des poumons, la paroi intestinale et la peau, à travers lesquels les polluants peuvent éventuellement pénétrer. Elle est définie par la relation suivante pour un milieu i et une voie d'exposition j	Quantitatif	$DJE_{ij} = \frac{C_i \times Q_{ij} \times F}{P} \times \frac{T}{T_m}$ <p> <i>C_i</i> : Concentration d'exposition relative au milieu i (eau souterraine, sol, air, aliment) en mg/kg, mg/m³, mg/l <i>Q_{ij}</i> quantité de milieu i, administrée par la voie j par unité de temps d'exposition m³/j, L/j, kg/j <i>F</i> : Fréquence ou taux d'exposition (temps d'exposition/nombre d'unité de temps de l'année) adimensionnel <i>P</i> : masse corporelle de la cible (kg) <i>T</i> : Nombre d'années d'exposition (années) <i>T_m</i> : Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée </p>	mg/kg/j	Considéré comme un paramètre de l'indicateur « Indice de risque »
37.	Durée moyenne de dépannage	[BERRAH, 2002]	Évalue la durée moyenne des dépannages	Quantitatif	durée totale des interventions / nombre d'interventions	Heures / interventions	Trop dépendante du type d'intervention.
38.	Effectif global	[BERRAH, 2002]	Détermine le statut de l'entreprise PE, ME, GE	Quantitatif	Recensement	nombre	Le statut de l'entreprise ne va pas changer radicalement avec une pratique de 4PS.
39.	Efficacité dans l'utilisation des matières premières et de l'énergie	[ISO 14001, 2004]	-	-	-	-	Mal défini
40.	Efficacité du temps de	[LACOSTE, 2003]	-	-	-	-	Mal défini

	production						
41.	Efficacité globale	[REYNE, 1991]	Évalue l'efficacité globale	Quantitatif	Efficacité globale = VA/ frais de personnel L'efficacité globale doit être ≥ 1,5	Sans dimension	Redondant avec la productivité opérationnelle
42.	Efficience écologique (Ecological Yield Efficiency)	[WEIDENHAUPT et al., 2000]	Permet de s'assurer qu'il n'y a pas eu de déplacement de la pollution dans le cadre du choix d'un système de traitement des rejets gazeux	Quantitatif	$\log EYE = \log \left(\frac{EBene(pt)}{EBurd(pt)} \right)$	Sans dimension	Trop spécifique aux systèmes de traitement des rejets gazeux
43.	Émission de substances participant à l'acidification	[DEPOERS et al., 2002]	Mesure les gaz contribuant à l'acidification rejetés dans l'atmosphère (NH ₃ , HCl, HF, NO ₂ , SO ₂), rapportés à une unité de production	Quantitatif	∑ (AA x coefficient d'impact)/ unité de production	m ³ / unité de production	Le secteur du traitement de surface contribue peu aux impacts globaux
44.	Émission totale de gaz à effet de serre	[DEPOERS et al., 2002] ; [IFEN, 2001]	Mesure les gaz à effet de serre rejetés dans l'atmosphère (CO ₂ , CO, NO _x , CH ₄ ...) rapportés à une unité de production	Quantitatif	∑ (GES x coefficient de pondération) / unité de production	m ³ / unité de production	Le secteur du traitement de surface contribue peu aux impacts globaux
45.	Energy unit index	[FIJAL, 2007]	Estime la consommation énergétique directe du procédé incluant l'énergie provenant de produits pétroliers, l'énergie électrique et l'énergie calorifique.	Quantitatif	$W_e = \sum_{i=1}^n w_{ei} - w_{ew} ; w_{ei} = \frac{z_{ei}}{m_{cp}} ;$ $w_{ew} = \frac{z_{ew}}{m_{cp}}$ <p>Ws est la somme de i=1 à n de l'indice d'énergie partiel de chaque matière première énergétique w_{ei} prise en compte dans le procédé moins l'indice d'énergie secondaire w_{ew} correspondant à l'énergie potentiellement récupérable et valorisable dans le procédé. Ces w_{ei} et w_{ew} sont respectivement le rapport de la quantité de chaque matière première énergétique utilisée z_{ei} et celui de la quantité d'énergie valorisable z_{ew}. tous deux exprimés en masse de fuel standard, par la masse totale de produits manufacturés par le procédé m_{cp}</p>	Sans dimension	Nécessite de trop nombreuses informations pour un état des lieux rapide et simple de l'atelier de traitement de surfaces
46.	État de la signalisation	[SFTS, 2006]	Caractérise le repérage des issues de secours des produits et des cuves	Qualitatif	Audit sécurité	Sans dimension	Redondant avec le « Taux de conformité dans le repérage des produits et des cuves »
47.	Évolution de l'état de santé des employés	[IFEN, 2001]	Évalue l'évolution de l'état de santé des employés	Qualitatif	Suivi par la médecine du travail	Sans dimensions	Temps de retour long en particulier pour les maladies

							chroniques
48.	Fiabilité des employés	[BARPI, 2007]	-	Qualitatif	-	-	Mal défini
49.	Fréquence de livraison	[REYNE, 1991]	Nécessaire pour la gestion des stocks	Quantitatif	Suivi des commandes	Nombre de livraison /jours	L'intensité de matière première est un indicateur plus pertinent pour suivre l'impact d'une pratique de 4PS sur l'approvisionnement
50.	Fréquence de vidange des baignoires	[DROGOUL, 2006]	Évalue la durée de vie des baignoires de traitement	Quantitatif	Enquête	Unité de temps	Indicateur pertinent mais dont le temps de retour est trop long (environ 2 ans)
51.	Heures de maintenance effectuées	[DROGOUL, 2006]	Estime le nombre d'heures de maintenance effectuées	Quantitatif	Heures de maintenance effectuées / nombre d'heures de fonctionnement	Sans dimension	Mal défini : s'agit-il de la maintenance des baignoires intimement liée à la production ou la maintenance en cas de panne ?
52.	Impact environnemental d'un procédé	[WEIDENHAUPT et al., 2000]	Représente l'impact environnemental des systèmes de traitement des rejets gazeux	Quantitatif	Calculé avec la méthode ECO-indicator 95	point/m ³ gaz	Trop spécifique aux systèmes de traitement des rejets gazeux
53.	Indicateur d'intensité eau	[BURNHAM, 2007]	Mesure l'utilisation de l'eau, et permet d'en faire le suivi.	Quantitatif	$I_{eau} = \text{Total eau utilisée} / \text{unité de production}$	m ³ /unité de production	Redondant avec la « Consommation spécifique »
54.	Indicateur de conformité des cuves	[LOI 2006, 2006] ; [BAURAING et al., 2000]	Détermine la proportion de cuves en conformité	Quantitatif	Nombre de cuves en conformité (les cuves sont munies de bac de rétention) / nombre cuves non-conformes	Sans dimensions	Peu pertinent car pas d'évolution significative de l'indicateur dans le temps
55.	Indicateur de risque éco toxicologique	[PERRODIN et al., 2004]	Détermine le risque pour un écosystème absorbant un polluant toxique. Si la valeur de l'indicateur est supérieure à 1 il y a alors un risque pour l'écosystème aquatique	Quantitatif	Écotox = PEC / PNEC PEC : concentration que l'on s'attend à trouver dans l'environnement PNEC : concentration qui n'engendre aucun effet néfaste pour l'organisme le plus sensible testé	Sans dimensions	Redondant avec l'indicateur « Indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide »
56.	Indicateur de risque toxicologique	[PERRODIN et al., 2004]	Détermine le risque pour les personnes absorbant un polluant toxique.	Quantitatif	$Q_{tox} = DJM / DJA$ DJM : dose journalière moyenne DJA : dose journalière absorbable (INERIS). Si la valeur de l'indicateur est supérieure à 1 il y a alors un risque pour les personnes	Sans dimension	Redondant avec l'indice de risque IR
57.	Indicateur intensité du cycle de vie	[BURNHAM, 2007]	Comptabilise l'énergie consommée durant toutes les phases du cycle de vie du produit ou du service	Quantitatif	$I_{écv} = \text{total de l'énergie (phase 1+ 2+3+...)} / \text{unité de production}$	MJ/unité de production	Il a été montré que l'approche produit n'est pas adaptée aux ateliers de traitement de surfaces

58.	Indice air	[RHODIA, 1999]	Mesure la qualité des rejets gazeux émis.	Quantitatif	$I_{\text{qualité air}} = \text{PEB} / \text{PEB}_{\text{ref}}$ PEB : pollution équivalente brute PEB _{ref} : pollution équivalente brute pour l'année de référence	Sans dimensions	Il existe plusieurs manières de calculer le PEB qui diffèrent selon les entreprises. De plus comment choisir le PEB de référence ?
59.	Indice d'émission des bains	[INRS, 2001]	Estime la quantité de polluant émise par les bains de traitement. IE est représenté par des classes allant de 1 à 4 (l'étant l'émission la plus forte).	Qualitatif	L'émission de polluants calculée en fonction de la concentration des bains, de leur température, des températures d'ébullition des composés volatils ainsi que de l'agitation.	Sans dimensions	A été considéré comme un paramètre du niveau global de risque NGR
60.	Indice d'évolution des ressources naturelles dans les inputs utilisés	[IFEN, 2001]	-	-	-	-	Mal renseigné
61.	Indice de charge toxique et métallique rejetée dans l'eau	[DEPOERS <i>et al.</i> , 2002]	Évalue l'impact du rejet sur l'environnement dans lequel il est rejeté (cours d'eau). Les métox sont des paramètres établis par les Agences de l'eau, afin de percevoir les redevances pollution.	Quantitatif	$I_{\text{métox}} = \text{métox} / \text{unité de production} = (10\text{As}+50\text{Cd}+\text{Cr}+5\text{Cu}+50\text{Hg}+5\text{Ni}+10\text{Pb}+\text{Zn}) / \text{unité de production}$	g/litre/unité de production	Sur quelle base sont attribuées les pondérations des paramètres ?
62.	Indice de conformité	[BAURAING <i>et al.</i> , 2000] ; [PERSONNE, 1998]	Évalue le pourcentage de paramètres réglementaires non respectés	Quantitatif	Nombre de paramètres non respectés/ nombre de paramètres total	%	Redondant avec l'indicateur « charge toxique et polluante dans l'eau rejetée ».
63.	Indice de fréquence des accidents avec arrêts	[CRAM, 2009]	Mesure la fréquence des accidents avec arrêt	Quantitatif	Indice de fréquence des AT = (nombre d'accidents avec arrêt x 1000) / nombre d'heures travaillées	Nombre/ heures	Redondant avec taux de fréquence des accidents et arrêts de travail
64.	Indice de gravité	[TIXIER, 2002]	Estime la gravité d'un accident majeur c'est-à-dire son potentiel destructeur.	Quantitatif	$I_{\text{gravité}} = I_{\text{dangerosité}} \times F_{\text{qté}} \times F_{\text{contenant}}$ I _{gravité} est composé de l'indice de dangerosité corrigé des facteurs d'aggravation dû au types de contenant F _{contenant} et à la quantité F _{qté}	Sans dimension	N'apporte pas une réelle information supplémentaire par rapport aux indices de dangerosité
65.	Indice de gravité des incapacités permanentes	[CRAM, 2009]	Évalue la gravité des incapacités permanentes	Quantitatif	somme des taux d'incapacité permanente/heures travaillées	Pourcentage/ heures travaillées	Temps de retour de cet indicateur trop long du fait de la faible récurrence des incapacités permanentes pour ce secteur
66.	Indice de pollution accidentelle	[TIXIER, 2002]	Évalue l'impact d'une pollution liquide	Quantitatif	Rapport du produit de solubilité d'une substance et de son niveau de concentration maximale par rapport à une substance de référence.	Sans dimension	Redondant avec l'indice de dangerosité pour un effet de toxicité dû à un liquide

67.	Indice de toxicité des bains	[INRS, 2001]	Correspond au degré de toxicité du contaminant émis et est représenté par les lettres A, B, C, ou D (A étant le degré de toxicité le plus élevé)	Qualitatif	Il est établi à partir des valeurs limites d'exposition publiées en France. Lorsque plusieurs substances de toxicité différentes sont émises simultanément, l'indice retenu est celui qui correspond au risque le plus élevé.	Sans dimensions	A été considéré comme un paramètre du niveau global de risque NGR
68.	Indice de toxicité des réactifs stockés	[INRS, 2001]	Correspond au degré de toxicité du contaminant émis et est représenté par les lettres A, B, C, ou D (A étant le degré de toxicité le plus élevé)	Qualitatif	Il est établi à partir des valeurs limites d'exposition publiées en France. Lorsque plusieurs substances de toxicité différentes sont émises simultanément, l'indice retenu est celui qui correspond au risque le plus élevé.	Sans dimension	A été considéré comme un paramètre du niveau global de risque NGR
69.	Indice de vulnérabilité	[TIXIER, 2002]	Caractérise la vulnérabilité des cibles présentes dans l'environnement du site industriel et susceptibles d'être affectée par les effets d'un accident majeur	Qualitatif	Il est essentiel d'identifier les cibles (humaines, environnementales, matérielles) et de les dénombrer	Sans dimension	Pas de méthode claire de calcul de l'indicateur, néanmoins il peut être intéressant de tenir compte de cette vulnérabilité
70.	Indice eau	[RHODIA, 1999]	Mesure la qualité de l'eau en évaluant la charge polluante d'un rejet.	Quantitatif	$I_{\text{qualité eau}} = \text{PEB} / \text{PEB}_{\text{ref}}$ PEB : pollution équivalente brute PEB _{ref} : pollution équivalente brute pour l'année de référence	Sans dimensions	Il existe plusieurs manières de calculer le PEB qui diffèrent selon les entreprises. De plus comment choisir le PEB de référence ?
71.	Indices ATMO et IQA (qualité de l'air)	[BOURGUIGNO N <i>et al.</i> , 2007] ; [QUÉRÉ <i>et al.</i> , 2007]	Caractérise la qualité moyenne de l'air sur une agglomération. Plus l'indice est élevé, plus la qualité de l'air est mauvaise.	Qualitatif	L'indice ATMO est élaboré à partir des concentrations journalières de 4 polluants indicateurs de la pollution atmosphérique : le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote, l'ozone, les poussières en suspension.	Sans dimension	Peu pertinent car difficile de mesurer la contribution de l'atelier de surfaces
72.	Information de la population	[LE PROGRÈS, 2007]	Évalue le délai et la qualité de l'information donnée à la population en cas d'accident, de rejet intempestif ou autre	Qualitatif	Enquête auprès des riverains	Sans dimensions	Trop subjectif (comment qualifier la qualité de l'information donnée aux riverains ?)
73.	Integrated environmental assessment index for cleaner production technologies	[FIJAL, 2007]	Mesure la qualité environnementale des procédés	Quantitatif	$W_z = \sqrt{(W_s)^2 + (W_e)^2 + (W_o)^2 + (W_p)^2 + (W_v)^2}$	Sans dimension	Indicateur trop agrégé
74.	Investissement moyen annuel	[REYNE, 1991]	Estime la part du chiffre d'affaires réinvestit	Quantitatif	Investissement moyen annuel / chiffre d'affaires	%	Trop abstrait
75.	Mise en place d'une politique environnementale	[BAURAING <i>et al.</i> , 2000]	Évalue l'effort de l'entreprise dans la mise en place d'une stratégie environnementale	Qualitatif	Adoption de SME, ISO 14001, ISO 9001, OHSAS 18001	Sans dimensions	Ne concerne pas tous les ateliers, trop dépendant de la santé financière de l'entreprise et de la volonté des chefs d'entreprise
76.	Niveau de gestion des	[BOURGUIGNON]	Permet de placer l'entreprise à un	Qualitatif	Niveau 1 : Élimination complète des déchets,	Sans	Si l'entreprise met en place une

	déchets	<i>et al., 2007</i> [QUÉRÉ <i>et al.</i> , 2007]	niveau de gestion des déchets. Il existe 4 niveaux.		Niveau 2 : Réduction à la source, Niveau 3 : Valorisation (réutilisation, recyclage...), Niveau 4 : Traitement et rejets éco compatibles, Niveau 5 : Stockage	dimensions	pratique de 4PS, le niveau atteint est les niveaux 2 et 3. Il sera ensuite difficile de voir une évolution de cet indicateur
77.	Nombre d'accidents avec arrêt	[CRAM, 2009]	Évalue le nombre d'accidents avec arrêt	Quantitatif	Recensement	Nombre d'accident avec arrêt/ unité de temps	Redondant avec l'indicateur « fréquence des accidents du travail » qui est plus pertinent
78.	Nombre d'accidents de fuites de produits ou de mélange	[DROGOUL, 2006]	Évalue le nombre d'accidents de fuite de produits ou de mélanges	Quantitatif	Recensement	Nombre/unité de temps	Temps de retour assez long
79.	Nombre d'accidents mortels	[DROGOUL, 2006]	Évalue le nombre d'accidents du travail mortels	Quantitatif	Recensement	Nombre de mort/ unité de temps	Peu fréquent en traitement de surface
80.	Nombre d'heures supplémentaires effectuées par salarié et par mois	[BERRAH, 2002]	Estime le nombre d'heures supplémentaires effectuées par salarié et par mois	Quantitatif	Comptabilisation	Heures / salariés / mois	Lien avec l'introduction d'une pratique de 4PS ?
81.	Nombre de brûlures chimiques	[DROGOUL, 2006]	Évalue le nombre d'accidents de travail relatifs aux brûlures chimiques	Quantitatif	Recensement	Nombre de brûlures chimiques / unité de temps	Redondant avec l'indicateur « fréquence des accidents du travail » qui est plus pertinent
82.	Nombre de brûlures thermiques	[DROGOUL, 2006]	Évalue le nombre d'accidents de travail relatifs aux brûlures thermiques	Quantitatif	Recensement	Nombre de brûlures / unité de temps	Redondant avec l'indicateur « fréquence des accidents du travail » qui est plus pertinent
83.	Nombre de catastrophes technologiques	[IFEN, 2001]	Évalue le nombre de catastrophes technologiques	Quantitatif	Recensement	nombre	Temps de retour très long : peu fréquent
84.	Nombre de chutes de personnes	[DROGOUL, 2006]	Évalue le nombre d'accidents de travail relatifs aux chutes	Quantitatif	Recensement	Nombre de chutes / unité de temps	Redondant avec l'indicateur « fréquence des accidents du travail » qui est plus pertinent
85.	Nombre de fournisseurs	[BERRAH, 2002] [LACOSTE, 2003]	Évalue la concentration des fournisseurs	Quantitatif	Nombre de fournisseur	nombre	Pas de lien direct entre l'introduction d'une pratique de 4PS et un impact sur les fournisseurs
86.	Nombre de maladies avec arrêt	[CRAM, 2009]	Évalue le nombre de maladies professionnelles avec arrêt	Quantitatif	Recensement	Nombre de maladies	L'indicateur «taux de fréquence des accidents et arrêts de

						avec arrêt/unité de temps	travail» a été jugé plus pertinent
87.	Nombre de maladies avec incapacité permanente	[CRAM, 2009]	Évalue le nombre de maladies professionnelles avec incapacité permanente	Quantitatif	Recensement	Nombre de maladies avec incapacité permanente / unité de temps	L'indicateur « taux de fréquence des accidents et arrêts de travail » a été jugé plus pertinent
88.	Nombre de maladies mortelles	[CRAM, 2009]	Évalue le nombre de maladies professionnelles mortelles	Quantitatif	Recensement	Nombre de maladies mortelles/unité de temps	Peu fréquent en traitement de surfaces
89.	Nombre de nouveaux fournisseurs	[LACOSTE, 2003]	Évalue le degré d'attraction des fournisseurs	Quantitatif	Nombre de nouveaux fournisseurs / nombre total de fournisseurs	%	Pas de lien direct entre l'introduction d'une pratique de 4PS et un impact sur les fournisseurs
90.	Nombre de nouvelles embauches	[REYNE, 1991]	Évalue la capacité d'embauche de l'entreprise	Quantitatif	Recensement	nombre	Pas de lien direct entre l'introduction d'une pratique de 4PS et un impact sur les embauches
91.	Nombre de plaintes de riverains au sujet de nuisances esthétiques	[BAURAING <i>et al.</i> , 2000]	Estime les nuisances esthétiques vis à vis de la population	Quantitatif	enquête auprès des riverains	nombre	Trop subjectif
92.	Nombre de plaintes des riverains concernant la qualité des eaux	[DROGOUL, 2006]	Estime les nuisances concernant la qualité des eaux	Quantitatif	enquête auprès des riverains	nombre	Trop subjectif
93.	Nombre de poursuites judiciaires	[ISO 14001, 2004]	Estime la position de l'entreprise vis-à-vis de la justice	Quantitatif	Recensement	nombre	Le sous-système politico-juridique n'a pas été retenu comme cible des pratiques de 4PS
94.	Nombre de projets arrêtés	[LACOSTE, 2003]	Estime le nombre de projets arrêtés	Quantitatif	Recensement	nombre	Utilité dans le cadre de la méthodologie d'évaluation des impacts de 4PS ?
95.	Nombre de projets hors délai	[LACOSTE, 2003]	Estime le nombre de projets hors délai	Quantitatif	Recensement	nombre	Utilité dans le cadre de la méthodologie d'évaluation des impacts de 4PS ?

96.	Nombre de réclamations et de plaintes concernant les odeurs	[BAURAING <i>et al.</i> , 2000]	Estime les nuisances olfactives vis à vis de la population	Quantitatif	enquête auprès des riverains	nombre	Trop subjectif
97.	Nombre de salariés de maintenance	[DROGOUL, 2006]	Estime la capacité de maintenance des appareils	Quantitatif	recensement	nombre	Peu adapté à la problématique d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS
98.	Nombre moyen d'heures de formation par an et par catégorie d'employés	[PSA, 2006]	Estime l'effort que fait l'entreprise pour améliorer l'employabilité de son personnel	Quantitatif	Suivi du nombre moyen d'heures de formation sur l'année et par catégorie d'employés	Nombre d'heures moyen/ an / catégorie d'employés	Redondant avec le taux de formation du personnel
99.	Nombre, taux, fréquence des maladies professionnelles, troubles musculo-squelettiques, troubles oculaires, troubles auditifs	[DROGOUL, 2006]	-	-	-	-	Mal défini
100.	Nuisances dues au trafic des camions	[BOURGUIGNO N <i>et al.</i> , 2007] ; [QUÉRÉ <i>et al.</i> , 2007]	Estime les nuisances générées par le passage des camions	Quantitatif	Recensement	Nombre de rotation / unité de temps	Difficile de déterminer la contribution de l'atelier situé en zone industrielle aux nuisances générées par le passage des camions
101.	Packaging unit index	[FIJAL, 2007]	Estime les impacts environnementaux générés par les emballages utilisés. W_v est la somme d' $i=1$ à n du produit de l'indice d'emballage partiel w_{vi} par son indice relatif de charge environnementale k_{vi} .	Quantitatif	$W_v = \sum_{i=1}^n (w_{vi} \times k_{vi})$ avec $w_{vi} = \frac{m_{vi}}{m_{cp}}$ et $k_{vi} = \frac{k_{vs}}{k_{vs.max}}$ w_{vi} est le rapport de la masse de chaque matériau d'emballage utilisé m_{vi} par la masse totale de produits manufacturés par le procédé m_{cp} k_{vi} est le rapport de la charge environnementale totale pour chaque matériau d'emballage k_{vs} par la valeur maximale de cette charge environnementale pour chaque matériau considéré $k_{vs.max}$.	Sans dimension	Nécessite de trop nombreuses informations pour un état des lieux rapide et simple de l'atelier de traitement de surfaces
102.	Part relative des investissements dans l'environnement	[IFEN, 2001]	Évalue la part relative des investissements dans l'environnement	Quantitatif	Investissement pour l'environnement / investissements totaux	%	Pas de consensus vis-à-vis de cet indicateur

103.	pH de l'effluent à traiter	[DROGOUL, 2006]	Permet de savoir si on se trouve dans les conditions de fonctionnement (niveau acidité) de la station de traitement	Quantitatif	Mesures de pH en amont de la station de traitement	Sans dimensions	Peu d'utilité de cet indicateur
104.	Pollution équivalente brute PEB	[DROGOUL, 2006]	Estime la pollution équivalente brute. Ces indicateurs pondérés sont fréquemment utilisés dans l'entreprise.	Quantitatif	Pour chaque paramètre i pris en compte, la somme annuelle des tonnages T_i pondérés par le coefficient C_i permet le calcul : $PEB = \sum_i C_i T_i$	Tonne / an	Pas de méthode de calcul unique (C_i varie en fonction des entreprises).
105.	Potentiel de danger des substances	[DARMENDRAIL, 2001a]	-	-	-	-	Mal défini
106.	Potentiel de mobilisation de la source de pollution vers le milieu	[DARMENDRAIL, 2001b]	-	-	-	-	Mal défini
107.	Potentiel de transfert milieu-cible	[DARMENDRAIL, 2001a]	-	-	-	-	Mal défini
108.	Pourcentage de bénéfice net	[BERGERON, 2000]	Évalue les bénéfices dégagés	Quantitatif	(Prix de vente – coût de revient) / coût de revient	%	Le coût de revient est difficile à estimer dans le secteur du traitement de surfaces
109.	Pourcentage de déchets recyclés	[ISO 14001, 2004]	Évalue les efforts de recyclage	Quantitatif	Déchets recyclés (en interne ou externe) * 100 / déchets générés	(%)	Redondant avec l'indicateur d'utilisation des déchets
110.	Pourcentage de matériaux recyclés utilisés dans les emballages	[ISO 14001, 2004]	Évalue l'effort d'utilisation de matériaux d'emballage recyclés	Quantitatif	Quantité de matériaux recyclés pour l'emballage x100 / quantité de matériaux d'emballage	%	En atelier façonnier les pièces repartent dans leur emballage d'arrivée
111.	Pourcentage de personnes satisfaites de l'état de l'environnement et du cadre de vie	[IFEN, 2001]	Estime le pourcentage de personnes satisfaites de l'état de l'environnement et du cadre de vie	Quantitatif	Enquête auprès des riverains	%	Indicateur trop vague et subjectif. Lien entre l'état de l'environnement et les impacts d'une pratique de 4PS
112.	Prélèvements annuels d'eau dans la nappe phréatique	[DROGOUL, 2006]	Mesure le volume d'eau prélevé dans la nappe phréatique par an et la quantité d'eau annuelle renouvelable disponible dans les sources d'approvisionnement.	Quantitatif	Relevé au compteur	m ³ / an	Indicateur trop restrictif : toutes les entreprises de traitement de surfaces n'ont pas forcément de prélèvement dans une nappe phréatique
113.	Product unit index	[FIJAL, 2007]	Évalue le débit de produits manufacturés ayant un impact environnemental.	Quantitatif	$W_p = \sum_{i=1}^n w_{pi} \times k_{pi}$ avec $w_{pi} = \frac{m_{pi}}{m_{cp}}$ et	Sans dimension	Nécessite de trop nombreuses informations pour un état lieux rapide et simple de l'atelier de traitement de surfaces

					$k_{pi} = \frac{m_{sui}}{m_{pji}} \quad (0 \leq k_{pi} \leq 1)$ <p>Wp est la somme d'i=1 à n du produit de l'indice partiel de produit manufacturé w_{pi} par son indice de nuisance environnementale k_{pi}.</p> <p>w_{pi} est le rapport de la masse de chaque produit principal manufacturé m_{pi} dans le procédé par la masse totale des produits manufacturés m_{cp}.</p> <p>k_{pi} est le rapport de la masse de composés nocifs pour l'environnement dans chaque produit fabriqué m_{su}, par la masse de chaque produit fabriqué dans le processus technologique m_{pj}.</p>		
114.	Qualité des fournisseurs	[LACOSTE, 2003]	Estime la qualité des fournisseurs	Qualitatif	Audit qualité des fournisseurs	Sans dimension	Pas de lien direct entre l'introduction d'une pratique de 4PS et un impact sur les fournisseurs. De plus indicateur trop subjectif
115.	Quantité annuelle de DIB	[QUÉRÉ <i>et al.</i> , 2007] [PERSONNE, 1998]	Estime la quantité annuelle de DIB générée	Quantitatif	Peut être estimée à partir des coûts d'élimination des DIB	Tonnes/an	L'unité (t/an) n'est pas forcément la plus adaptée, un rapport à une unité de production est plus pertinent
116.	Quantité de boues produites	[ORÉE, 1996] [BAURAING <i>et al.</i> , 2000]	Évalue la quantité de boues produite	Quantitatif	Poids des big-bags	tonne	L'indicateur d'intensité boues est plus pertinent car se rapporte à une unité de production
117.	Quantité de déchets générés	[BAURAING <i>et al.</i> , 2000]	Mesure les tonnages des différents types de déchets produits par l'entreprise DIB, DID, boues	Quantitatif	Somme des poids de tous les déchets générés	tonne	L'indicateur d'intensité déchets est plus pertinent car se rapporte à une unité de production
118.	Quantité de déchets valorisés en interne	[ORÉE, 1996]	Exprime les efforts de valorisation	Quantitatif	Déchets ou rejets valorisés en internes	(t)	Redondant avec l'indicateur d'utilisation déchet
119.	Quantité de produits achetés par unité de temps	[DROGOUL, 2006]	Mesure le flux d'intrants	Quantitatif	Σ masse d'intrant	Tonne/ an	L'indicateur d'intensité matière première est plus pertinent car se rapporte à une unité de production
120.	Quantité de solvants émis	[PERSONNE, 1998]	Évalue la quantité de solvants émis	Quantitatif	-	tonne	L'unité de masse seule n'est pas forcément l'unité la plus adaptée

121.	Quantité, concentration, toxicité des fuites/ profondeur de la nappe	[DROGOUL, 2006]	-	-	-	-	Mal renseigné
122.	Quotient de danger	[DOR <i>et al.</i> , 2005]	Estime la dangerosité de l'exposition	Quantitatif	Ratio entre le niveau d'exposition et la valeur toxicologique de référence QD= (D/VTR)	Sans dimension	Redondant avec l'indice de dangerosité pour un effet de flux de surpression
123.	Ratio coût de transport/ coût de produit	[REYNE, 1991]	Estime la proximité des matières premières constitutives du produit ainsi que des clients	Quantitatif	Coût du transport des matières 1 ^{ères} / coût produit Coût du transport chez le client/ coût produit	Sans dimensions	Le coût de produit est difficile à évaluer de manière simple et rapide
124.	Ratio de productivité	[DROGOUL, 2006] ; [BERRAH, 2002]	Mesure la contribution des salariés à la valeur ajoutée c'est-à-dire leur productivité	Quantitatif	Rp = masse salariale / valeur ajoutée	Personnes / €	Redondant avec la productivité apparente du travail qui est égale à la valeur ajoutée divisée par l'effectif
125.	Raw materials unit index	[FIJAL, 2007]	Comptabilise toutes les matières premières entrant dans le procédé c'est-à-dire les matières premières principales et auxiliaires ainsi que l'eau utilisée dans le procédé (à l'exception des matières premières énergétiques et des matières premières provenant du recyclage)	Quantitatif	$W_s = \sum_{i=1}^n w_{si} \text{ et } w_{si} = \frac{m_{si}}{m_{cp}}$ Ws est la somme d'i=1 à n, de l'indice partiel de matières premières de chaque matière première entrant dans le procédé w _{si} . Ce w _{si} est le rapport de la masse de chaque matière première utilisée m _{si} par la masse totale de produits manufacturés par le procédé m _{cp}	Sans dimension	Nécessite de trop nombreuses informations pour un état des lieux rapide et simple de l'atelier de traitement de surfaces
126.	Rejets accidentels	[DROGOUL, 2006]	Mesure la fréquence des rejets en sortie de station dépassant les seuils réglementaires	Quantitatif	Relevé en sortie de station	Nombre	Nécessite trop de recul en termes de temps
127.	Respect des délais de livraison	[REYNE, 1991]	Évalue le respect des délais	Quantitatif	Nombre d'engagement de délais respectés / nombre d'engagement de délais	%	Est inclus dans le taux de satisfaction du client
128.	Respect du port des EPI	[SFTS, 2006]	Évalue le niveau de protection individuelle	Qualitatif	Nombre de personnes équipées / effectif total	%	Peu d'évolution de cet indicateur possible
129.	Salaire moyen mensuel par catégorie d'employés	[PSA, 2006]	Évalue l'effort que fait l'entreprise pour améliorer le pouvoir d'achat de ses employés	Quantitatif	Rapport de salaire minimum pratiqué par le groupe / salaire minimum légal du pays en 2006	%	Difficile d'établir un lien direct entre l'impact d'une pratique de 4PS et le salaire des employés bien que l'économie d'échelle provoquée par une pratique pourrait être redistribuée sous forme de pouvoir d'achat
130.	Surface couverte	[REYNE, 1991]	Estime la bonne utilisation des locaux, propre à une activité donnée : trop élevé	Quantitatif	Il se calcule par le ratio surface/ effectif	m ² /tête	Trop subjectif

			les employés et les stocks s'étalent, trop faible l'atelier est encombré.				
131.	Surface totale au sol utilisée à des fins de production	[REYNE, 1991]	Évalue l'utilisation du sol pour des fins de production	Quantitatif	-	m ²	Complètement dépendant de l'entreprise
132.	Taux d'absentéisme	[BERRAH, 2002]	Évalue la proportion de temps d'absence	Quantitatif	Heures d'absences/heures effectives	%	L'aspect positif a été préféré avec le taux de présentéisme
133.	Taux d'exercices d'évacuation en situation d'urgence	[LE PROGRÈS, 2007]	Évalue la fréquence des formations à la conduite en cas d'accident technologique	Quantitatif	Suivi	nombre/ unité de temps	Ne semble pas apporter d'information relative aux impacts d'une pratique de 4PS ; de plus est inclus dans le taux de formation du personnel
134.	Taux d'inactivité du matériel	[REYNE, 1991]	Comptabilise les temps morts (changements de matière ou de pièce, changement d'outil, essais, pannes et incidents, attentes, transport...) Il doit être mesuré dans le détail afin de le réduire.	Quantitatif	(temps d'ouverture de l'atelier- temps efficace de travail)/ temps d'ouverture de l'atelier	Sans dimensions	Pendant du taux d'utilisation de l'équipement
135.	Taux de conformité dans le repérage des produits et des cuves	[SFTS, 2006] [BARI, 2007]	Représente le pourcentage de cuves étiquetées et indique l'effort dans la sécurité des personnes	Quantitatif	(Nombre de cuves renseignées x 100) / nombre total de cuves	%	Peu pertinent car pas d'évolution significative de l'indicateur dans le temps
136.	Taux de conformité des produits	[ISO 14001, 2004]	Évalue la proportion de pièces conformes	Quantitatif	Nombre de pièces conformes / nombre de pièces fabriquées	%	Redondant avec le taux de satisfaction des clients
137.	Taux de conformité des rejets	[LOI 2006, 2006]	Évalue la proportion de paramètres réglementaires respectés	Quantitatif	Nombre de paramètres réglementaires respectés x 100 / nombre de paramètres de la réglementation	Sans dimension	Redondant avec la charge toxique et polluante dans l'eau rejetée
138.	Taux de croissance des ventes	[BERGERON, 2000]	Évalue le niveau des ventes	Quantitatif	Chiffre de ventes/ chiffre de vente année précédente	%	Ce taux peut évoluer suite à la mise en œuvre d'une pratique mais il est difficile d'en attribuer toute la responsabilité car d'autres facteurs économiques peuvent intervenir (conjoncture économique, cours des matériaux...)
139.	Taux de défaut d'une pièce	[BONNEFOUS <i>et al.</i> , 2001]	Estime le taux de défaut d'une pièce	Quantitatif	-	-	Subjectif : comment attribuer une échelle ? Il ya t-il un taux de défauts acceptable ?
140.	Taux de fiabilité des équipements	[BONNEFOUS <i>et al.</i> , 2001]	Évalue la fiabilité des équipements (MTBF : mean time between failures)	Quantitatif	Délai moyen entre deux défaillances successives pour un même équipement	Jours, mois année?	Trop dépendant du type de défaillance, et temps de retour

							de l'indicateur qui peut être long
141.	Taux de formation du personnel à la manipulation des appareils	[SFTS, 2006]	Évalue la proportion de personnel formé	Quantitatif	(nombre de personnes formées à la manipulation des appareils x100)/ effectif total	%	Trop spécifique à la manipulation des appareils
142.	Taux de fuites	[BERRAH, 2002]	Évalue le degré de fidélisation des clients	Quantitatif	T _{nc} = nombre de clients perdus / nombre total de clients	%	Pendant du gain de clientèle
143.	Taux de gravité des accidents du travail	[BERRAH, 2002] [CRAM, 2009]	Évalue la gravité des accidents de travail avec arrêt	Quantitatif	T _{gravité} = (Nombre de jours d'arrêt x 1000)/nombre d'heures travaillées	Jours / heures travaillées	N'apporte réellement pas d'informations supplémentaires par rapport au taux de fréquence des accidents et arrêts de travail
144.	Taux de main de d'œuvre	[BERRAH, 2002]	Évalue la proportion des coûts de main d'œuvre	Quantitatif	Coût de la main d'œuvre / coût de revient	Sans dimension	Cet indicateur est proche du taux de productivité apparente du travail qui lui a été préféré car plus parlant
145.	Taux de mortalité piscicole	[BARPI, 2007]	Estime le taux de mortalité piscicole provoqué par des rejets accidentels	Quantitatif	Quantité de poissons morts suite à un rejet accidentel	tonne	Cet indicateur est peu adapté aux impacts en fonctionnement normal de l'installation
146.	Taux de non-conformité	[BERRAH, 2002]	Évalue la proportion des pièces non conformes	Quantitatif	T _{non-conf} = nombre de pièces non-conformes / nombre de pièces traitées	%	Redondant avec le taux de satisfaction du client
147.	Taux de nouveaux clients	[BERRAH, 2002]	Évalue le degré d'attraction des clients	Quantitatif	Fuites = nombre de nouveaux clients / nombre total de clients	%	Redondant avec le gain de clientèle
148.	Taux de pièces conformes du premier coup	[BONNEFOUS <i>et al.</i> , 2001]	Évalue la proportion des pièces bonnes du 1 ^{er} coup	Quantitatif	T _{conf} = nombre de pièces conforme du 1 ^{er} coup / nombre de pièces traitées	%	Pendant du taux de rebuts
149.	Taux de polluants dans le sol	[BOURGUIGNO <i>N et al.</i> , 2007] [LE PROGRÈS, 2007]	Détermine la concentration massique en élément toxique par unité de masse de sol	Quantitatif	Nécessite une analyse du sol	mg/kg de sol	Cet indicateur est peu adapté aux impacts en fonctionnement normal de l'installation
150.	Taux de polluants dans les légumes	[LE PROGRÈS, 2007]	Détermine la concentration massique en élément toxique par unité de masse de légume	Quantitatif	Nécessite une analyse chimique des cultures avoisinantes	mg/kg de légume	Cet indicateur est peu adapté aux impacts en fonctionnement normal de l'installation
151.	Taux de production de boues	[DROGOUL, 2006]	Mesure les quantités de boues produites par unité de temps ou par unité de production.	Quantitatif	Boues = Quantité de boues produites/ durée de fonctionnement du procédé Le tonnage des boues doit être spécifique à un procédé ou une technique spécifiée pour permettre la comparaison.	Tonnes / heure	Redondant avec l'indicateur « intensité boues »
152.	Taux de rebut	[REYNE, 1991]	Évalue la proportion de pièces rebutées	Quantitatif	T _{rebut} = nombre de pièces rebutées / nombre de pièces fabriquées	%	Redondant avec le taux de satisfaction des clients
153.	Taux de recyclage des eaux	[PSA, 2006]	Évalue la quantité d'eau recyclée ou	Quantitatif	T _r = quantité d'eau recyclée x 100 / quantité d'eau	%	Redondant avec l'indicateur de

			réutilisée		consommée.		réutilisation des déchets
154.	Taux de renouvellement des formations à la sécurité	[LE PROGRÈS, 2007]	Évalue la fréquence des formations à la sécurité	Quantitatif	Suivi	nombre/ unité de temps	Ne semble pas apporter d'information relative aux impacts d'une pratique de 4PS
155.	Taux de retour des produits	[BERGERON, 2000]	Évalue le degré de conformité des produits de l'entreprise	Quantitatif	Nombre de produits retournés x100 / nombre de produits livrés	%	Redondant avec le taux de satisfaction du client
156.	Taux de satisfaction de personnes satisfaites de leurs conditions de travail	[IFEN, 2001]	Évalue le taux de satisfaction de personnes satisfaites de leurs conditions de travail	Qualitatif	Nécessite une enquête au sein de l'entreprise	Sans dimensions	Trop abstrait, peu adapté
157.	Taux de satisfaction des employés	[BERRAH, 2002]	Détermine les conditions de bien être du travailleur notamment en termes d'ergonomie du poste de travail, de difficulté du travail...	Quantitatif	Une enquête auprès des salariés	%	Difficile à mesurer car cet indicateur est très subjectif.
158.	Taux de sous-utilisation du personnel	[BERRAH, 2002]	Évalue le rapport des heures chômées aux heures effectuées	Quantitatif	Heures chômées / heures effectuées	%	Peu pertinent en fonctionnement normal de l'atelier
159.	Taux de sur-utilisation du personnel	[BERRAH, 2002]	Évalue le rapport des heures supplémentaires aux heures effectuées	Quantitatif	Heures supplémentaires / heures effectuées	%	Pendant du taux de sous-utilisation du personnel
160.	Temps de fonctionnement en continu de la chaîne	[DROGOUL, 2006]	Estime la durée d'un cycle	Quantitatif	Durée d'un cycle	Unité de temps	Redondant avec la productivité opérationnelle
161.	Temps de traitement des effluents	[DROGOUL, 2006]	Estime la capacité de traitement par la station d'un volume d'effluents	Quantitatif	volume à traiter/ débit en sortie de station de traitement des effluents	Unité de temps	Inutile car ce n'est pas un traitement en batch mais en continu
162.	Waste generation unit index	[FIJAL, 2007]	Comptabilise tous les déchets (liquides, solides ou gazeux) générés par le procédé. Wo est la somme des produits de l'indice partiel de génération de déchet par leur toxicité relative, pour chaque déchet solide k _{osi} , liquide k _{ocj} et gazeux k _{ogk} .	Quantitatif	$W_o = \sum_{i=1}^n (w_{osi} \times k_{osi}) + \sum_{j=1}^m (w_{ocj} \times k_{ocj}) + \sum_{k=1}^l (w_{ogk} \times k_{ogk})$ <p>avec $w_{osi} = \frac{m_{osi}}{m_{cp}}$, $w_{ocj} = \frac{m_{ocj}}{m_{cp}}$,</p> $w_{ogk} = \frac{m_{ogk}}{m_{cp}}$ <p>L'indice partiel de génération de déchets solide, liquide et gazeux, respectivement w_{osi}, w_{ocj}, et w_{ogk}, correspond au rapport de la masse de chaque déchet généré m_{osi},</p>	Sans dimension	Nécessite de trop nombreuses informations pour un état des lieux rapide et simple de l'atelier de traitement de surfaces

					m_{ocj} , m_{ogk} par la masse totale de produits manufacturés m_{cp} .		
--	--	--	--	--	--	--	--

ANNEXE 8 : INDICATEURS DE 4PS

Tableau 50: Caractéristiques anticorrosion

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Caractéristiques anticorrosion (BS)
	Sources citant l'indicateur	[DROGOU, 2006]
	Définition	Détermine la qualité d'une pièce en comparant le nombre d'heures de tenue au brouillard salin de cette pièce à celui spécifié par le client sur le cahier des charges.
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Mesure par un test dans un brouillard salin
	Unité de mesure	Heures
	Valeurs de référence/ échelle Croissant	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de rouille : Très bon • Rouille blanche après x heures : Bon • Rouille blanche avant y heures : Mauvais • Rouille rouge avant z heures : Très mauvais
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Très bon → 10 • Bon → 7,5 • Mauvais → 2,5 • Très mauvais → 0
	Notes méthodologiques et commentaires	(x, y, et z dépendent du cahier des charges)
Données	Nature des données	-
	Lien avec d'autres indicateurs	Taux de rebuts Taux de satisfaction du client
	Temps de retour	Rapide (3 jours)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 51 : Charge toxique et polluante dans l'air rejeté

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Charge toxique et polluante dans l'air rejeté (Ca)
	Sources citant l'indicateur	[DEPOERS et al., 2002] [QUÉRÉ et al., 2007] [BOURGUIGNON et al., 2007]
	Définition	Compare les concentrations des rejets pour chaque polluant atmosphérique à celles issue de l'arrêté du 30 juin 2006
	Type	Binaire
	Méthode de calcul :	L'ensemble des éléments surveillés est comparé aux valeurs réglementaires.
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les valeurs ≤ à la concentration réglementaire : Conforme • 1 valeur > à la concentration réglementaire : Non conforme
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Conforme → 10 • Non conforme → 0
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	Acidité, HF, Cr total, Cr VI, Ni, CN, Alcalins OH, NO ₂ , SO ₂ , NH ₃
	Lien avec d'autres indicateurs	Quantité de réactifs utilisés en station
	Temps de retour	Rapide (1semaine)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 52: Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée (Ce)
	Sources citant l'indicateur	[DEPOERS et al., 2002] [QUÉRÉ et al., 2007] [BOURGUIGNON et al., 2007]
	Définition	Compare les concentrations des rejets pour chaque polluant aqueux à celles issue de l'arrêté du 30 juin 2006
	Type	Binaire
	Méthode de calcul :	L'ensemble des éléments surveillés est comparé aux valeurs réglementaires.
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les valeurs ≤ à la concentration réglementaire : Conforme • 1 valeur > à la concentration réglementaire : Non conforme
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Conforme → 10 • Non conforme → 0
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	Cr VI, Cr III, Cd, Ni, Cu, Zn, Pb, Fe, Al, Sn, Hg, Ag, As, CN, P, MES, DBO ₅ , DCO, F, nitrites, CN, AOX, Azote global, Indice hydrocarbures, Tributylphosphate
	Lien avec d'autres indicateurs	Quantité de réactifs utilisés en station

	Temps de retour	Rapide (1semaine)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 53: Consommation spécifique

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Consommation spécifique (Q)
	Sources citant l'indicateur	[LAFOREST, 1999] [LOI 2006, 2006]
	Définition	Compare la consommation spécifique de l'atelier à celle définie par l'arrêté du 30 juin 2006 qui est de 8l/ m ² /fdr
	Type	Binaire
	Méthode de calcul :	Pas de calcul
	Unité de mesure	L/m ² /fdr (fdr : fonction de rinçage)
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • Si Q ≤ 8 : Conforme • Si Q > 8: Non conforme
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Conforme → 10 • Non conforme → 0
Notes méthodologiques et commentaires	-	
Données	Nature des données	$Q = \frac{B_{eau}}{S_t} \times \frac{1000}{n_{fdr}} \text{ avec } B_{eau} = \sum (a_i r_i \times (V_i \times F_i + X_i \times W_i) + V_{reg} \times x_i) + A$ <p> St : surface traitée (m²/an) n_{fdr} : nombre de fonctions de rinçage Beau : bilan eau (m³/an) i : numéro de la cuve V: volume (m³) F: fréquence de vidange par an X : débit (m³/h) W: durée de fonctionnement (h/an) V_{reg} : volume de régénération de la résine A : quantité d'eu rejetée par les postes annexes (m³/an) a, r, x = 0 ou 1 respectivement si il y a compensation (a), recyclage sur résine (r), et si la résine est régénérée sur place u non (x) </p>
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1jour)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et Outil de suivi

Tableau 54: Entraînement

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Entraînement (e)
	Sources citant l'indicateur	[LAFOREST, 1999] [LEVEILLARD et al., 2006]
	Définition	Caractérise la pollution des bains de rinçage par le film de liquide retenu par les pièces. Il est noté e.
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	$e = \frac{C_r - C_{r0}}{S \times C_b} \times V$
	Unité de mesure	L/m ²
	Valeurs de référence/ échelle	Indicateur de suivi : <ul style="list-style-type: none"> • L'entraînement augmente : Moins bon • L'entraînement diminue ou ne change pas : Bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Moins bon → 0 • Bon → 10
Notes méthodologiques et commentaires	-	
Données	Nature des données	C _b (g/L) : concentration du bain de traitement C _{r0} (g/L) : concentration du bain de rinçage mort à t = 0 C _r (g/L) : concentration du bain de rinçage mort à t > 0 S (m ²) : surface des pièces rincées entre t=0 et t>0 V (L) : volume du rinçage
	Lien avec d'autres indicateurs	Quantité de réactif utilisé en station ; Indicateur d'intensité boues ; Indicateur d'intensité de matière première ;
	Temps de retour	Rapide (1jour)
	Limites et Atouts	Outil de suivi

Tableau 55: Excès de risque individuel

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Excès de risque individuel (ERI)
	Sources citant l'indicateur	[INERIS, 2003]
	Définition	Représente la probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu développe au cours de sa vie entière l'effet associé à une exposition à un agent dangereux pour effet sans seuil.
	Type	Quantitative
	Méthode de calcul :	$ERI = DJE \times ERU$
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • ERI>10-5: Possibilité d'apparition d'un effet toxique • ERI<10-5: Effet toxique peu probable
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité d'apparition d'un effet toxique → 0 • Effet toxique peu probable → 10
	Notes méthodologiques et commentaires	Nécessite une petite étude sur les substances émises
Données	Nature des données	ERU : L'excès de risque unitaire est probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu développe un effet associé à une exposition pendant sa vie entière à une unité de dose d'un agent dangereux. L'ERU s'exprime en masse de polluant/m ³ pour la voie respiratoire. DJE : dose journalière d'exposition
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Moyen (1 mois)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 56: Gain de clientèle

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Gain de clientèle (G_{client})
	Sources citant l'indicateur	[LACOSTE, 2003]
	Définition	Évalue les effets d'une pratique de 4PS sur le nombre de clients
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Pas de calcul
	Unité de mesure	Nombre de clients
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • $G_{client} >$ valeur à $t=0$: Bon • $G_{client} =$ valeur à $t=0$: Sans effet • $G_{client} <$ valeur à $t=0$: Moins bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Bon → 10 • Sans effet → 10 • Moins bon → 0
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	-
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Moyen (1 mois)
	Limites et Atouts	Outil de suivi

Tableau 57: Indicateur de gestion des déchets solides

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Indicateur de gestion des déchets solides (GES)
	Sources citant l'indicateur	[LOI 2006, 2006]
	Définition	Vérifie la bonne gestion des déchets pour limiter la pollution des sols
	Type	Qualitatif
	Méthode de calcul :	Visite du site industriel
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • Stockage à l'abri des intempéries et sur sol étanche : niveau 1 • Stockage sur sol étanche : niveau 2 • Stockage à l'abri des intempéries : niveau 3 • Stockage sauvage : niveau 4
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • niveau 1 → 10 • niveau 2 → 6,6 • niveau 3 → 3,3 • niveau 4 → 0
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	-
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1 jour)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 58: Indicateur d'intensité boues

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Indicateur d'intensité boues (I_{boues})
	Sources citant l'indicateur	[BOURGUIGNON et al., 2007]
	Définition	Rend compte de l'intensité des boues générées en fonction d'une unité de production
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	$I_{\text{boues}} = \frac{M_{\text{boues}}}{U_p}$
	Unité de mesure	kg / unité de production
	Valeurs de référence/ échelle	Indicateur De Suivi : <ul style="list-style-type: none"> • L'intensité boues augmente : Moins Bon • L'intensité boues diminue ou ne change pas : Bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Moins bon → 0 • Bon → 10
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	M_{boues} : masse des boues générées par mois U_p : unité de production (peut être le nombre de m ² de surface traitée/ mois)
	Lien avec d'autres indicateurs	Indicateur d'intensité déchet ; Indicateur d'intensité matière première
	Temps de retour	Moyen (1 mois)
	Limites et Atouts	Outil de suivi

Tableau 59: Indicateur d'intensité déchet

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Indicateur d'intensité déchet de production ($I_{\text{déchet}}$)
	Sources citant l'indicateur	[BURNHAM, 2007]
	Définition	Rend compte de l'intensité de déchets générés en fonction d'une unité de production
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	$I_{\text{déchet}} = \frac{M_{\text{déchet}}}{U_p}$
	Unité de mesure	kg / unité de production
	Valeurs de référence/ échelle	Indicateur de suivi : <ul style="list-style-type: none"> • L'intensité déchet augmente : Moins bon • L'intensité déchet diminue ou ne change pas : Bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Moins bon → 0 • Bon → 10
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	$M_{\text{déchet}}$: masse des déchets de production générés par mois U_p : unité de production (peut être le nombre de m ² de surface traitée/ mois)
	Lien avec d'autres indicateurs	Indicateur d'intensité de matière première ;
	Temps de retour	Moyen (1mois)
	Limites et Atouts	Outil de suivi

Tableau 60: Indicateur d'intensité de matières premières

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Indicateur d'intensité de matières premières (I_{mp})
	Sources citant l'indicateur	[BURNHAM, 2007]
	Définition	Mesure toutes les matières 1 ^{ères} servant à la production des produits en fonction d'une unité de production
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	$I_{\text{mp}} = \frac{M_{\text{mp}}}{U_p}$
	Unité de mesure	kg / unité de production
	Valeurs de référence/ échelle	Indicateur de suivi : <ul style="list-style-type: none"> • L'intensité de matière première augmente : Moins bon • L'intensité de matière première diminue ou ne change pas : Bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Moins bon → 0 • Bon → 10
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	M_{mp} : masse des matières premières entrant dans le processus de production en un mois U_p : unité de production (peut être le nombre de m ² de surface traitée/ mois)
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Moyen (1mois)
	Limites et Atouts	Outil de suivi

Tableau 61: Indicateur d'intensité énergétique

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Indicateur d'intensité énergétique ($I_{\text{énergie}}$)
	Sources citant l'indicateur	[BURNHAM, 2007]
	Définition	Mesure toutes les énergies directes ou indirectes servant à la production des produits ou à l'offre de services en fonction d'une unité de production
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	$I_{\text{énergie}} = \frac{\text{énergie}}{U_p}$
	Unité de mesure	kWh / unité de production
	Valeurs de référence/ échelle	Indicateur de suivi : <ul style="list-style-type: none"> L'intensité énergétique augmente : Moins bon L'intensité énergétique diminue ou ne change pas : Bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> Moins bon → 0 Bon → 10
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	énergie : énergie totale consommée de toute source par mois (kWh) U_p : unité de production (peut être le nombre de m ² de surface traitée/ mois)
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Moyen (1mois)
	Limites et Atouts	Outil de suivi

Tableau 62: Indicateur de biodégradabilité des rejets dans l'eau

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Indicateur de biodégradabilité des rejets dans l'eau ($I_{\text{biodég}}$)
	Sources citant l'indicateur	[DEPOERS et al., 2002]
	Définition	Mesure la capacité de biodégradabilité des polluants dans l'eau
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	$I_{\text{biodég}} = \frac{DCO}{DBO_5}$
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> $I_{\text{biodég}} < 2$: Facilement biodégradable $I_{\text{biodég}} < 3$: Biodégradable $I_{\text{biodég}} > 3$ Non biodégradable
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> Facilement biodégradable → 10 Biodégradable → 5 Non biodégradable → 0
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	DCO : Demande chimique en oxygène DBO ₅ : Demande biologique en oxygène
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1 jour)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 63: Indicateur d'utilisation déchet

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Indicateur d'utilisation déchet (U_d)
	Sources citant l'indicateur	[BURNHAM, 2007]
	Définition	Permet le suivi des efforts visant à trouver des utilisations pour les flux de déchets/rejets. Il inclut l'eau recyclée.
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	$U_d = \frac{M_{\text{déchets utilisés}}}{M_{\text{déchets}}} \times 100$
	Unité de mesure	%
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> <25% : Moyen <50% : Bon >50% : Très Bon >75% : Excellent
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> Moyen → 0 Bon → 3,3 Très Bon → 6,6 Excellent → 10
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	$M_{\text{déchets}}$: masse des déchets de production générés $M_{\text{déchets}}$: masse des déchets de production réutilisés
	Lien avec d'autres indicateurs	Indicateur d'intensité déchet
	Temps de retour	Moyen (1mois)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 64:Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique (I_{ft})
	Sources citant l'indicateur	[TIXIER, 2002]
	Définition	Évalue la dangerosité des substances utilisées lors du traitement des pièces ou en station de dépollution pour un effet de flux thermique
	Type	Qualitatif
	Méthode de calcul :	I_{ft} est déterminé à partir des phrases de risques qualifiant l'inflammabilité de la substance et de sa chaleur de combustion par rapport à l'hydrogène
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	R12 → niveau 4 R11 ou R15 ou R17 → niveau 3 R10 → niveau 2 aucune de ces phrases de risque → niveau 1
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • 4 : Extrêmement inflammable → 0 • 3 : Facilement inflammable → 3,3 • 2 : Inflammable → 6,6 • 1 : Faiblement inflammable → 10
Notes méthodologiques et commentaires	Tixier (2002) propose 6 niveaux de risque en tenant compte de la chaleur de combustion des produits chimiques par rapport à l'hydrogène. Afin de simplifier nous proposons 4 niveaux de risques en ne tenant compte uniquement que des phrases de risque.	
Données	Nature des données	Phrases de risque des produits chimiques utilisés R12 R11, R15, R17 R10
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1jour)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 65:Indice de dangerosité pour un effet de flux de surpression

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Indice de dangerosité pour un effet de flux de surpression (I_{surp})
	Sources citant l'indicateur	[TIXIER, 2002]
	Définition	Évalue la dangerosité des substances utilisées lors du traitement des pièces ou en station de dépollution pour le cas d'un effet de surpression. Elle dépend de la capacité d'explosion des substances et de l'intensité énergétique pouvant être dégagée
	Type	Qualitatif
	Méthode de calcul :	I_{surp} est déterminé à partir des phrases de risques qualifiant l'explosivité de la substance et de l'intensité énergétique pouvant être dégagée.
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	R1 et R4 → niveau 4 R3 et R6 → niveau 3 R2, R5, R9, R16, R18, R19, R44 → niveau 2 aucune de ces phrases de risque → niveau 1
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • 4 : Explosif sensible → 0 • 3 : Explosif → 3,3 • 2 : Possibilité d'être explosif → 6,6 • 1 : Non explosif → 10
Notes méthodologiques et commentaires	Tixier (2002) propose 6 niveaux de risque en tenant compte de l'intensité énergétique pouvant être dégagée. Cette intensité est le ratio de l'énergie libérée par la combustion d'un kg de produit, par celle dégagée par la combustion d'un kg de TNT. Afin de simplifier nous proposons 4 niveaux de risques en tenant compte uniquement des phrases de risque.	
Données	Nature des données	Phrases de risque des produits chimiques utilisés R1, R4, R3, R6, R2, R5, R9, R16, R18, R19, R44
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1jour)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 66: Indice de dangerosité pour un effet de toxicité dû à un liquide

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Indice de dangerosité pour un effet de toxicité dû à un liquide (I _{poll})
	Sources citant l'indicateur	[TIXIER, 2002]
	Définition	Évalue la dangerosité des substances liquides toxiques utilisées lors du traitement des pièces ou en station de dépollution pour un effet de toxicité dû à un liquide
	Type	Qualitatif
	Méthode de calcul :	Déterminé à partir des phrases de risque qui classifient ces substances d'un point de vue de l'écotoxicité
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	R50 et R53 → niveau 6 R50 → niveau 5 R51 et R53 → niveau 4 R51 → niveau 3 R52 ou R52 et R53 → niveau 2 R58 ou R53 → niveau 1 aucune de ces phrases de risque → niveau 0
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • 6 : Très toxique → 0 • 5 : Assez toxique → 1,65 • 4 : Toxique → 3,3 • 3 : Assez nocif → 4,95 • 2 : Nocif → 6,6 • 1 : Peu nocif → 8,25 • 0 : Faiblement nocif → 10
	Notes méthodologiques et commentaires	Tixier (2002) propose 6 niveaux de risque. Un 7 ^{ème} niveau a été ajouté pour les produits ne faisant pas partie des phrases de risque proposées.
Données	Nature des données	Phrases de risque des produits chimiques utilisés R50, R51, R52, R53, R54, R55, R56, R58
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1jour)
	Limites et Atouts	La principale limite est liée au fait qu'il existe un niveau unique de dangerosité pour les cibles faune, flore et sol. Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 67: Indice de risque

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Excès de risque individuel (IR)
	Sources citant l'indicateur	[INERIS, 2003]
	Définition	Exprime le niveau de risque toxicologique pour les effets à seuil, par le rapport entre la concentration d'exposition et la valeur toxicologique de référence. Pour un indice inférieur à 1 la survenue d'un effet toxique est peu probable pour les effets à seuil
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	$IR = \frac{DJE}{RfD} = \frac{CI}{CT}$
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • IR>1: Possibilité d'apparition d'un effet toxique • IR<1: Effet toxique peu probable
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité d'apparition d'un effet toxique → 0 • Effet toxique peu probable → 10
Notes méthodologiques et commentaires	Nécessite une petite étude sur les substances émises	
Données	Nature des données	DJE : dose journalière d'exposition RfD : dose de référence CI : concentration inhalée CT : concentration tolérable
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Moyen (1 mois)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 68: Mesure du bruit extérieur

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Mesure du bruit extérieur (NSe)	
	Sources citant l'indicateur	[BAURAING et al., 2000][PERSONNE, 1998][TIXIER, 2002]	
	Définition	Compare le niveau sonore et l'émergence provoquée par les émissions sonores à l'extérieur de l'atelier aux valeurs admissibles définies par l'arrêté du 23 janvier 1997	
	Type	Binaire	
	Méthode de calcul :	Mesure à l'aide d'un sonomètre	
	Unité de mesure	dB(A)	
	Valeurs de référence/ échelle	En semaine de 7h à 22h • si NS <45 dB(A) • Ve<6dB(A) → Conforme • Ve>6dB(A) → Non conforme • si NS >45 dB(A) • Ve<5dB(A) → Conforme • Ve>5dB(A) ☒ Non conforme	Dimanches et jours fériés 7h à 22h • si NS <45 dB(A) • Ve<4dB(A) → Conforme • Ve>4dB(A) → Non conforme • si NS >45 dB(A) • Ve<3dB(A) → Conforme • Ve>3dB(A) → Non conforme
	Sens et note	• Non conforme → 0 • Conforme → 10	
	Notes méthodologiques et commentaires	-	
	Données	Nature des données	Valeurs d'émergence (Ve) Niveau sonore (NS)
Lien avec d'autres indicateurs		-	
Temps de retour		Moyen (1mois)	
Limites et Atouts		Outil de diagnostic et outil de suivi	

Tableau 69: Mesure du bruit intérieur

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Mesure du bruit intérieur (NSi)	
	Sources citant l'indicateur	[BAURAING et al., 2000][PERSONNE, 1998][CRAM, 2007][TIXIER, 2002]	
	Définition	Estime le niveau sonore dans l'atelier	
	Type	Qualitatif	
	Méthode de calcul :	Enquête	
	Unité de mesure	Sans dimension	
	Valeurs de référence/ échelle	• De 0 à 60 dB : Calme • De 60 à 85 dB : Gênant • De 85 à 100 : Nocif • Supérieur à 100 dB : Insupportable	
	Sens et note	• Calme → 10 • Gênant → 6,6 • Nocif → 3,3 • Insupportable → 0	
Notes méthodologiques et commentaires	L'enquête est à réaliser auprès des opérateurs (on retiendra le niveau ressenti le plus élevé)		
Données	Nature des données	-	
	Lien avec d'autres indicateurs	-	
	Temps de retour	Rapide (1jour)	
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi	

Tableau 70: Niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier (Odeur ex)
	Sources citant l'indicateur	[ROGNON <i>et al.</i> , 2000][TIXIER, 2002]
	Définition	Estime la perception de la gêne ressentie
	Type	Qualitatif
	Méthode de calcul :	Enquête auprès du proche voisinage
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • Extrêmement gêné • Très gêné • Gêné • Peu gêné • Non gêné • Pas d'odeur ressentie
Sens et note	• 0, 2, 4, 6, 8, 10 d'extrêmement gêné à pas d'odeur ressentie	
Notes méthodologiques et commentaires	L'utilisation d'un sondage pour l'estimation du niveau d'odeur a été retenue car à notre connaissance, il n'existe pas d'échelle quantitative reliant les mesures de concentration olfactométriques à un niveau de sensation.	
Données	Nature des données	-
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1jour)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 71: Niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier (odeur in)
	Sources citant l'indicateur	[ROGNON <i>et al.</i> , 2000][TIXIER, 2002]
	Définition	Estime la perception de la gêne ressentie
	Type	Qualitatif
	Méthode de calcul :	Enquête auprès des opérateurs
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • Extrêmement gêné • Très gêné • Gêné • Peu gêné • Non gêné • Pas d'odeur ressentie
Sens et note	• 0, 2, 4, 6, 8, 10 d'extrêmement gêné à pas d'odeur ressentie	
Notes méthodologiques et commentaires	L'utilisation d'un sondage pour l'estimation du niveau d'odeur a été retenue car à notre connaissance, il n'existe pas d'échelle quantitative reliant les mesures de concentration olfactométriques à un niveau de sensation.	
Données	Nature des données	-
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1jour)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 72: Niveau global de risques

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Niveau global de risques (NGR)
	Sources citant l'indicateur	[INRS, 2001] [BOUVIER <i>et al.</i> , 1998] [ROGNON <i>et al.</i> , 2000]
	Définition	Caractérise le risque toxique généré par la présence de produits chimiques en fonctionnement normal de l'entreprise. Ce risque est estimé à partir de la quantité de contaminant émise ainsi que de sa toxicité.
	Type	Qualitatif
	Méthode de calcul :	correspondant. Cet indicateur est déterminé en couplant l'indice d'émission de produits (dépend de la concentration, la température, et le volume des bains), à l'indice de toxicité (dépend du degré de toxicité des produits). Il existe néanmoins des tables de classifiant par type de bains utilisés le NGR
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • très toxique et émis en grande quantité (Haut risque) : niveau I • toxique et émis en grande quantité: niveau II • toxique et moyennement émis : niveau III • très toxique et peu émis: niveau IV • Peu toxique et faiblement émis: niveau V • peu toxique et peu émis (Faible risque) : niveau VI
Sens et note	• 0, 2, 4, 6, 8, 10 de niveau I à niveau VI	

	Notes méthodologiques et commentaires	Les tables utilisées pour l'établissement des NGR ne tiennent pas compte de la présence de systèmes de ventilation permettant de réduire ce risque. Deux règles ont été établies : Présence d'un système de ventilation sur le bain : le NGR est ramené au niveau IV Le NGR de la chaine correspond à celui du bain ayant le NGR le plus faible Le NGR de l'atelier correspond à celui de la chaine ayant le plus faible
Données	Nature des données	-Nature des différents bains de traitement
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1jour)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 73: pH des rejets

Indicateur	Libellé de l'indicateur	pH des rejets (pH)
	Sources citant l'indicateur	[LOI 2006, 2006] [BAURAING et al., 2000] [ROGNON et al., 2000]
	Définition	Compare le pH des rejets à celui défini par l'arrêté du 30 juin 2006
	Type	Binaire
	Méthode de calcul :	Mesure pH-métrique
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • < 6,5 : non-conforme • 6,5 < pH < 9: conforme • > 9 : non conforme
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Conforme → 10 • Non conforme → 0
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	Valeurs en sortie de station de traitement
	Lien avec d'autres indicateurs	Quantité de réactifs utilisés en station
	Temps de retour	Rapide (1 jour)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 74: Productivité opérationnelle

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Productivité opérationnelle (PO)
	Sources citant l'indicateur	[BERRAH, 2002] [ROGNON et al., 2000]
	Définition	Évalue le rendement de l'appareil de production
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Mesure du temps nécessaire au traitement d'un m ² de surface
	Unité de mesure	Minutes
	Valeurs de référence/ échelle	Indicateur de suivi : <ul style="list-style-type: none"> • PO augmente : moins bon • PO diminue ou ne change pas : bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Moins bon → 0 • Bon → 10
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	Temps de cycle
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1 jour)
	Limites et Atouts	Outil de suivi uniquement

Tableau 75: Quantité de réactifs utilisés en station

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Quantité de réactifs utilisés en station (réactif)
	Sources citant l'indicateur	[BOURGUIGNON <i>et al.</i> , 2007] [ROGNON <i>et al.</i> , 2000]
	Définition	Évalue la consommation de réactifs nécessaire au traitement des effluents
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Suivi des stocks
	Unité de mesure	kg/m ³ d'effluents traités
	Valeurs de référence/ échelle	Indicateur de suivi : <ul style="list-style-type: none"> • La quantité de réactifs nécessaire augmente : Moins bon • La quantité de réactifs nécessaire diminue ou ne change pas : Bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Moins bon → 0 • Bon → 10
Notes méthodologiques et commentaires	-	
Données	Nature des données	Flux massique de réactifs utilisés (kg/mois) Débit d'effluents traités (m ³ /mois)
	Lien avec d'autres indicateurs	
	Temps de retour	Moyen (1mois)
	Limites et Atouts	Outil de suivi uniquement

Tableau 76 : Suivi de charge toxique et polluante dans l'air rejeté

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Suivi de charge toxique et polluante dans l'air rejeté (SCa)
	Sources citant l'indicateur	[DEPOERS <i>et al.</i> , 2002] [QUÉRÉ <i>et al.</i> , 2007] [BOURGUIGNON <i>et al.</i> , 2007]
	Définition	Compare les concentrations des rejets pour chaque polluant atmosphérique à leur valeur précédente
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Pas de calcul
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	Indicateur de suivi : chaque paramètre est comparé à sa valeur antérieure. <ul style="list-style-type: none"> • Si la majorité des paramètres a une valeur inférieure à la valeur précédente: Meilleur • S'il n'y a pas de modification ou si le nombre de paramètres ayant une valeur inférieure à la valeur précédente est égal au nombre de paramètres ayant une valeur supérieure à la valeur précédente : Sans effet • Si la majorité des paramètres a une valeur supérieure à la valeur précédente : Moins bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleur → 10 • Sans Effet → 10 • Moins bon → 0
Notes méthodologiques et commentaires	-	
Données	Nature des données	Acidité, HF, Cr total, Cr VI, Ni, CN, alcalins OH, NO ₂ , SO ₂ , NH ₃
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1semaine)
	Limites et Atouts	Outil de suivi uniquement

Tableau 77: Suivi de charge toxique et polluante dans l'eau rejetée

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Suivi de charge toxique et polluante dans l'eau rejetée (SCe)
	Sources citant l'indicateur	[DEPOERS <i>et al.</i> , 2002] [QUÉRÉ <i>et al.</i> , 2007][BOURGUIGNON <i>et al.</i> , 2007]
	Définition	Compare les concentrations des rejets pour chaque polluant atmosphérique à leur valeur précédente
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Pas de calcul
	Unité de mesure	Sans dimension
	Valeurs de référence/ échelle	Indicateur de suivi : chaque paramètre est comparé à sa valeur antérieure. <ul style="list-style-type: none"> • Si la majorité des paramètres a une valeur inférieure à la valeur précédente : Meilleur • S'il n'y a pas de modification ou si le nombre de paramètres ayant une valeur inférieure à la valeur précédente est égal au nombre de paramètres ayant une valeur supérieure à la valeur précédente : Sans effet • Si la majorité des paramètres a une valeur supérieure à la valeur précédente : Moins bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleur → 10

		<ul style="list-style-type: none"> • Sans Effet → 10 • Moins Bon → 0
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	Cr VI, Cr III, Cd, Ni, Cu, Zn, Pb, Fe, Al, Sn, Hg, Ag, As, CN, P, MES, DBO ₅ , DCO, F, nitrites, CN, AOX, Azote global, Indice hydrocarbures, tributylphosphate
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1semaine)
	Limites et Atouts	Outil de suivi uniquement

Tableau 78: Taux de conformité aux rapports de dilution des bains de rinçage

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Taux de conformité aux rapports de dilution des bains de rinçage (Rd)	
	Sources citant l'indicateur	[ROGNON <i>et al.</i> , 2000] [CARPP, 2002] [LAFOREST, 1999]	
	Définition	Le rapport de dilution caractérise l'efficacité de la fonction de rinçage. Un rapport de dilution trop élevé est associé à une très bonne qualité du rinçage mais une forte consommation d'eau. Réciproquement un rapport de dilution faible est associé à une faible consommation d'eau mais une qualité médiocre du rinçage. Ce rapport dépend fortement du type de rinçage. Rd= [espèce] dans le bain de traitement/ [espèce] dans le dernier bain de la fonction de rinçage associée. Le taux de conformité exprime par conséquent le pourcentage de fonction de rinçage fonctionnant dans des conditions optimales.	
		Préparation de surface	Passivation Cr VI
		• <500 : bon	• <1000 : bon
		• 500<Rd<5000 : optimal	• 100<Rd<2000 : optimal
		• >5000 : moins bon	• >200 : moins bon
		Dépôts	Phosphatation
		• <5000 : bon	• <2000 : bon
		• 5000<Rd<10000 : optimal	• 2000<Rd<5000 : optimal
	• >10000 : moins bon	• >5000 : moins bon	
	Type	Quantitatif	
	Méthode de calcul :	Nombre de fonction de rinçage dont le Rd est optimal/nombre de fonction de rinçage dans l'atelier	
	Unité de mesure	%	
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • >80%: Très bon • >70%: Bon • >60%: Moins bon • <50%: Mauvais 	
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Très bon →10 • Bon →6,6 • Moins bon →3,3 • Mauvais →0 	
	Notes méthodologiques et commentaires	Nécessite une petite étude (mesure des concentrations)	
Données	Nature des données	-	
	Lien avec d'autres indicateurs	Entraînement	
	Temps de retour	Moyen (1mois)	
	Limites et Atouts	Outil de suivi uniquement	

Tableau 79: Taux d'utilisation de l'équipement

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Taux d'utilisation de l'équipement (U _{équip})
	Sources citant l'indicateur	[REYNE, 1991][BERRAH, 2002][ROGNON <i>et al.</i> , 2000]
	Définition	Évalue la proportion de fonctionnement des équipements
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Production/ Capacité de production estimée
	Unité de mesure	%
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • >75% : très utilisé • >50% : utilisé • <50% : peu utilisé
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Très utilisé →0 • Utilisée →5 • Peu utilisée →10
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	Production annuelle (m ² de surface traitée) Capacité de production estimée (m ² de surface qui pourrait être traité par l'entreprise au maximum)
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Long (1an)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 80: Taux de formation du personnel

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Taux de formation du personnel (formation)
	Sources citant l'indicateur	[SFTS, 2006] [ROGNON et al., 2000]
	Définition	Évalue la proportion de personnel formé
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	(nombre de personnes formées x100)/ effectif total
	Unité de mesure	%
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • >75% : Fort • >50% : Moyen • <50% : Faible
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Fort →10 • Moyen →5 • Faible →0
Notes méthodologiques et commentaires	-	
Données	Nature des données	-
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Moyen (1mois)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 81: Taux de fréquence des accidents et arrêts du travail

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Taux de fréquence des accidents et arrêts du travail (F_{accident})
	Sources citant l'indicateur	[CRAM, 2009] [ROGNON et al., 2000]
	Définition	Mesure la fréquence des accidents et arrêts de toute nature
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Taux de fréquence= (nombre d'accidents ou d'incidents x 1000000)/ nombre d'heures travaillées
	Unité de mesure	Nombre/ heure
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> TF<20 : Très bon résultat • 20<TF<30 : Bon résultat • 30<TF<40 : Assez bon résultat • TF>40 : Résultat moins bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Très Bon Résultat →10 • Bon Résultat →6,6 • Assez Bon Résultat →3,3 • Résultat moins bon →0
Notes méthodologiques et commentaires	Suivi par la médecine du travail des accidents et arrêts	
Données	Nature des données	Nombre d'accident, d'incident Nombre d'heures travaillées = effectif * cycle de production
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Moyen (1mois)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 82: Taux de présentéisme

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Taux de présentéisme ($T_{\text{présent}}$)
	Sources citant l'indicateur	[BONNEFOUS et al., 2001]
	Définition	Évalue le temps de présence des salariés
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Nombre salariés présents en moyenne par mois / Effectif total
	Unité de mesure	%
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • >96% : Très Bon • 85<$T_{\text{présent}}$<96% : Bon • <85% : Médiocre
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Très Bon →10 • Bon →5 • Médiocre →0
Notes méthodologiques et commentaires	-	
Données	Nature des données	Nombre salariés présents en moyenne par mois Effectif total
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Moyen (1mois)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 83: Productivité apparente du travail

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Productivité apparente du travail (T_{prod})
	Sources citant l'indicateur	[REYNE, 1991] [SESSI, 2007]
	Définition	Traduit la maximisation des résultats par rapport aux moyens engagés
	Type	quantitatif
	Méthode de calcul :	Valeur ajoutée/ Effectif total
	Unité de mesure	k€/pers
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • <20: Très Faible ; • <30: Faible • 50<T_{prod}<60 : Taux moyen de PME du secteur • >60: Fort
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Très faible →0 • Faible → 3,3 • Taux moyen de PME du secteur →6,6 • Fort →10
Notes méthodologiques et commentaires	-	
Données	Nature des données	Valeur ajoutée (voir tableau 38) Effectif total
	Lien avec d'autres indicateurs	Valeur ajoutée
	Temps de retour	Long (1 an)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 84: Taux de renouvellement de l'équipement

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Taux de renouvellement de l'équipement
	Sources citant l'indicateur	[REYNE, 1991]
	Définition	Estime l'effort de l'entreprise à limiter la vétusté de ses équipements
	Type	binaire
	Méthode de calcul :	Investissement moyen annuel en matériel/ CA
	Unité de mesure	%
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • <5% : Faible • >5% : Bon
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Faible → 0 • Bon → 10
Notes méthodologiques et commentaires	-	
Données	Nature des données	Investissement moyen annuel en matériel CA : Chiffre d'affaires
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Long (1an)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 85: Taux de satisfaction du client

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Taux de satisfaction du client (T_{satisf})
	Sources citant l'indicateur	[BERRAH, 2002] [ISO 14001, 2004] [LACOSTE, 2003]
	Définition	Évalue le degré de satisfaction des clients
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	$T_{satisf} = \text{nombre de réclamation} / \text{nombre de pièces livrées}$
	Unité de mesure	%
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • <1% : Très satisfait • < 5% : Relativement satisfait • <10% : Ni satisfait ni mécontent • > 10% : Relativement mécontent • >50% : Très mécontent
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Très satisfait →10 • Relativement satisfait → 7,5 • Ni satisfait ni mécontent → 5 • Relativement mécontent → 2,5 • Très mécontent → 0
Notes méthodologiques et commentaires	-	
Données	Nature des données	Nombre de réclamation Nombre de pièces livrées
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Moyen (1mois)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 86: Température des rejets

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Température des rejets (T)
	Sources citant l'indicateur	[LOI 2006, 2006] [BAURAING et al., 2000]
	Définition	Compare la température T des rejets à celle définie par l'arrêté du 30 juin 2006
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	Pas de calcul : mesure
	Unité de mesure	°C
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • Si T < 30: Conforme • Sinon: Non conforme
	Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Conforme →10 • Non conforme →0
	Notes méthodologiques et commentaires	-
Données	Nature des données	-
	Lien avec d'autres indicateurs	-
	Temps de retour	Rapide (1jour)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

Tableau 87: Valeur ajoutée

Indicateur	Libellé de l'indicateur	Valeur ajoutée (VA)
	Sources citant l'indicateur	[REYNE, 1991] [SESSI, 2007]
	Définition	Représente les bénéfices réalisés par l'entreprise
	Type	Quantitatif
	Méthode de calcul :	VA= CA-coûts
	Unité de mesure	%
	Valeurs de référence/ échelle	<ul style="list-style-type: none"> • <20% : Très Faible ; • <40% : Faible • 40% <VA<60%: Moyenne de PME du secteur • >60% : Fort
Sens et note	<ul style="list-style-type: none"> • Très Faible →0 • Faible →3,3 • Moyenne de PME du secteur →6,6 • Fort →10 	
Notes méthodologiques et commentaires	-	
Données	Nature des données	CA : chiffre d'affaires Coûts : coûts de production annuels
	Lien avec d'autres indicateurs	Productivité apparente du travail
	Temps de retour	Long (1an)
	Limites et Atouts	Outil de diagnostic et outil de suivi

ANNEXE 9 : MATRICE DES ÉVALUATIONS QUALITATIVES

Bonnes pratiques

Pratique	Description	Référence	Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxication	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
Contrôle et Optimisation du stockage des produits chimiques	Stockage des acides et cyanures séparément; des acides et alcalis séparément; agents inflammables et oxydants séparément et au sec;	BREF traitement de surfaces, 2005; [Muiras, 1995]; [Arrêté ministériel du 30/06/2006]; [galvaloire, 2009]	réduction des rejets imprévus en particulier ceux qui viennent de la lutte contre l'incendie	réduction des émanations en cas de rejet intempestif, réduire le risque de feu	évite les fuites	réduction du risque d'incendie, explosions		Réduction des accidents dus au mélange des produits chimiques et du risque incendie	Meilleure organisation des produits et donc du travail, sécurise l'accès aux produits	entretien plus aisé de l'installation	Influence la qualité de la production	diminue la nécessité de détoxication	économie de matière première, meilleure gestion des produits chimiques au moment de leur livraison, sécurise les lieux de stockage	confiance des clients accrue; aspect commercial (image)	Frais de construction des zones de stockage séparées et/ou confinées	évite la corrosion des tuyaux, systèmes d'alimentation...	meilleure gestion des produits chimiques au moment de leur livraison, personnel habilité
Mise en place de vannes et compteurs d'eau		[ARIST, 2004]; [Muiras, 1995]; [BREF, 2005]	Réduit les consommations d'eau jusqu'à 83%		réduction des débordements et donc de la contamination du sol							réduction des volumes à traiter, connaissance du flux spécifique	économie de matière première (eau)		diminution des coûts de consommation de l'eau (diminution facture d'eau) et de traitement, recouvrement rapide	sensibilisation du personnel	
contrôle du matériel de mesure	vérification périodique de la fiabilité du matériel de mesure	[laforest, 1999]; [Galvaloire, 2009]	conformité réglementaire	conformité réglementaire	conformité réglementaire				meilleure organisation de la maintenance	augmentation et optimisation de la maintenance	fiabilité des mesures des paramètres de production, diminution des dysfonctionnements	évite les rejets intempestifs liés à un matériel défectueux, amélioration de la détoxication		amélioration de la qualité de traitement	Coûts de vérification et de mise au norme du matériel;	augmentation de la productivité opérationnelle	
sensibilisation et formation du personnel à la bonne gestion de l'eau		[ARIST, 2004]	économie d'eau						meilleur esprit d'équipe			réduction du volume des effluents			diminution du coût de consommation d'eau et de traitement des effluents	sensibilisation du personnel	fédération du personnel autour d'un projet commun
Fermeture systématique des robinets	électrovannes?	[ARIST, 2004]; [Galvaloire, 2009]	Réduit les consommations d'eau		réduction des débordements et donc de la contamination du sol			risque d'inondation diminués		diminution de l'entretien dû aux débordements	bon	réduction du volume des effluents	économie de matière première (eau)		diminution du coût de consommation d'eau et de traitement des effluents		
Raclage des sols avant lavage		[ARIST, 2004]	économie d'eau							Nettoyage plus aisé		diminution de la charge et volume des effluents de nettoyage			diminution des coûts de traitement, augmentation du coût des déchets		
utilisation de jets haute pression pour le nettoyage des sols et matériels		[ARIST, 2004]	économie d'eau					éclaboussures		Rapidité et efficacité, améliore la propreté du matériel		diminution du volume des effluents, augmentation des salissures dans les effluents			consommation d'énergie faible et investissement faible, augmentation du coût de traitement car salissures		
Utilisation de personnel spécifique pour la manipulation des produits chimiques		[Muiras, 1995]	diminution du risque de pollution accidentelle	diminution du risque de pollution accidentelle	diminution du risque de pollution accidentelle	diminution du risque d'incident accident		Diminue les risques d'accidents/incidents			meilleure qualité du traitement?	diminution de la charge des effluents	moins de perte en produits chimiques, diminution du risque d'accident	Influence la qualité des traitements	coût de formation du personnel ou d'embauche de personnel qualifié, réduction du coût des produits chimiques		Nécessite du personnel formé
Gestion de l'alimentation électrique	l'alimentation entrante doit être gérée afin minimiser les pertes en énergie réactive	[BREF, 2005]									minimisation des pertes énergétiques				diminution des coûts dus aux pertes thermiques, économie d'échelle	nécessite une étude réalisée par des personnes qualifiées	
utilisation de systèmes de refroidissement fermés		[BREF, 2005]	économie d'eau					limite les infections de légionella		entretien du groupe froid nécessaire	Production mieux maîtrisée car maîtrise des températures de traitement			améliore la qualité des pièces car maîtrise du bain	consommation électrique accrue et importante pour la réfrigération, économie d'échelle, diminution du coût de consommation d'eau, réduction du coût d'entretien des systèmes ouverts		
Utilisation de produits chimiques compatibles	par exemple utiliser un même acide pour le décapage avant un traitement de dépôt à l'acide	[BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]	minimisation de l'utilisation de l'eau dans les étapes de rinçage intermédiaires	diminue le risque de réactions intempestives dégageant des gaz	diminue le risque de réaction intempestives provoquant un débordement			diminue le risque de réaction intempestives		exigences d'entretien de la solution ultérieure accrue	minimisation des pertes de produit chimique; réduction du nombre d'étapes de la gamme	permet le traitement séparé des effluents donc meilleure détoxication, diminution des problèmes liés au mélange de produits	besoin d'appoint en produit chimique	améliore la qualité de traitement des pièces	économie d'échelle,		

traitement au charbon actif si résine	technique d'adsorption qui peut être utilisée avant une filtration pour adsorber les produits de décomposition organique des bains de traitement	[BREF, 2005]	diminution de la consommation d'eau						entretien des colonnes	allongement de la durée de vie des bains, traitement non spécifique qui élimine la part active du bain	régénération du charbon actif possible ou éliminé en tant que déchet dangereux	consommation de matières première supplémentaire pour maintenir la qualité du bain car non sélectif		régénération du charbon actif coûteuse, énergie supplémentaire de pompage			
bacs de rétention	une fuite des systèmes hydraulique vers les sols peut être évitée grâce à l'utilisation de bacs de rétention	[BREF, 2005], [Arrêté, 2006], [galvaloire, 2009]	minimisation d'un rejet éventuel vers les eaux	diminue le risque de réactions intempestives dégageant des gaz	évit la contamination des sols provoquée par des débordements et fuites de produits	minimisation du risque de contamination des eaux de surface ou souterraine à usage AEP, diminution du mécontentement	meilleure image pour le client	amélioration de la sécurité des opérateurs grâce à la réduction des risques de chute	plus agréable de travailler dans des conditions de sécurité et de propreté	maintien des bacs vides, augmentation de l'entretien	avec des rétentions spécifiques amélioration de la détoxification par non mélange des eaux récupérées	évit de perdre du produit		investissement faible et frais de fonctionnement faible, diminution des coûts d'assurance et taxes pollueur payeur, augmentation du coût d'entretien			
contrôle des émissions atmosphériques	afin de maintenir les normes sanitaires professionnelles sur le lieu de travail, l'air peut être évacué par un système d'épuration (épurateurs et dévésiculateurs)	[BREF, 2005]	transfert de pollution vers le milieu aqueux car lavage des gaz	minimisation des émissions atmosphériques, conformité réglementaire		minimisation des nuisances notamment les odeurs)		minimisation des risques d'intoxication, conformité réglementaire	améliore les conditions de travail	minimisation des risques de corrosion de l'installation	accroissement de la quantité d'eau résiduaire et boues	nécessite plus de soude pour neutraliser les vapeurs acides		investissement faible, accroissement de la consommation énergétique, permet d'éviter la détérioration des installations par la corrosion, coût d'entretien			
Mise en place d'un SME	un SME est un outil dont disposent les exploitants pour répondre aux exigences de conception, construction, entretien, exploitation et mise à l'arrêt de manière systématique et démontrable	[BREF, 2005]	meilleure conformité réglementaire	meilleure conformité réglementaire	meilleure conformité réglementaire	amélioration des relations avec les groupes de pression pour la protection de l'environnement	renforcement du positionnement de l'entreprise sur le marché, meilleure image de l'entreprise	amélioration de la sécurité des opérateurs grâce à une gestion globale des risques	motivation accrue du personnel, formation du personnel	définition ou amélioration du programme d'entretien	performances environnementales améliorées, contrôle efficace des traitements, respect des procédures, maintien d'un niveau élevé de performances	favorise l'utilisation de matériaux biodégradables, ou recyclables,		dépense d'introduction du SME élevés (44000€/an pour les PME), économie d'échelle due à la diminution des dépenses énergétiques, réduction des coûts de responsabilité, d'assurance et de mise en conformité	bases solides pour la prise de décision, amélioration de la communication interne	nomination d'un responsable spécifique de gestion	
mise en place SQG	les systèmes de gestion de la qualité permettent la maîtrise de la qualité des traitements et diminuent à la fois les retraitements et la mise au rebut	[BREF, 2005]	réduit la consommation d'eau	réduction des vapeurs et brumes entraînant des problèmes liés à la qualité de l'air local	réduction de débordements corrosifs pour les sols, réduction des débordements polluants pour les eaux de surface et souterraines		confiance des clients accrue	réduction des vapeurs et brumes entraînant des problèmes liés à la santé et sécurité des opérateurs	motivation accrue du personnel, plus de rigueur au travail		accroissement du rendement de production	minimisation du traitement des eaux résiduaires, réduction des excès de capacité de l'installation	minimisation des pertes en matière première, réduction des intrants	meilleure qualité du traitement	réduction de l'énergie consommée, économie d'échelle sur les matières premières et l'élimination des déchets dangereux, coût d'expertise des cabinets extérieurs		formation du personnel
évaluation comparative des consommations d'eau	il s'agit de l'enregistrement systématique des intrants et des extrants pour les comparer régulièrement aux données antérieures	[BREF, 2005], [galvaloire, 2009]	réduit la consommation d'eau								réduction du débit	réduit les exigences de traitement des eaux résiduaires, empêche la dilution des effluents, réduit le flux de matériaux perdus		optimisation des coûts par suivi des consommations			
Optimisation/ Augmentation du temps d'égouttage des pièces	égouttage des supports des pièces au dessus du bain avant transfert au bain suivant	[laforest, 1999]; [ARIST, 2004]; [Muiras, 1995], [BREF, 2005], [galvaloire, 2009]	diminution de la consommation en eau		diminution des égouttages entre les bains		réduction de la capacité de production de la machine		minimisation des éclaboussures lors du transfert	vidanges espacées	diminution des pertes par entraînement, diminution de la pollution des bains de rinçage, réduction de la capacité de production de la machine car travail au cas par cas	réduction des effluents, diminution de la charge polluante à traiter	réduction des pertes en produits chimiques, diminution de la consommation de MP	Peut affecter la qualité de la surface traitée	économie d'échelle dans l'utilisation de produits chimiques et réduction du coût de traitement des eaux, diminution du coût des MP	réduction de la capacité de production de la machine	harmonisation de la durée d'égouttage qui ne dépend plus de l'opérateur
Couverture des bains lorsqu'ils ne sont pas utilisés ou boules de plastique	Couvrir le bain permet de limiter les pertes thermiques et par évaporation, et donc diminue l'énergie nécessaire au maintien du bain à température	[ARIST, 2004]; [BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]	Réduit la consommation d'eau due au réajustement des bains	Réduit les pertes par évaporation et aérosols, et émissions fugaces		réduit les risques d'émission gazeuses toxiques		Diminue la toxicité des atmosphères de travail, diminution du NGR			blocage des tuyaux et pompes par les sphères; contrôle de la qualité de traitement, permet de maintenir le bain à la bonne température	limite la nécessité de traitement des effluents gazeux	diminution de la consommation de matière première car diminution des pertes	influence positivement la qualité des pièces	économie d'énergie; faible coût des sphères; économie d'échelle, diminution du coût des MP, diminution de la consommation électrique	installation de grilles de garde devant la tuyauterie, compliqué à mettre en œuvre	
Minimisation de l'entraînement	Positionnement différent des pièces ou des supports, choix de supports moins entraînant	[Muiras, 1995]; [BREF, 2005]	minimisation de la consommation d'eau		minimisation du risque de pollution des sols par les égouttages			minimisation des éclaboussures lors du déplacement des pièces par les automates	travail plus fastidieux		réduction de l'entraînement, moins de rinçages	diminution du flux de pollution	minimisation des pertes de produit chimique car diminution de la remise à niveau des bains	meilleure qualité des pièces car maîtrise du bain	diminution du coût des matières premières, de l'eau consommée et de traitement des eaux résiduelles		formation du personnel

Gabarit de montage	Mise en place de gabarits de montage adéquats cablés en fils de cuivre	[BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]	diminution de la consommation d'eau						facteur de travail élevé	limite la contamination du bain de traitement par les substrats et donc réduit l'entretien	minimisation de l'entraînement, prévention de la perte des pièces	diminution du volume des effluents		meilleure qualité du traitement	gain économique car minimisation des pertes de matériaux mais achat de matériel adéquat		nécessite une main d'œuvre qualifiée
Soufflage de la solution en excès dans les tonneaux	L'entraînement peut être réduit considérablement par le soufflage de la solution en excès dans les tonneaux ou mise en rotation du tonneau	[BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]	minimisation de la consommation d'eau	projections de gouttelettes et d'aérosols	projections de gouttelettes et d'aérosols d'où risque de contamination des sols			projection de gouttelettes et d'aérosols dans l'atmosphère: augmentation du risque d'intoxication			réduction de l'entraînement, moins de rinçage, contamination des autres traitements par aspersion	diminution du flux de pollution	minimisation des pertes de produit chimique	Amélioration de la qualité des pièces	diminution du coût des matières premières et de traitement des eaux résiduelles, consommation d'énergie des compresseurs d'air de soufflage	techniquement compliqué à mettre en œuvre	formation du personnel
Gestion des nuisances sonores	mise en place de dispositifs anti-bruit et fermeture des portes de service	[BREF, 2005]						réduction du bruit		diminution des problèmes de santé liés au bruit	réduction du bruit, présentéisme				accroissement de la consommation énergétique et des coûts de ventilation car les portes sont fermées		

Meilleur contrôle des procédés

Pratique	Description	Référence	Eau	Air	Soil	Population	Clients	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxication	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
optimisation de l'efficacité des rinçages	mise en place de rinçages dynamiques multiples en série cascade	[Muiras, 1995]; [galvaloire, 2009]	réduit la consommation d'eau							Nécessite plus d'entretien	Qualité de rinçage égale optimale	diminution du volume et de la concentration des effluents, optimisation de la détoxication		qualité de rinçage égale	réduction du coût de consommation d'eau et de MP et de traitement des effluents	Augmentation de la productivité	
Contrôle et suivi régulier des paramètres de qualité des rinçages	ajustement des débits, Rd, e	[Muiras, 1995]	réduction de la consommation d'eau								Amélioration de la qualité de rinçage des pièces	ne sont traitées que les eaux ne satisfaisant plus au critère de qualité		qualité de rinçage égale	réduction du coût de consommation d'eau et de traitement des effluents	Augmentation de la productivité	
mise en place d'appareils de mesure	pH, rH	[Laforest, 1999]	conformité réglementaire	conformité réglementaire	conformité réglementaire					optimisation de la fréquence d'entretien des bains	Amélioration de la qualité de rinçage des pièces	conformité réglementaire	économie de matière première et d'énergie		économie d'échelle	Augmentation de la productivité	
montage statique pour les chaînes manuelles ou semi automatiques	un montage statique au dessus du bain précédent sert de support aux tonneaux et permet un temps d'égouttage approprié	[BREF, 2005]	diminution de la consommation d'eau		diminution du risque de pollution des sols due à la chute d'un tonneau			Meilleure santé et sécurité du personnel qui ne porte plus de lourds tonneaux	diminution de la pénibilité du travail: présentéisme		égouttage chronométré de manière appropriée, permet les rinçages par pulvérisation	diminution de l'entraînement, et donc de la charge des effluents	économie de matière première et d'énergie		peu coûteux et facile à installer, diminution des coûts de traitement des effluents	Augmentation de la productivité	
Contrôle et suivi régulier des bains	Un suivi régulier des bains par des analyses programmées conduisant à des réajustements adaptés	[Muiras, 1995]; [BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]	réduction de la consommation d'eau						travail plus régulier	Nécessite moins d'entretien	Augmente la durée de vie du bain, maintien d'une composition constante, diminue la durée de traitement et évite le retraitement	diminution des émissions	réduction de la sur-utilisation de produits causée par des ajouts non contrôlés, régularise les flux d'approvisionnement	améliore la qualité du traitement, diminue les durées de traitement	amélioration du rendement de l'installation, diminution du coût des pannes et du retraitement	améliore la cohérence du traitement et la performance de l'entreprise, flux de production constant, image positive	nécessite une compétence technique interne à l'entreprise
Elimination des programmes systématiques de vidange des bains	Le remplacement du bain ne doit se faire que lorsque la teneur en substances indésirables a atteint un niveau inacceptable au regard de la qualité de production désirée	[Muiras, 1995]	Réduction de la consommation d'eau		réduction du risque de contamination des sols lors des vidanges				impact sur la fréquence des vidanges		diminution des temps de non production pour la vidange, augmentation de la durée de vie du bain	Diminution des volumes d'effluents à traiter	économie d'eau et de matières premières	qualité influencée par la contamination des bains	économie d'échelle due à la diminution du coût des MP		

Mise en place de procédures écrites de réalisation et de maintien des bains	mise en place de procédures écrites respectées (je fais ce que j'écris, j'écris ce que je fais)	[Muiras, 1995]	réduction de la consommation d'eau et du risque de pollution	réduction du risque de pollution accidentelle	réduction du risque de pollution accidentelle	réduction du risque de pollution accidentelle		Réduit les causes d'incident	Amélioration	optimisation / maîtrise de la maintenance	Réduction des gaspillages		économie de matière première	Réduit les causes de mauvaise qualité	diminution du coût des MP	Améliore les processus internes	Améliore la productivité
détermination des surfaces traitées	estimation hebdomadaire, mensuelle du nombre de m2 de surface traitée	[ifets, 2008]	conformité réglementaire								suivi de la production	nécessaire pour la déclaration annuelle de consommation spécifique	permet d'améliorer la gestion des stocks (ratio S/produits)		permet de connaître exactement les consommations pour le suivi du ration S/produits	utilisation de l'équipement	
prolongement de la durée de vie des bains	élimination des particules indésirables du bain	[ifets, 2008]; [BREF, 2005]	diminue la consommation et la pollution des eaux		diminution du risque de pollution des sols			diminution des opérations de vidange des cuves		entretien constant	diminue la fréquence de vidange des bains	diminution du volume des effluents	diminution de la consommation en produits chimiques	meilleure qualité des produits	économie d'échelle, augmentation de la rentabilité		planification nécessaire des vidanges
gestion des vidanges des bains usés		[ifets, 2008]	diminution des risques de pollution des eaux	diminution des risques de pollution	diminution des risques de pollution des sols	diminution des risques de pollution et d'accidents		diminution des risques pour la santé et sécurité des employés	demande d'être minutieux	permet de vérifier l'état des cuves	diminue les temps d'arrêt de la production	optimisation de la détoxification: des flux à traiter	meilleure gestion des produits chimiques de détoxification	meilleure qualité des produits	diminution des coûts liés au traitement de la pollution aqueuse		planification nécessaire des vidanges
récupération des eaux de rinçage concentrées dans les bains de traitement	les bains de rinçages peuvent compenser en partie les pertes par entraînement des bains de traitement	[ifets, 2008]; [ARIST, 2004]; [Muiras, 1995]; [BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]	Réduit les consommations d'eau							augmentation de la maintenance pour le passage d'un bain à l'autre	accroissement de la récupération des pertes par entraînement,	diminution du volume et de la concentration des effluents à traiter	économie de produits chimiques		Avantageux sur le plan financier car diminution de la consommation d'eau et de matières premières, incidence positive		main d'oeuvre pour remonter le bain
Ajout d'agents mouillants	L'ajout d'agents mouillants à la solution de traitement permet de réduire la perte par entraînement en réduisant la tension superficielle	[ARIST, 2004]; [BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]	économies d'eau							augmentation de l'entretien des bains	diminution du volume entraîné; réduction des pertes en produit chimique	diminution de la charge des flux traités, perturbation de la STEP due aux tensio-actifs	accroît le nombre de produits chimiques utilisés	Amélioration de la qualité des pièces	réduction des coûts de traitement des eaux résiduées, augmentation du coût des bains du aux MP(T.A)		
Mise en place d'horloges de contrôle des rinçages	permet de stopper l'alimentation en eau quand la phase de traitement est en attente	[Muiras, 1995]; [galvaloire, 2009]	économies d'eau									diminution du volume des effluents			économie d'échelle due à la diminution du coût des MP		
Réduction de la durée de stockage	optimisation de la durée de stockage des pièces dans l'atelier après traitement	[BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]					amélioration de la relation client/fournisseur				Prévention des opérations de décapage et de retraitement			Prévient la corrosion	Coûts de stockage et de production réduits	Bonne planification de la production	Main d'oeuvre pour la planification et supervision de la production
Agitation des solutions de traitement par air	L'agitation des bains est souvent indispensable et peut se réaliser par de l'air comprimé	[BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]	la compensation nécessaire des bains augmente la consommation d'eau	aggravation des jets, brumes, vapeurs de particules en suspension dans l'air		Nuisance sonore due aux compresseurs d'air		aggravation des jets, brumes, vapeurs de particules en suspension dans l'air	Nuisance sonore due aux compresseurs d'air	évite le dépôt des composants actifs du bain	concentration constante et homogène dans la cuve de traitement			limite la corrosion et meilleure qualité et répartition des dépôts	pertes thermiques par évaporation importantes, consommation énergétique forte	nécessite la mise en place d'aspirateurs	
entretien des redresseurs		[BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]	consommation accrue d'eau pour le réajustement des bains					diminution risques	diminue le risque de chômage technique		indispensable à la production	concentration plus élevée donc plus de pertes par entraînement			économie d'alimentation en courant continu de 10 à 20%, coûts d'entretien moindres		planification
optimisation du rendement électrique des traitements	ajouts de composés chimiques conducteurs pour accroître la conductivité	[BREF, 2005]									bon rendement	impact des composés chimiques en station	augmentation des matières premières utilisées		réduction de la consommation d'énergie électrique, augmentation du coût des produits chimiques		
Augmentation de la température de traitement	la perte par entraînement peut être réduite en élevant la température de la solution de traitement pour en abaisser la viscosité	[BREF, 2005]	augmentation de la consommation d'eau	plus d'évaporation des bains				plus d'évaporation des bains		réajustement plus fréquent	diminution du volume entraîné, Attention à la sensibilité des azurants à la température	diminution / augmentation des flux traités?		réduction des pertes en matière première	consommation d'énergie supplémentaire		

identification des flux problématiques	des changements de sources ou de types de produits chimiques de traitement peuvent générer des problèmes de traitement des eaux résiduaires. Ces derniers peuvent être testés avant d'être introduits dans la production	[BREF, 2005]						réduction des réaction intempestives						cohérence des traitements des eaux résiduaires, évite les problèmes de mélange		coûts réduits, économie d'échelle grâce à la résolution des problèmes de traitement des eaux résiduaires	nécessite une étude préalable	
élimination ou séparation des polluants individuels à la source	certaines produits chimiques sont gérés de manière plus efficace lorsqu'ils sont traité séparément avant d'être mélangés aux autres effluents	[BREF, 2005]	évitte les évacuations massives dépassant la capacité de traitement de l'installation et violant les conditions du permis					diminution des émanations dues au mélange de produits						traitement plus efficace, évite les évacuations massives dépassant la capacité de traitement de l'installation et violant les conditions du permis	économie de produits chimiques car la neutralisation des solution acides résiduaire se fait avec les solutions alcalines résiduaires	cout de traitement en flux séparés en général plus élevé, temps de retour sur investissement long		
Mise en place d'un système de ventilation	Permet le contrôle de l'humidité, de la température, et de l'acidité de l'atmosphère pour limiter la vitesse de corrosion des matériaux	[BREF, 2005]; [galvaloire, 2009]	diminution de la consommation d'eau car moins de retraitement dû à une atmosphère corrosive	traitement de l'air avant rejet nécessaire			image positive car atelier plus propre	diminue la toxicité de l'air ambiant	augmentation du confort des opérateurs, bruit, odeurs?	entretien constant	réduction du décapage et du retraitement		lavage des gaz: transfert de pollution		prévention de la corrosion	consommation d'énergie pour la ventilation et déshumidification; gain économique sur le décapage et retraitement		
Chromage à Froid	La température du bain de traitement CrVI est maintenue à 18° par un système réfrigérant, et réduction de la concentration de 50%	[BREF, 2005]	réduction de la consommation d'eau	minimisation de l'évaporation de la solution	mauvaise image du chrome VI	mauvaise image du chrome VI	minimisation de l'évaporation de la solution, réduction de l'exposition des employés, mais tjs CrVI				les solutions concentrées nécessitent une durée plus longue de traitement	réduction des rejets en CrVI et minimisation de la production de boues		les solutions concentrées nécessitent une durée plus longue de traitement, meilleure qualité: pas d'apparition de rebord blanc	réduction de la quantité d'énergie nécessaire au traitement,		augmentation du temps de traitement	

Remplacement d'intrant

Pratique	Description	Référence	Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxification	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
Substitution des couches de conversion/passivation au chrome (VI) par des revêtements de conversion au chrome (III)	La formulation au chrome VI est remplacée par une formulation au chrome III, la substitution du chrome VI étant préconisé par la réglementation	[BREF, 2005]; [SFTS, 2007]	Réduction de la toxicité sur l'environnement	réduction des exigences de traitement de la pollution atmosphérique; diminution de l'acide chromique dans l'air ambiant de l'atelier et à l'extérieur	diminution du risque de contamination des sols par du CrVI	Réduction de la toxicité sur l'environnement	image améliorée de l'entreprise	Réduction de la toxicité sur le lieu de travail; Diminution de l'acide chromique dans l'air ambiant de l'atelier, très bon		suivi plus draconien	Température de traitement plus élevée; concentration en CrIII dix fois supérieure à celle de la conversion en CrVI, d'où entraînement plus important	Réduction des quantités de Cr (VI) dans les eaux résiduaires; Les agents complexants ont un effet négatif sur l'installation de traitement des eaux, diminution du flux de pollution	Quantité de matière première plus importante	Protection contre la corrosion similaire; Diminution de la satisfaction des clients vis-à-vis de la couleur verdâtre remplaçant le jaune gênante	diminution des coûts d'assurance destinées à couvrir la santé du personnel, consommation accrue d'énergie pour le chauffage des bains, diminution des coûts de la STEP, coûte globalement plus cher	-	

Substitution du chromage hexavalent par le chromage trivalent à base de chlorures	Cr(VI) est le métal le plus largement utilisé mais les inquiétudes concernant sa toxicité et son utilisation vont grandissantes. L'alternative la plus largement utilisée est le Cr(III)	[BREF, 2005]	Réduction de la toxicité sur l'environnement	réduction des exigences de traitement de la pollution atmosphérique	diminution du risque de contamination des sols par du CrVI	Réduction de la toxicité sur l'environnement, meilleure image de l'entreprise	meilleure image de l'entreprise	réduction des risques liés à la santé dus à la diminution de l'acide chromique dans l'air ambiant de l'atelier		problème de suivi des bains	problèmes provoqués par des agents complexants dans des installations de traitement résiduaires, taux de rejets réduit, taux de production des boues réduit	aucun agent chimique pour réduire le CrVI, un agent de surface nécessaire pour réduire les métaux	résistance de corrosion inférieure, teinte des pièces différente pouvant ne pas satisfaire le client	diminution des coûts d'assurance couvrant la santé du personnel, réduction des dépenses liées à la suppression des aérosols, l'extraction de l'air, la surveillance des émissions, diminution des coûts de la STEP, coût très élevé		formation du personnel
rinçage chimique ou procédé de lancy	la solution de traitement perdue par entraînement réagit chimiquement avec le liquide de rinçage	[BREF, 2005]	économie d'eau de rinçage	nécessité d'extraction d'air et de traitement				émanations d'AOX; danger de formation de gaz toxiques			impossibilité de récupération de la solution perdue par entraînement; réduit le nombre de rinçage; dépôt de boues dans les réservoirs de rinçage		effet sur la qualité des pièces			fonctionnement technique simple
substitution dégraissages aux solvants chlorés par dégraissage aqueux ou solvants pétroliers	les acides et les alcalis remplacent les solvants dont l'utilisation était nocive pour les humains et l'environnement	[Muiras, 1995]; [BREF, 2005]; [Wéry, 1998]	les solvants pétroliers présentent peu de risques pour l'environnement, les terpènes sont biodégradables	diminution des émissions de COV	utilisation plus grande du sol	image positive sur la non utilisation de solvants chlorés		lessives alcalines moins toxiques pour l'homme que les chlorés, point éclair bas des terpéniques	gêne occasionnée par l'odeur des produits terpéniques	suivi des bains de dégraissage aqueux plus important	les produits terpéniques sont très satisfaisants, les solvants pétroliers sont peu performants, les lessives alcalines moyennement performantes		moins bonne qualité de dégraissage			diminue la productivité
substitution des formulations de bain de zincage cyanuré en bain de zincage alcalin	le zincage électrolytique a été l'une des sources majeures d'utilisation du cyanure dans le secteur. Son remplacement est fortement conseillé	[Muiras, 1995]; [BREF, 2005]	diminution des risques d'accidents environnementaux car aucune utilisation de cyanures	extraction d'air importante	diminution des risques de contamination des sols	diminution des risques d'accidents environnementaux, image positive de l'entreprise	image publique sur l'utilisation du cyanure, installation plus conforme aux normes de qualité environnementales	diminution des risques de santé et de sécurité liés aux dégagements cyanurés		niveau d'entretien accru	réduction de l'utilisation et de l'émission de cyanures; réduction d'AOX; rendement des bains de zinc alcalins meilleurs (70 à 85% d'efficacité)	production supplémentaire de déchets (agent complexant), réduction des exigences de traitement des eaux résiduaires	meilleure répartition de l'épaisseur du revêtement	consommation de courant doublée par rapport aux bains cyanurés, accroissement des coûts	nécessite un dégraissage de haute qualité	niveau de compétence accrue
substitution des formulations de bain de zincage cyanuré en bain de zincage acide	le zincage électrolytique a été l'une des sources majeures d'utilisation du cyanure dans le secteur. Son remplacement est fortement conseillé	[BREF, 2005]	diminution des risques d'accidents environnementaux car aucune utilisation de cyanures, diminution de la toxicité	pas de risques de dégagements cyanurés	diminution des risques de contamination des sols	amélioration de l'image publique sur l'utilisation du cyanure, diminution du risque environnemental	image publique sur l'utilisation du cyanure, installation plus conforme aux normes de qualité environnementales	diminution des risques de santé et de sécurité liés aux dégagements cyanurés, diminution de la toxicité		niveau d'entretien accru	rendement en courant élevé approchant les 95%,	production supplémentaire de déchets (agent complexant), réduction des exigences de traitement des eaux résiduaires, nécessite une extraction des fumées,	répartition de l'épaisseur du métal d'un niveau médiocre à acceptable	économies importantes en matière de consommation énergétique, investissement dans un extracteur d'air	nécessite un dégraissage de haute qualité,	
substitution des formulation de cadmium	par du zinc	[Muiras, 1995]	diminution des risques d'accidents environnementaux car aucune utilisation de cadmium, diminution de la toxicité	diminution des risques d'accidents environnementaux car aucune utilisation de cadmium	diminution des risques d'accidents environnementaux car aucune utilisation de cadmium	diminution des risques d'accidents environnementaux car aucune utilisation de cadmium		diminution du risque d'intoxication des opérateurs				diminution des étapes de détotoxication, conformité réglementaire		diminution des coûts de non-conformité réglementaire, de traitement des eaux en STEP, et d'assurance pour la santé des opérateurs		
remplacement des substances complexantes (EDTA)	les agents chélatants peuvent être remplacé par des agents plus faibles et biodégradables tels que les produits à base d'acide gluconique	[BREF, 2005]									plus rapide que les phosphatation	détotoxication plus aisée et optimisée, réduit l'énergie et les produits nécessaires à la destruction de l'EDTA		diminution des coûts de la STEP		

Substitution des phosphatations par l'Oxilan	Procédé de substitution des phosphatations au fer ou zinc basé sur une conversion nanométrique organo-métallique,	[Chemetall, 2007]; [Garnier, 2007]	économie d'eau; suppression de l'utilisation de phosphates		diminue la surface au sol nécessaire			non toxique, non allergisant, non cancérigène, non corrosif, non explosif, non oxydant, non mutagène			performance du procédé supérieure à une phosphatation classique; Ne nécessite ni activateur ni post-traitement	Ne produit pas de boues: diminution des déchets; simplicité du traitement (chaux)		améliore l'adhérence du revêtement et la protection anti-corrosion	investissement et consommation énergétique minimisée car utilisés à T ambiante	meilleure efficacité car temps de traitement plus court ce qui augmente la productivité	niveau de compétence accrue
Modification de l'emballage	Utilisation d'emballages absorbants ou anti-corrosion recyclables	[BREF, 2005]					amélioration de la relation client fournisseur				réduction du décapage et du retraitement	diminution des effluents dus au retraitement des pièces corrodées	consommation accrue de matière première	Limite la corrosion et les dégâts liés au transport	gain économique provenant du retraitement		
substitution des anodes solubles par des anodes insolubles	l'oxydation des anodes dans le bain conduit à l'accroissement de la concentration d'ions métalliques	[BREF, 2005]									diminution des retraits dus à des revêtement métalliques en excès, économie en matériaux, uniformité du traitement dans le temps	diminution des déchets métalliques et des apports par entraînement	réduction du dépôt sur l'épaisseur spécifique requise	diminution de l'utilisation de l'énergie; équipement supplémentaire; réduction des coûts des consommables	meilleure performance		
Chromage à Froid	La température du bain de traitement CrVI est maintenue à 18° par un système réfrigérant, et réduction de la concentration de 50%	[BREF, 2005]	réduction de la consommation d'eau	minimisation de l'évaporation de la solution	mauvaise image du chrome VI	mauvaise image du chrome VI	minimisation de l'évaporation de la solution, réduction de l'exposition des employés, mais tjs CrVI				les solutions concentrées nécessitent une durée plus longue de traitement	réduction des rejets en CrVI, et minimisation de la production de boues		les solutions concentrées nécessitent une durée plus longue de traitement, meilleure qualité: pas d'apparition de rebord blanc	réduction de la quantité d'énergie nécessaire au traitement,		augmentation du temps de traitement

Modification de procédés

Pratique	Description	Référence	Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxication	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
Rinçage éco	Rinçage statique dans lequel les pièces sont immergées en amont et en aval du traitement afin de diminuer la concentration des entraînements	[Laforest, 1999]; [BREF, 2005]	pas d'apport d'eau, diminution de la consommation d'eau		nécessite de la surface supplémentaire au sol car rajout d'un bain					vidange très rares; extension de la durée de vie des baigns de traitement	Diminution de moitié de la concentration des entraînements; réduction des débits des rinçages suivants	Réduction du flux de pollution;	réduction de l'utilisation de produits chimiques dans les baigns de traitement	amélioration de la qualité du traitement mais attention aux problèmes d'adhérence due à un traitement partiel	réduction du coût des matières premières nécessaires, réduction de la consommation d'eau	réduction de la capacité de production de la machine dû à l'accroissement du nombre d'étapes	
Rinçage courant simple ou multiple en parallèle	Il est composé d'une ou plusieurs cuves alimentées en continu par un courant d'eau fraîche	[Laforest, 1999]	Grande consommation d'eau par rapport à un rinçage cascade		nécessite de la surface supplémentaire au sol car rajout d'un bain						pour une même efficacité de rinçage, il demande un débit n fois supérieur à celui du rinçage cascade	grande quantité d'effluents, problème de conformité réglementaire en terme de consommation spécifique			coûts de traitement des eaux résiduaires et de consommation d'eau important	performance moindre par rapport à un rinçage cascade	
Rinçage de compensation	Rinçage statique placé à la suite d'un bain de traitement chaud, qui sert à compenser les pertes par évaporation de ce dernier	[Laforest, 1999]; [BREF, 2005]	réduction de la consommation d'eau							augmentation de l'entretien pour compensation	accroissement de la récupération des pertes par entraînement,	diminution des flux à traiter			économie d'échelle dus à la diminution des coûts de MP et d'eau		
Rinçage cascade contre-courant ou courant multiple série	La pièce circule à contre courant par rapport à l'eau; celle-ci partant de la dernière cuve pour finir en cascade dans la première	[Laforest, 1999]; [BREF, 2005]	économie d'eau important jusqu'à 40%		nécessite de la surface supplémentaire au sol car rajout d'un bain						obtention d'un petit débit concentré qui peut être réintroduit dans les baigns de traitement (compensation)	diminution des eaux résiduaires jusqu'à 90%		très bonne efficacité de rinçage	augmentation des investissements, mais réduction des coûts totaux et de consommation d'eau	meilleure performance par rapport à un rinçage simple	
Rinçage par aspersion ou pulvérisation	l'eau de rinçage est pulvérisée sur les pièces de fabrication tandis qu'elles sont suspendues soit au dessus des baigns, soit au dessus d'un réservoir séparé	[Laforest, 1999]; [BREF, 2005]; [Muiras, 1995]; [Agence de l'eau, 2008]	économie très importante par rapport à un rinçage classique	risque de formation d'aérosols				formation d'aérosols, risque d'infection de légionella	risque d'infection du système de pulvérisation par la légionella donc nettoyage régulier	rinçage efficace; compensation des baigns de traitement chauds; mise en œuvre difficile (pièces planes uniquement);	diminution des débits/flux traités car diminution de l'entraînement, diminution des produits chimiques de neutralisation ou pour modifier le pH		Qualité de rinçage accrue mais risque d'apparition de résidus sur les pièces	très économique en consommation d'eau			
Remplacement des tonneaux par des cadres		[BREF Traitement de surface, 2005]	diminution de la consommation d'eau pour compenser l'entraînement		diminution du risque de pollutions liées aux égoutures						diminution de l'entraînement,	diminution du flux à traiter	recharge des baigns moins importante, diminution de la consommation de matière	pièces moins abîmées en portant que en tonneau s'il s'agit de la même pièce	économie d'échelle sur les matières premières, réactifs, eau		fabrication de portants spécifiques
mise en place d'un rouleau essoreur	les solutions, et eaux de rinçage sont éliminées grâce à des rouleaux essoreurs avant de quitter chaque section de production	[BREF, 2005]	réduction significative de la consommation d'eau								efficacité	réduction du volume d'eaux résiduaires, des produits de traitement et des boues	réduction significative de la consommation de matières premières	investissement initial faible et coûts de fonctionnement modérés			

Valorisation

Pratique	Description	Référence	Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxification	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation	
Electrolyse	Elle permet la réduction ou l'oxydation d'espèces chimiques. Pour cela un courant passe à travers la cathode et l'anode insoluble; la cathode est recouverte du métal contenu initialement dans l'électrolyte qui se dépose par réduction. A l'anode on observe la destruction des anions par oxydation	[Laforest, 1999]; [Jifets, 2008]; [Muiras, 1995]; [BREF, 2005]	Economie sur la consommation d'eau; rejets conformes aux seuils, récupération du cadmium ou métaux précieux; destruction par oxydation anodique du cyanure	Attention à la création de Dihydrogène		peut produire des mélanges explosifs de Dioxygène et de Dihydrogène, destruction du cyanure		peut produire des mélanges explosifs de Dioxygène et de Dihydrogène, destruction du cyanure			très peu d'entretien si électrode	extraction des métaux nobles dissous qui peuvent être réutilisés ou revendus, augmentation de la durée de vie des rinçages, vieillissement du rinçage possible dû à la concentration d'impuretés	moins de métaux dissous à traiter; Réduction des quantités de réactifs nécessaires; Réduction du volume des boues	pas de stockage de produits chimique, échange avec le fournisseur	Qualité	Coût d'exploitation faible 300€/an; économie sur le transport et mise en décharge des boues, réduction du retraitement des pièces, économie d'échelle sur les matériaux	contrôle du traitement	
Electro-floculation, électro-coagulation	Coagulation ou floculation des polluants grâce à une électrolyse à anode métallique consommable, en aluminium ou en fer	[Laforest, 1999]; [SHTS, 1998]; [Muiras, 1995]	Diminution des métaux lourds, des MES, et de la DCO; conformité des rejets aqueux					Evite la manipulation et l'utilisation de plusieurs réactifs		électrodes		Réduction du volume de boues produites, de la DCO, MES et métaux lourds, moins de dysfonctionnement de la station, Cassage des émulsion	consommation d'anodes solubles		Coût d'exploitation souvent plus faibles que ceux d'une station classique, diminution du coût de transport des déchets; augmentation du coût énergétique			
Electrodialyse	sous l'action d'un champ électrique continu, et par migration au travers de membranes échangeuses d'ions sélectives, les espèces contenues dans une solution aqueuse sont concentrées ou diluées dans différents compartiments	[Laforest, 1999]; [Jifets, 2008]; [ARIST, 2004]; [Muiras, 1995]; [BREF, 2005]	diminution de la consommation d'eau; meilleur respect de la réglementation des eaux de rejet							colmatage des membranes, entretien fastidieux,	amélioration de la qualité des traitements; concentrat envoyé dans les baignoires de traitement et diluât au rinçage; limitation du nombre de rinçages et de leur débit;	L'accroissement de la récupération des pertes par entraînement limite les rejets d'effluents, réduction de la production de déchets	réduction de la consommation en sels	Qualité du dépôt non modifié	Coûts d'investissement élevés, économie d'apport de matière première, investissement dans un chauffage de secours, allongement de la durée de vie du bain			
electrolyse compartimentée	Cette technique exploite les réactions d'oxydo-réduction aux électrode. La migration des ions sous l'influence du champ électrique n'est pas sélective	[Laforest, 1999]; [Muiras, 1995]	diminution de la consommation d'eau; meilleur respect de la réglementation des eaux de rejet							colmatage des membranes, entretien fastidieux,	épuration des baignoires	réduction de la quantité de boues produites		Qualité du dépôt non modifié	récupération sélective des métaux			
electro-electrodialyse	Cette technique exploite les réactions d'oxydo-réduction aux électrode. La migration des ions sous l'influence du champ électrique est sélective: seuls les cations ou anions peuvent migrer selon la nature de la membrane,	[Laforest, 1999]; [Muiras, 1995]	diminution de la consommation d'eau							colmatage des membranes	régénération des réactifs des baignoires, diminution du volume des rinçages, élimination des produits parasites,	diminution du volume des effluents, réduction du volume des boues, déchets plus concentrés	sous produits réutilisables dans l'atelier	Qualité du dépôt non modifié	coût d'investissement élevés, mise en place d'un rinçage statique			
Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration	Séparation qui repose sur les propriétés de rétention sélective vis-à-vis des molécules du fluide à traiter, l'action des membranes diffère selon la taille des pores la constituant,	[Laforest, 1999]; [Jifets, 2008]; [Muiras, 1995]; [Raffin, 2007]; [ARIST, 2004]; [BREF, 2005]; [Wéry, 1998]	diminution de la consommation d'eau, économie d'eau si recyclage, les baignoires sont moins fréquemment rejetés				amélioration de l'image de marque de la société			fréquence de remplacement des membranes important, décolmatage fréquent, réduction de la fréquence de remplacement des baignoires	procédés efficaces, Augmentation de la durée de vie des baignoires de dégraissage et maintien de sa qualité, réduction de la fréquence des vidanges; diminution de la consommation d'énergie	réduction de 80% de dco dirigée vers la station, traitement de la dco sans ajout de produits chimiques, réduction du volume des rejets, concentration des déchets	rajout de tensio-actifs et nécessité de produits supplémentaires pour la régénération	Amélioration de la qualité des produits, évite le retraitement des pièces	coût d'investissement importants de 40000 à 200000€, économie sur les consommables; retour sur investissement rapide (<1 an), récupération du cuivre piégé dans le concentrat, diminution des frais de transport et d'élimination des déchets, consommation d'énergie pour le pompage	gain de productivité	peu gourmande en main d'œuvre, technique utilisant peu d'espace, souplesse d'utilisation	

Résines échangeuses d'ions	Basé sur un échange entre les ions adsorbés sur un solide et ceux de même charge présents en solution	[Laforest, 1999]; [BREF, 2005]; [Ifets, 2008]; [ARIST, 2004]; [Muiras, 1995]; [Galvaloire, 2009]	réduction de la consommation d'eau, conformité des rejets aqueux							Prolonge la vie des bains d'où une diminution des fréquences de vidange, dégradation des résines par les matières organiques; décolmatage et régénération fréquents (tous les 10 jours)	recyclage de l'eau; régénération des produits chimiques; n'élimine pas les matières organiques, technique qui s'intègre facilement à la production, récupération de métaux	concentration des métaux lourds dans les déchets; diminution des volumes rejetés; augmentation de la toxicité des déchets, pas de chrome dans les effluents	augmentation de la consommation de matière première car les résines adsorbent les ions	qualité des pièces	investissement faible ou onéreux selon le bref, consommation d'énergie, la régénération des résines nécessite des produits chimiques, entretien tous les 4 à 5 ans		
Résines adsorbantes	Ces résines fixent les acides minéraux en éliminant les sels métalliques. Ces acides sont récupérés lors de la désorption	[Laforest, 1999]	réduction de la consommation d'eau, conformité des rejets aqueux							Prolonge la vie des bains d'où une diminution des fréquences de vidange, dégradation des résines par les matières organiques; décolmatage et régénération fréquents (tous les 10 jours)	Diminution de la consommation en acide; Composition des bains constante;	Flux de métaux inchangé					
Centrifugation	Séparation physique forcée des mélanges non miscibles: Utilise la force centrifuge pour séparer les phases de densité différente	[Laforest, 1999]; [Muiras, 1995]; [BREF, 2005]; [Wéry, 1998]	rejets vers le milieu naturel qui n'existaient pas avant car les bains étaient totalement détruits, réduction de la consommation d'eau	réduction de la consommation d'eau; rejets vers le milieu naturel qui n'existaient pas quand les bains étaient totalement détruits	utilisation en espace confiné nécessaire car nuisance sonore				utilisation en espace confiné nécessaire car nuisance sonore	Nécessite une maintenance périodique plus importante mais diminue la fréquence des vidanges	Augmente en moyenne par 6 la durée de vie des bains, maintien constante la concentration des bains de dégraissage, élimination de 98% des huiles, perturbe moins les bains suivants (rinçage ou dégraissage phosphatant)	Réduit considérablement la DCO amenée par la phase huileuse, réduction de la quantité des déchets qui sont très concentrés en huile (>95%), pertes par entraînement souvent réduites	diminue la consommation en matière première pour le remplacement des bains usagés (épuraton des bains >98%) et de la consommation d'eau, Rajout de tensio-actifs nécessaire	améliore la qualité du traitement, production élevée	Coûts d'investissement élevés de 50000 à 150000€, applicable à de grands volumes, consommation d'énergie pour le pompage et la centrifugation, diminution des coûts de transport et de destruction des bains usagés, très peu avantageux financièrement, frais de maintenance	Meilleure performance de production car moins de vidange des bains	Formation nécessaire pour la maintenance
Evaporation	Il permet de concentrer les contaminants d'une solution aqueuse par sa mise en ébullition sous pression	[Laforest, 1999]; [Ifets, 2008]; [Muiras, 1995]; [BREF, 2005]; [Wéry, 1998]	suppression des risques de pollution accidentelle; réduction de l'utilisation de l'eau, réduction des pertes en eau	émission de substances dangereuses	émission de substances dangereuses	amélioration de l'image de marque de l'entreprise	émission de substances dangereuses		peu de maintenance	Compensation des pertes du bain de traitement; recyclage des condensats (eau distillée pour les rinçages); concentration des impuretés avec la part active du bain; récupération de matériaux, dégradation des constituants sous la chaleur	réduction des volumes à traiter, peut entraîner le zéro rejet liquide; respect du flux de déchets difficile à traiter in situ et plus difficiles à gérer que les boues	changement périodique de la solution de traitement à cause de la présence d'impuretés, économie de matière première, recyclage des condensats possible (économie d'eau ou de solvant)	gain en qualité des dépôts, rinçage de meilleure qualité	investissement important: mobilisation du capital, très énergivore; amortissement long, suppression des contraintes de surveillance, coût du transport/élimination des nouveaux types de déchets		simple d'utilisation, nécessite de la main d'oeuvre supplémentaire	
Osmose inverse	Le principe repose sur la désionisation d'une solution saline par application sur cette solution, d'une pression p supérieure à la pression osmotique	[Laforest, 1999]; [BREF, 2005]; [Ifets, 2008]; [Raffin, 2007]	économie d'eau si recyclage						grande facilité de nettoyage des membranes	Récupération d'eau déminéralisée, réutilisable dans l'atelier, possibilité d'évolution de la capacité de traitement	réduction significative de l'utilisation de produits chimiques dans le traitement d'eaux résiduaires; accroissement des sels dissous dans les eaux de concentrat.	récupération de matériaux donc diminution de la consommation de matières premières	Améliore la qualité du produit fini	Coût d'investissement élevé, d'exploitation et de traitement des eaux résiduelles réduits; économie d'énergie, remplace plusieurs procédés en cascade, nécessité d'un prétraitement		unité de taille réduite	
extraction liquide-liquide	opération unitaire permettant l'extraction d'un soluté d'un liquide par un autre liquide souvent organique	[Laforest, 1999]	augmentation du risque d'impact environnemental du à l'utilisation de solvants, diminution de la consommation d'eau	augmentation du risque d'impact environnemental du à l'utilisation de solvants	augmentation du risque d'impact environnemental du à l'utilisation de solvants		émanations de COV					récupération de ~96% l'acide phosphorique et de 99% du Tbp			Coûts d'investissement élevé		
Procédé PRIAM (Procédé de Récupération Industriel Adapté aux Métaux)	Fonctionne sur le principe de l'électrodéposition	[ARIST, 2004]	diminution du débit d'eau, destruction des cyanures, rejets conformes						augmente la longévité des bains de rinçage mort	entraînement plus faible; récupération de métaux valorisables et revente	Pas de production ni traitement de boues, soulagement de la station		Améliore la qualité du produit fini	Faibles coûts de fonctionnement			
Bioréacteur à membrane PPP?	Couple les effets d'un traitement biologique aérobie et d'une clarification sur membranes	[Raffin, 2007]										abattement de la DCO de plus de 90%, Minimise le problème des boues (-70%)			autorise le rejet en milieu naturel sans post traitement (diminution du coût de traitement et pénalités)		

dialyse par diffusion	permet de séparer sous l'effet d'un gradient de concentration, au travers d'une membrane	[BREF, 2005]								complexe à mettre en œuvre	allongement de la durée de vie du bain, constance et qualité du traitement	recyclage de l'acide			couteux, consomme moins d'énergie que les technologies employant un gradient de pression ou électrique		
déshuilage statique	Séparation physique naturelle par la différence de densité de 2 phases des mélanges eau/huile	[Muiras, 1995]; [ifets, 2008]; [BREF, 2005]; [Wéry, 1998]	rejets vers le milieu naturel qui n'existaient pas avant car les bains étaient totalement détruits, diminution de la consommation en eau		rejets vers le milieu naturel qui n'existaient pas avant car les bains étaient totalement détruits					Simplicité, diminution de la fréquence des vidanges (5/an au lieu de 12)	Augmente la longévité des bains de dégraissage, le bain s'enrichit en polluants car seul le surageant est éliminé	Réduit considérablement la DCO amenée par la phase huileuse (jusqu'à 50%), réduction de la quantité de déchets, diminution des problèmes de fonctionnement de la station dus aux remontées de floes	diminue la consommation en matière première pour le remplacement des bains usagés, et les détergents	Amélioration de la qualité des dépôts	Faible coût par rapport aux techniques membranaires (amortissement ~5ans), diminution des coûts liés au transport et à la destruction des bains usés	Meilleure performance car moins de vidange, production plus élevée	
extraction liquide-liquide (rarement vu)	opération unitaire permettant l'extraction d'un soluté d'un liquide par un autre liquide souvent organique	[Laforest, 1999]	augmentation du risque d'impact environnemental du à l'utilisation de solvants	augmentation du risque d'impact environnemental du à l'utilisation de solvants	augmentation du risque d'impact environnemental du à l'utilisation de solvants	augmentation du risque d'impact environnemental du à l'utilisation de solvants		émanations de COV				récupération de ~96% l'acide phosphorique et de 99% du TBp			Coûts d'investissement élevé		
Evaporation par compression mécanique de vapeur	La compression de la vapeur permet d'augmenter sa température de condensation. Introduite dans un échangeur, elle permettra de chauffer ou d'évaporer un autre produit	[ARIST, 2004]	récupération d'eau condensée réduction de la consommation d'eau par recyclage						réutilisation possible de la vapeur pour chauffer les bâtiments	maintenance		diminution du volume des effluents	diminution de la consommation d'eau		Valorisation énergétique permettant de réduire la consommation (divisé par 5), retour sur investissement rapide (8 mois)		formation nécessaire

Changement de technologie

Pratique	Description	Référence	Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxication	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
plasma chaud	Dépôt par projection thermique	[CNIDEP, 2004]; [Muiras, 1995]; [Guyard, 2007]	Ne consomme pratiquement pas d'eau		diminution des risques de contamination des sols par des rejets intempestifs		Dépôt de bonne qualité, porosité du dépôt en atmosphère corrosive	Rayonnement	Bruit			Absence de pollution aqueuse			investissement abordable, Coût de fonctionnement essentiellement liés aux dépenses énergétiques et au gaz réactif, gain économique		nécessité de formation du personnel ou embauche

traitement de conversion	dépôt	Dépôt physique ou chimique en phase vapeur	Basé sur une déposition des couches à partir d'une phase gazeuse (vapeur métallique)	[CNIDEP, 2004]; [Muiras, 1995]; [BREF, 2005]	Ne consomme pratiquement pas d'eau	Pas de dégagement gazeux	diminution des risques de contamination des sols par rapport aux traitements par voie aqueuse	diminution des risques environnementaux par rapport aux traitements par voie aqueuse	Dépôt homogène régulier et sans déformation mais adhérent peu au support et peu étaué, faible épaisseur des couches		travail en salle blanche		Economie des matières premières	Pas de rejets dangereux, Absence de pollution liquide	économie de matières premières	Applications nouvelles dans le bio-médical (nouveaux marchés), vitesse de dépôt élevée	Coût d'investissement très élevé, Coût de fonctionnement essentiellement liés aux dépenses énergétiques	meilleure performance	nécessité de formation du personnel ou embauche	
	traitement thermochimique de diffusion en phase gazeuse	Nituration ionique	traitement de diffusion thermochimique d'azote (400 et 600°C) dans le but de durcir les matériaux ferreux	[Muiras, 1995]; [INRS, 2001]	Ne consomme pratiquement pas d'eau	dégagement d'ammoniac	diminution des risques de contamination des sols par des rejets aqueux intempestifs	risque d'explosion et d'incendie	améliore les propriétés anti-fatigue, résistance à la corrosion moyenne à faible, ne répond pas aux usures abrasives, très bon aspect, pas de problème d'adhérence	risque de brûlure, rayonnement explosion incendie, dégagement d'ammoniac; risque d'asphyxie		entretien régulier et lourd		simplification des gammes, absence de reprise mécanique; difficultés liées à la forme des pièces	absence de pollutions aqueuse, pas de boues			investissement lourd, prix de revient très compétitif	temps de traitement long (entre 6 à 80h), mise en place de modes opératoires spécifiques	nécessité de formation et sensibilisation du personnel et embauche
		cémentation ionique	traitement thermochimique pour obtenir un enrichissement superficiel en carbone d'un métal. Les pièces sont alors refroidies par trempé	[ARIST, 1995]; [Muiras, 1995]	ne permet pas d'atteindre les seuils de rejet fixés		diminution des risques de contamination des sols par des rejets aqueux intempestifs	risque d'explosion et d'incendie	résistance à la corrosion moyenne à faible, tenue en fatigue et en usure supérieure aux autres procédés, pas de problèmes d'adhérence	risque de brûlure, rayonnement explosion incendie		entretien régulier et lourd		simplification des gammes, absence de reprise mécanique, maîtrise du procédé difficile	absence de pollutions aqueuse, pas de boues			investissement lourd, prix de revient très compétitif	mise en place de modes opératoires spécifiques	nécessité de formation et sensibilisation du personnel et embauche
		Carbonituration	traitement thermique de diffusion de carbone et d'azote (890°C) suivi d'un durcissement par trempé (180°C)	[CNIDEP, 2004]; [, 2001]	Ne consomme pratiquement pas d'eau	dégagement d'ammoniac	diminution des risques de contamination des sols par des rejets aqueux intempestifs	risque d'explosion et d'incendie	très bonne qualité, amélioration de la dureté et tenue en fatigue durée de traitement faible (inférieure à cémentation), pas de problème d'adhérence	dégagement d'ammoniac; risque de brûlures		entretien régulier et lourd			absence de pollutions aqueuse, pas de boues			Coût d'investissement raisonnables de 50000 à 150000€. Coût de fonctionnement essentiellement liés aux dépenses énergétiques et au gaz réactif	mise en place de modes opératoires spécifiques	nécessité de formation et sensibilisation du personnel et embauche
		implantation ionique ou traitement par faisceau d'ions	processus d'implantation des atomes ionisés dans un solide par bombardement sous vide	[ARIST, 1995]; [Muiras, 1995]; [chabrol, 1989]	consomme peu d'eau	impact sur l'air?			traitement sans déformation, pas de problème d'adhérence, de nombreux matériaux peuvent être traités, antiusure et anti fatigue bon						simplification des gammes, absence de reprise mécanique	absence de pollutions		limité à l'outillage et au bio-médical	investissement lourd, prix de revient très élevés, faible consommation d'énergie	mise en place de modes opératoires spécifiques
traitements thermiques	trempé superficielle par induction ou par chalumeau	Mode de chauffage superficiel ou local permettant d'obtenir la structure trempé sur une épaisseur et sur une zone donnée. Les pièces sont ensuite refroidies brutalement par immersion dans un liquide (eau, huile,...)	[Muiras, 1995]	diminution de la consommation d'eau									limitation du procédé en liaison avec la forme des pièces	Absence de pollution autre que les mélanges de refroidissement			faible consommation d'énergie			
	recuit	Chauffage du matériau au-dessus du point de transformation et refroidissement relativement lent. Le but du recuit est d'adoucir les aciers en éliminant les effets antérieurs de fabrication (écrouissage, trempé) ainsi que les impuretés dues à leur élaboration (laminage, soudage ...)	[OTUA, 2009]																	
grenailage de précontrainte		ou shoot-penning : traitement qui consiste à projeter à grande vitesse des petites billes (acier sphérique, verre, céramique ...) sur une surface afin d'augmenter la durée de vie des pièces ou ensembles mécaniques soumis à des sollicitations dynamiques ou à divers problèmes de corrosion.	[Muiras, 1995]; [OTUA, 2009]	diminution de la consommation d'eau				Qualité des performances pour les sollicitations de type torsion, flexion, traction			Bruit		Maîtrise du procédé difficile,	Absence de pollution aqueuse			Investissement souvent lourd			

	rechargement par soudure	Opération consistant à apporter du métal sur une pièce mécanique usée, en vue de lui restituer sa cote d'origine. Le rechargement peut se faire par divers procédés: chromage dur, nickelage épais, métallisation au pistolet, fusion au chalumeau ou à l'arc, électrolyse au tampon ...	[Muiras, 1995]					état de surface rugueux	rayonnement			vitesse de déposition élevée	absence de pollution aqueuse, pollution sèche			investissement abordable		
décapage, nettoyage	Laser	Procédé sans contact permettant un nettoyage sans contact en utilisant des impulsions lumineuses	[ARIST, 2004]; [BREF, 2005]	Economie d'eau, diminution du risque de contamination des eaux	Pas de vapeurs dangereuses mais particules en suspension	diminution des risques de contamination des sols	diminution des risques environnementaux	excellente qualité de traitement, pas d'altération du métal de base	émission de particules			Faible volume de déchets	Réduction du volume d'effluents polluants		qualité du nettoyage	investissement élevé. Ne nécessite ni solvant, ni apport de matière	gestion du procédé aisée	
	substitution d'un décapage classique par un décapage par projection de carboglace	Ce procédé consiste à projeter sous haute pression de petites billes de glace sur la surface à nettoyer	[Muiras, 1995]; [ARIST, 2004]; [BREF, 2005]	diminution de la consommation d'eau	pas d'émission de solvant mais particules en suspension (filtration de l'air)	diminution des risques de pollution accidentelle des sols	Bruit généré?	n'entraîne ni rugosité ni corrosion sur la surface traitée	Pas d'utilisation de produits chimiques dangereux mais nécessité de protection des yeux, des voies respiratoires et auditives	Bruit du à la projection des billes,		les surfaces ne sont pas correctement décapées en fonction du type de salissure	les résidus gazeux et aqueux (fonte de glace) doivent être épurés		qualité du décapage	coût d'exploitation 50% supérieur à celui d'un grenillage; consommation d'énergie pour la propulsion des billes, investissement en protection		
	substitution d'un décapage classique par un décapage par décomposition thermique en lit fluidisé	Ce procédé consiste à décomposer thermiquement les couches organiques ou minérales recouvrant les surfaces	[Muiras, 1995]	diminution de la consommation d'eau	dégagement de gaz de combustion	diminution des risques de pollution accidentelle des sols		impact du lit fluidisé sur les pièces fragiles?	Pas d'utilisation de produits chimiques dangereux	Bruit		production en petites quantités et des pièces de taille petites à moyenne	ne rejette aucun produit toxique dans le milieu naturel			consommation de gaz	formation du personnel, productivité opérationnelle qui diminue	
	substitution du ponçage / polissage mécanique par cuivrage acide	le cuivrage acide peut remplacer les traitements de polissage et ponçage car il possède une excellente capacité de nivelage	[BREF, 2005]	utilisation d'eau ce qui n'était pas le cas en polissage classique	diminution de la pollution atmosphérique et en particulier des poussières mais émanations d'acide	augmentation du risque de pollution du sols par un rejet intempestif	augmentation du risque de pollution du sols par un rejet intempestif	effet sur la qualité du ponçage?	réduction des poussières dans l'atelier, diminution des exigences de santé et sécurité, émanation d'acides	réduction du bruit	entretien des baigns de cuivrage en plus		accroissement des exigences de traitement des eaux résiduaires	achat de matières premières supplémentaires		coût des matières premières pour le traitement et la détoxification	formation du personnel	
	dégraissage biologique (procédé CAMEX)	Basé sur un système biologique de bactéries aérobies qui réduisent en continu les impuretés des baigns de traitement	[Muiras, 1995]; [Lemoine, 1990]; [Seguin, 1990]; [BREF, 2005]	ne contient pas de substance toxique, économie d'eau				haute performance du dégraissage et constante	pas de risque microbien, et réduction de l'utilisation de produits dangereux	odeur des procédés biologiques?	fonctionne en circuit fermé donc nécessite un contrôle régulier pour éviter le développement de legionellose	contrôle du procédé? longue durée de vie du bain de dégraissage du à une faible teneur en graisse/ huiles, diminution des pertes par évaporation	rejet de boues faible, fonctionne à pH neutre,	utilisation de produits chimiques réduite	diminution du temps de dégraissage par rapport à un dégraissage classique	efficace et peu onéreux, Consommation d'énergie et de consommables faible, réduction des coûts	rendement accru car il n'y a plus d'arrêt de production pour le remplacement des baigns de dégraissage usés	diminution du temps de dégraissage par rapport à un dégraissage classique
	nettoyage aux ultrasons	les ondes acoustiques haute fréquence sont utilisées pour améliorer l'efficacité des agents de nettoyage	[BREF, 2005]				peu bruyant		effets sur l'audition	génère du bruit qui peut atteindre 85db		haute efficacité du dégraissage pour de faibles salissures, perte de certaines pièces possible à cause des vibrations		diminue la consommation de produits chimique,	durée de traitement plus courte, perte des pièces	coût de l'équipement, consommation énergétique de 10w/l	augmentation de la productivité	durée de traitement plus courte
	Construction de chaines intégrées et fermées	mise en place de chaines de traitement complètement fermée	[BREF, 2005]	réduction de l'utilisation d'eau	aucune émission atmosphérique ponctuelle dans l'installation			revêtement haute précision, qualité accrue	amélioration de l'environnement du lieu de travail			contrôle élevé du traitement, précision et qualité élevée		réduction de l'utilisation de produits chimiques	revêtement haute précision, qualité accrue, durée du traitement réduite	coût élevé du capital, faible coût de main d'œuvre de production	diminution de la productivité due au fonctionnement de l'enceinte	

ANNEXE 10 : MATRICE DES ÉVALUATIONS SEMI-QUANTITATIVES

Pratique		t,b,n,p,m														
		Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxication	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
bonnes pratiques	Contrôle et Optimisation du stockage des produits chimiques	b	t	b	b	n	t	a	a	b	a	t	n	m	b	m
	Mise en place de vannes et compteurs d'eau	b	n	n	n	n	n	p	n	a	b	b	n	t	a	m
	Contrôle du matériel de mesure	b	b	b	n	b	a	n	m	t	t	n	t	m	a	b
	Sensibilisation et formation du personnel à la bonne gestion de l'eau	b	n	n	n	n	n	a	n	a	b	a	a	t	n	a
bonnes pratiques	Utilisation de jets haute pression pour le nettoyage des sols et matériels	b	n	n	n	n	p	a	t	n	b	a	n	t	n	a
	Utilisation de personnel spécifique pour la manipulation des produits chimiques	b	b	b	b	b	b	n	n	b	b	t	a	p	a	m
	Minimisation des fluides de coupe	b	b	a	n	b	a	n	n	b	b	b	b	t	a	n
	Gestion de l'alimentation électrique	n	n	n	n	n	a	n	n	b	n	a	n	b	m	n
	Utilisation de systèmes de refroidissement fermés	b	n	n	n	n	b	n	b	n	a	a	n	p	n	n
	Utilisation de produits chimiques compatibles	b	b	b	a	n	b	n	m	t	b	m	n	b	n	n
	Gestion des nuisances sonores	n	n	n	b	n	b	t	n	n	n	n	a	e	n	n
	Bacs de rétention	b	n	b	b	n	b	n	m	n	a	n	n	t	n	n
	Contrôle des émissions atmosphériques	m	t	a	b	n	t	a	b	n	p	n	n	a	n	n
	Mise en place d'un SME	b	b	b	b	n	b	b	b	t	a	b	t	a	t	m
	Mise en place SGQ	b	b	t	a	b	b	b	a	b	t	b	b	t	a	m
Évaluation comparative des consommations d'eau	b	n	n	n	n	n	n	n	b	t	a	n	a	n	p	
Meilleur contrôle des procédés	Optimisation de l'efficacité des rinçages	b	n	n	n	b	n	n	n	b	t	a	n	t	b	n
	Mise en place d'appareils de mesure	b	b	b	n	n	a	n	n	b	b	t	n	b	b	n
	Montage statique pour les chaînes manuelles ou semi-automatiques	b	n	n	n	n	t	b	n	t	t	b	n	t	b	n
	Optimisation/ Augmentation du temps d'égouttage des pièces	b	n	b	n	m	a	n	b	t	t	t	e	t	n	m
	Contrôle et suivi régulier des bains/ appareil de mesure	b	n	a	n	b	n	n	m	t	b	b	t	b	t	m
	Élimination des programmes systématiques de vidange des bains	b	n	b	n	m	b	n	b	t	b	b	n	b	b	n
	Mise en place de procédures écrites de réalisation et de maintien des bains	t	b	b	b	b	b	b	b	b	a	a	n	a	b	a
	Gestion des vidanges des bains usés	b	b	b	b	n	b	n	p	b	n	n	n	b	b	n
	Récupération des eaux de rinçage concentrées dans les bains de traitement	b	n	n	n	n	n	n	n	b	b	a	n	b	n	n
	Couverture des bains lorsqu'ils ne sont pas utilisés ou boules de plastique	b	t	n	b	n	b	a	m	t	b	b	n	t	p	n
	Présence d'agents mouillants	b	n	n	n	b	n	n	m	t	p	m	b	p	n	n
	Minimisation des rétentions de solution ou volumes d'entraînement	b	n	b	a	n	b	n	a	t	b	b	b	t	n	m
	Mise en route automatique des systèmes de rinçage	b	n	b	a	n	n	n	a	a	b	a	n	b	a	n
	Réduction de la durée de stockage	n	n	n	n	b	n	n	n	b	n	n	b	t	b	m
	Gabarit de montage	b	n	n	n	b	n	m	b	t	b	a	b	b	a	n
	Agitation des solutions de traitement par air	n	m	p	m	b	m	m	n	b	n	n	a	e	a	n

	Optimisation du rendement électrique des traitements	p	p	p	n	n	p	n	p	b	m	m	n	a	a	n
	Soufflage de la solution en excès dans les tonneaux	b	m	m	p	n	e	n	p	a	b	b	n	a	m	m
	Identification des flux problématiques	a	a	a	a	n	b	n	n	a	b	n	n	t	n	n
	Élimination ou séparation des polluants individuels à la source	t	a	a	n	n	n	n	n	n	t	b	n	m	n	n
Remplacement d'intrant	Substitution des couches de conversion/passivation au chrome (VI) par des revêtements de conversion au chrome (III)	t	t	t	t	p	t	n	n	m	p	m	p	a	n	p
	Chromage à Froid	b	b	n	m	t	a	n	n	m	t	a	a	b	p	p
	Substitution du chromage hexavalent par le chromage trivalent à base de chlorures	t	t	t	t	m	b	n	n	p	a	b	b	t	p	p
	Substitution dégraissages aux solvants chlorés par dégraissage aqueux ou solvants pétroliers	b	b	m	b	m	m	m	m	p	m	n	n	p	p	n
	Substitution des formulations de bain de zincage cyanuré en bain de zincage alcalin	t	b	t	t	b	b	n	m	t	a	n	t	e	m	m
	Substitution des formulations de bain de zincage cyanuré en bain de zincage acide	t	t	t	t	m	t	n	m	t	p	n	p	a	m	m
	Substitution des formulations de cadmium	t	t	t	t	n	t	n	n	p	t	n	n	t	p	p
	Substitution des phosphatations par l'Oxilan	t	n	b	n	t	t	n	n	t	t	n	n	t	b	p
	Modification de l'emballage	n	n	n	n	t	n	n	n	t	b	m	b	b	a	n
Substitution des anodes solubles par des anodes insolubles	n	n	n	n	b	n	n	a	t	t	b	a	a	b	n	
Modification des procédés	Rinçage éco	t	n	m	n	a	n	n	t	t	b	b	n	b	m	n
	Rinçage de compensation	b	n	p	n	n	n	n	m	b	b	a	n	t	b	n
	Rinçage cascade contre-courant ou courant multiple série	b	n	m	n	b	n	n	n	b	b	a	n	a	b	n
	Rinçage par aspersion ou pulvérisation	b	m	p	n	a	e	n	m	t	t	a	a	b	m	m
	Remplacement des dépôts au tonneau par des revêtements métalliques sur support	b	n	b	n	b	p	n	n	b	b	b	n	b	p	m
	Mise en place d'un système de ventilation	b	m	n	n	b	b	p	p	b	m	n	n	p	a	n
	Mise en place d'un rouleau essoreur	b	p	p	n	n	p	n	p	b	t	b	n	t	p	n
Valorisation sur place / Valorisation des sous-produits	Compression mécanique de vapeur	b	n	n	n	n	m	b	b	n	b	b	n	t	n	n
	Déshuilage statique	m	n	m	n	b	n	n	b	a	t	b	n	t	b	n
	Électrolyse	t	a	a	b	b	b	n	b	b	t	b	a	t	a	p
	Électro-floculation, électro-flottation	t	n	n	n	n	b	n	p	n	t	m	n	t	n	n
	Électrodialyse	t	n	n	n	b	n	n	e	t	t	b	n	p	a	n
	Électrolyse compartimentée	b	n	n	n	b	n	n	e	b	t	n	n	m	n	n
	Électro-électrodialyse	b	n	n	n	n	n	n	m	t	t	b	n	e	n	n
	Microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration	t	n	b	n	t	n	n	m	t	t	a	a	a	a	b
	Résines échangeuses d'ions	t	m	n	n	n	n	n	p	t	p	m	n	m	p	n
	Résines adsorbantes	b	n	n	n	n	n	n	p	t	m	a	n	p	n	n
	Centrifugation	m	n	e	m	b	n	m	p	t	t	a	b	b	a	n
	Évaporation	t	m	n	m	t	m	n	b	a	p	p	b	e	n	p
	Osmose inverse	b	n	n	n	b	p	n	b	t	a	b	n	b	a	b
	Extraction liquide-liquide	p	p	p	p	n	m	n	p	n	t	p	n	m	n	p
	Dialyse par diffusion	n	n	n	n	n	n	n	p	t	b	p	n	p	m	p
Changement de technologie	Dépôt par projection thermique	b	n	b	n	a	m	m	n	a	b	n	a	b	n	m
	Dépôt physique ou chimique en phase vapeur	b	b	b	b	p	a	m	n	b	t	b	t	e	b	m
	Nitruration ionique	b	m	b	e	a	e	n	m	p	t	n	n	a	e	e
	Cémentation ionique	p	a	b	e	b	m	n	m	p	t	n	n	a	m	e
	Carbonitruration ionique	b	m	b	e	t	e	n	m	a	t	a	a	a	m	e
Implantation ionique ou traitement	b	p	b	n	t	p	n	p	t	b	n	m	b	m	e	

par faisceau d'ions															
Grenailage de précontrainte	b	n	n	n	b	n	m	n	m	b	n	a	m	p	p
Laser	t	p	b	b	t	m	n	n	b	b	b	b	p	b	n
Substitution d'un décapage classique par un décapage par projection de carboglace	b	p	b	m	b	a	m	n	m	m	p	b	e	p	n
Substitution d'un décapage classique par un décapage par décomposition thermique en lit fluidisé	b	m	b	n	p	t	m	n	m	t	a	n	m	m	m
Substitution du ponçage / polissage mécanique	m	p	m	m	m	b	b	m	p	m	m	p	m	p	m
Dégraissage biologique (procédé CAMEX)	t	n	n	n	t	t	p	m	t	b	b	m	t	b	p
Nettoyage aux ultrasons	n	n	n	m	n	m	m	n	a	a	b	b	p	b	n
Construction de chaînes intégrée et fermée	b	t	a	a	t	b	n	n	t	n	b	t	m	a	n
Substitution du ponçage / polissage mécanique	m	p	m	m	m	b	b	m	p	m	m	p	m	p	m
Dégraissage biologique (procédé CAMEX)	t	n	n	n	t	t	n	m	t	b	b	m	t	b	p
Nettoyage aux ultrasons	n	n	n	m	n	m	m	n	a	a	b	b	p	b	n
Construction de chaînes intégrée et fermée	b	t	a	a	t	b	n	n	t	n	b	t	m	a	n

ANNEXE 11 : NOTICE D'UTILISATION DE L'OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION

Il est indéniable qu'avec la sévèrisation des normes environnementales, la pérennité de l'industrie du traitement de surface en France et en Europe doit passer par la mise en œuvre de technologies innovantes et performantes. La maîtrise de cette implémentation nécessite des outils spécifiques d'aide à la décision. L'objectif de l'outil proposé est d'aider la décision dans le choix d'une pratique de production plus propre. En effet il est question du choix des meilleures pratiques qui répondront aux enjeux de l'industriel. Ce choix se fera dans un panel de pratiques qui ont été recensées dans la littérature. Le fichier Excel ci-joint constitue un prototype de cet outil.

Description de l'outil

L'outil d'aide au choix de 4PS est basé sur l'utilisation de la méthode ELECTRE I. Il se décompose en 3 onglets principaux (Figure 68). Sur les trois onglets seul l'onglet « outils d'aide au choix » est modifiable par l'utilisateur. Les 2 autres onglets servent aux calculs.

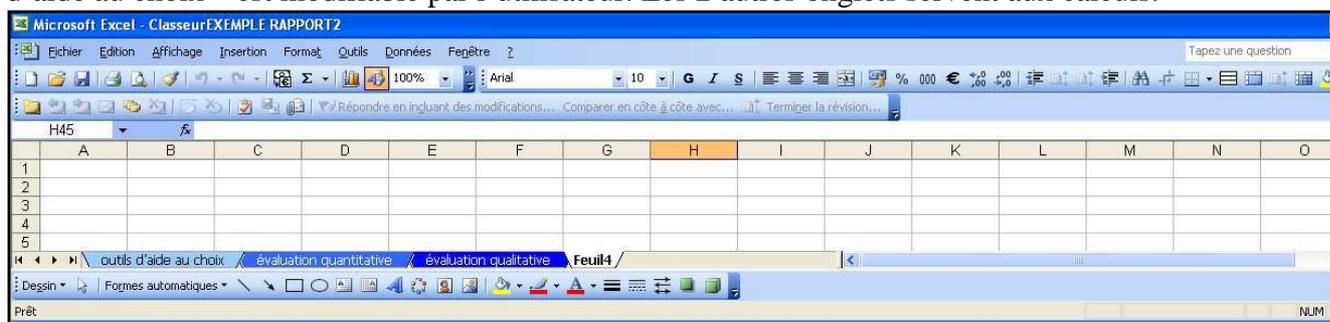


Figure 67 : Aperçu écran des onglets de l'outil de 4PS

→ **Onglet « outil d'aide au choix »** – Outil d'aide au choix d'une pratique de production plus propre et plus sûre (4PS). Cet onglet constitue le cœur de l'outil puisqu'il présente l'application de la méthode ELECTRE I pour le choix d'une pratique. C'est le seul onglet modifiable par l'utilisateur. Il se compose de 4 parties.

- Attribution de poids et d'échelles aux critères (Tableau 2, Figure 69)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Tableau 2: Attribution de poids et d'échelles aux critères							
2				Eau	Air	Sol	Population	Client
3				0,65	0,13	0,21	0,27	0,22
4		Poids des critères		0-10	3-7	3-7	2-8	3-7
5		Echelles						

Figure 68 : Aperçu écran du tableau 2 « Attribution de poids et d'échelles aux critères »

- Pratiques de production propre et leur évaluation aux yeux des critères (Tableau 1b, Figure 70)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
7		Pratique	abréviation									
8	Tableau 1b: Pratiques de production propre et leur évaluation aux yeux des critères											
9												
10	Type: Remplacement d'intrant (RI)	Substitution des couches de conversion/passivation au chrome (VI) par des revêtements de conversion au chrome (III) (Cr2O4,2-)	Pratique 1	7,5	7	6	6,5	4	8	5	5	
11		Chromage à Froid	Pratique 2	7,5	6	5	2	6	6,5	5	5	
12		Substitution du chromage hexavalent par le chromage trivalent à base de chlorures (Cr)	Pratique 3	7,5	7	6	6,5	4	8	5	5	
13		rinçage chimique ou procédé de lancy	Pratique 4	7,5	5	5	5	5	2	5	5	
14		substitution dégraissages aux solvants chlorés par dégraissage aqueux ou solvants pétroliers	Pratique 5	7,5	6	4	6,5	4	6,5	0	4	
15		substitution des formulations de bain de zincage cyanuré en bain de zincage alcalin	Pratique 6	10	7	7	8	6	8	5	3	
16		substitution des formulations de bain de zincage cyanuré en bain de zincage acide	Pratique 7	10	7	7	8	4	8	5	3	
17		substitution des formulation de cadmium	Pratique 8	10	7	7	6,5	5	8	5	5	
18		remplacement des sub complexes (EDTA)				5	5	5	5	5	5	5
19		Substitution des phosphates l'Oxilan				5	5	5	5	5	5	5
20		Modification de l'éclairage	Pratique 11	5	5	5	5	6	5	5	5	5
21		substitution des anodes solubles par des anodes insolubles	Pratique 12	5	5	5	5	6	5	5	5	5

Figure 69 : Aperçu écran du tableau 1b « Pratiques de production propre et leur évaluation aux yeux des critères »

Remarque : Le prototype présenté ici n'intègre pas encore la sélection des pratiques à comparer. En effet, il prend en considération toutes les pratiques de toutes les stratégies de production plus propre identifiées.

- Calcul de l'indice de concordance et de l'indice de discordance (Tableau 3, Figure 71)

Tableau 3: Calcul de l'indice de concordance et de l'indice de discordance

P: somme des poids 4,48										
INDICE DE CONCORDANCE										
	Pratique 1	Pratique 2	Pratique 3	Pratique 4	Pratique 5	Pratique 6	Pratique 7	Pratique 8	Pratique 9	Pratique 10
Pratique 1	1,00	0,75	1,00	0,78	0,62	0,83	0,83	1,00	0,85	0,6
Pratique 2	0,68	1,00	0,95	0,69	0,67	0,83	0,78	0,85	0,9	0,5
Pratique 3	0,67	0,52	1,00	0,46	0,39	0,73	0,73	0,81	0,4	0,4
Pratique 4	0,64	0,90	0,91	1,00	0,64	0,83	0,78	0,96	0,8	0,8
Pratique 5	0,69	0,94	0,96	0,73	1,00	0,83	0,83	0,90	0,9	0,5
Pratique 6	0,48	0,55	0,62	0,41	0,36	1,00	0,90	0,71	0,4	0,4
Pratique 7	0,48	0,55	0,67	0,41	0,36	0,87	1,00	0,76	0,4	0,4
Pratique 8	0,39	0,46	0,72	0,45	0,24	0,78	0,78	1,00	0,5	0,5
Pratique 9	0,58	0,77	0,85	0,78	0,55	0,78	0,78	0,95	1,0	0,5
Pratique 10	0,44	0,62	0,68	0,59	0,31	0,69	0,78	0,88	0,8	0,8
Pratique 11	0,58	0,77	0,83	0,59	0,50	0,78	0,78	0,77	0,7	0,7
Pratique 12	0,60	0,72	0,79	0,65	0,50	0,70	0,73	0,79	0,7	0,7
c: seuils de concordance		0,7								
INDICE DE DISCORDANCE rang 1										
	Pratique 1	Pratique 2	Pratique 3	Pratique 4	Pratique 5	Pratique 6	Pratique 7	Pratique 8	Pratique 9	Pratique 10
Pratique 1	0	0,45	0	0,6	0,5	0,2	0,2	0	0,25	0,2
Pratique 2	0,5	0	0,2	0,45	0,5	0,3	0,2	0,25	0,2	0,2
Pratique 3	0,5	0,45	0	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,2
Pratique 4	0,25	0,3	0,2	0	0,5	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2
Pratique 5	0,5	0,45	0,1	0,45	0	0,2	0,2	0,25	0,2	0,2
Pratique 6	0,5	0,6	0,25	0,6	0,5	0	0,2	0,25	0,2	0,2
Pratique 7	0,6	0,6	0,3	0,6	0,5	0,3	0	0,3	0,2	0,2
Pratique 8	0,3	0,45	0,25	0,6	0,5	0,3	0,3	0	0,2	0,2
Pratique 9	0,3	0,3	0,1	0,3	0,5	0,3	0,4	0,1	0	0
Pratique 10	0,6	0,45	0,3	0,45	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Pratique 11	0,5	0,3	0,2	0,3	0,5	0,3	0,3	0,25	0,2	0,2
Pratique 12	0,6	0,45	0,3	0,45	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
c: seuils de discordance		0,2								

Onglet "Outils d'aide au choix"

Figure 70: Aperçu écran du tableau 3 "Calcul de l'indice de concordance et de l'indice de discordance"

- Établissement des relations de surclassement (Tableau 4, Figure 72)

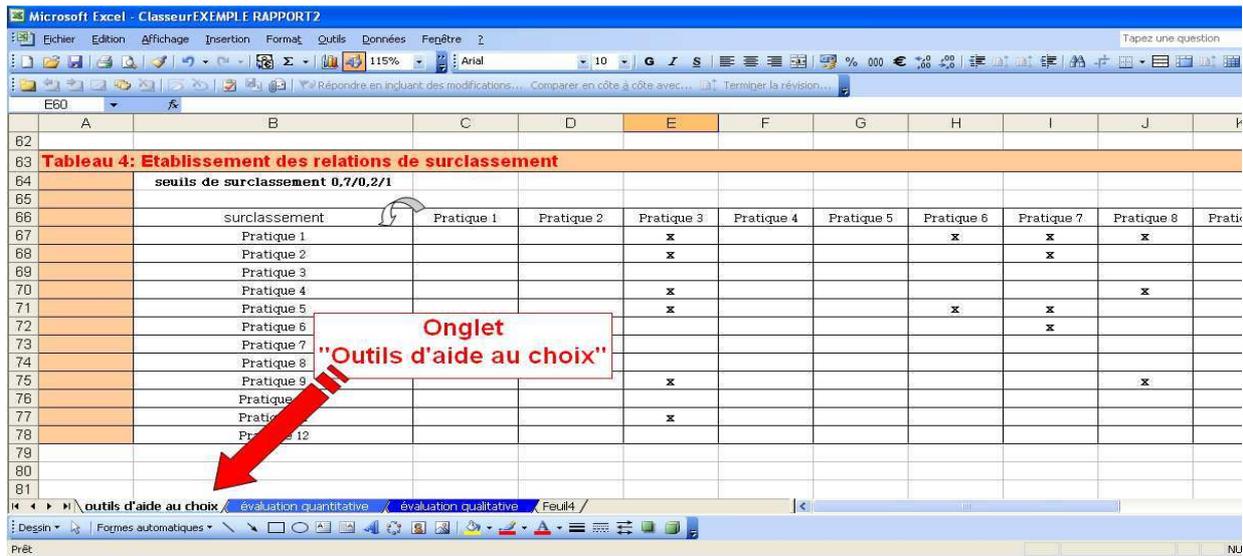


Figure 71 : Aperçu écran du tableau 4 « Établissement des relations de surclassement »

→ **Onglet « évaluation quantitative »** - Évaluation quantitative des pratiques par rapport aux critères. Cet onglet, également non modifiable par l'utilisateur, assure le passage d'une évaluation qualitative à une évaluation quantitative (Tableau 1b, Figure 73).

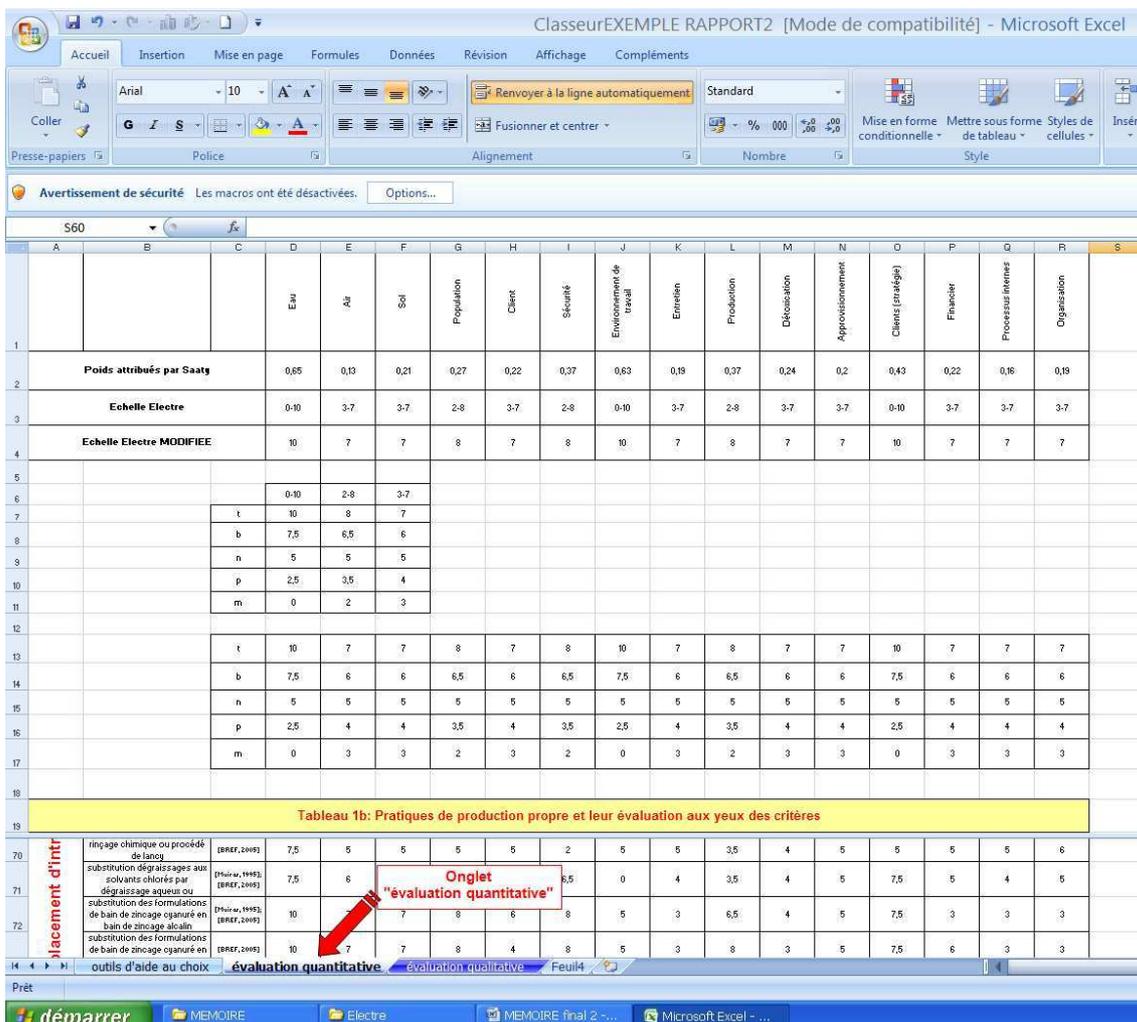


Figure 72 : Aperçu écran du Tableau 1b de l'onglet « évaluation quantitative »

→ **Onglet « évaluation qualitative »** - Évaluation qualitative des pratiques aux yeux des critères (très bon, bon, neutre, passable, mauvais). Cet onglet n'est pas modifiable par l'utilisateur. Il sera cependant nécessaire de mettre à jour régulièrement les pratiques de production propre notamment en éliminant les pratiques obsolètes et en rajoutant de nouvelles pratiques (Tableau 1a, Figure 74).

		l.b.a.p.m															
		Tableau 1a: Pratiques de production propre et leur évaluation aux yeux des critères															
	Pratique	Référence	Eau	Air	Sol	Population	Chant	Sécurité	Environnement de travail	Émission	Production	Dépollution	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
52	Chromage à Froid	[BREF, 2005]	b	b	n	m	b	b	n	n	p	p	n	b	b	p	p
53	Substitution du chromage hexavalent par le chromage trivalent à base de chlorures (Cr)	[BREF, 2006]	b	t	b	b	p	t	n	n	n	b	b	b	t	n	p
54	rinçage chimique ou procédé de lancy	[BREF, 2005]	b	n	n	n	n	m	n	n	p	p	n	n	n	n	b
55	substitution dégraissages aux solvants chlorés par dégraissage aqueux ou solvants pétroliers	[Muras, 1995] [BREF, 2005]	b	b	p	b	p	b	m	p	p	p	n	b	n	p	n
56	substitution des formulations de bain de zincage cyanuré en bain de zincage alcalin	[Muras, 1995] [BREF, 2005]	t	t	t	t	b	t	n	m	b	p	n	b	m	m	m
57	substitution des formulations de bain de zincage cyanuré en bain de zincage acide	[BREF, 2005]	t	t	t	t	p	t	n	m	t	m	n	b	b	m	m
58	substitution des formulations de cadmium	[Muras, 1995]	t	t	t	b					n	b	n	n	b	n	n
59	remplacement des substances complexantes (EDTA)	[BREF, 2005]	n	n	n	n	n	n	n	n	n	t	n	n	n	n	n
60	Substitution des phosphatations par l'Onilan	[Chemetal, 2007]	t	n	n	n	n	n	n	n	t	b	n	n	b	n	b

Figure 73 : Aperçu écran du Tableau 1a de l'onglet « évaluation qualitative »

Comment utiliser cet outil ?

1. Attribution de poids aux différents critères (Tableau 2, Figure 75)

- Sélectionner l'onglet « outils d'aide au choix »
- Se placer au niveau du tableau 2 « attribution de poids et d'échelles aux critères »
- Renseigner la ligne 3 « Poids des critères » en modifiant directement les valeurs dans les cellules de cette ligne (fond bleu).

La première partie de l'outil d'évaluation des impacts aboutit à l'identification des enjeux pour l'entreprise. Les poids sont donc attribués en fonction de ces enjeux : un enjeu primordial correspondant à un poids fort pour le critère.

Tableau 2: Attribution de poids et d'échelles aux critères						
		Eau	Air	Sol	Population	Client
Poids des critères		0,65	0,13	0,21	0,27	0,22
Echelles		0-10	3-7	3-7	2-8	3-7

Figure 74 : Lieu d'attribution des poids aux critères

2. Attribution des échelles (Figure 76)

- Rester au niveau du tableau 2 « attribution de poids et d'échelles aux critères »
- Renseigner la ligne 4 « Échelles» en modifiant directement les valeurs dans les cellules de cette ligne.

Les échelles sont attribuées en fonction des poids précédemment attribués : à un critère ayant un poids fort est attribuée une échelle ayant une grande amplitude (fond bleu). Les échelles permettent de passer d'une évaluation qualitative (tableau 1a) à une évaluation quantitative (tableau 1b).

Trois types de longueur d'échelle sont possibles (0-10, 2-8 et 3-7). Cette attribution aboutit automatiquement à la modification de l'évaluation quantitative dans l'onglet « évaluation quantitative ».

Tableau 2: Attribution de poids et d'échelles aux critères						
		Eau	Air	Sol	Population	Client
Poids des critères		0,65	0,13	0,21	0,27	0,22
Echelles		0-10	3-7	3-7	2-8	3-7

Figure 75 : Lieu d'attribution des échelles

3. Modification des seuils de concordance et de discordance (Tableau3, Figure 77)

- Se placer au niveau du tableau 3 « Calcul de l'indice de concordance et de l'indice de discordance »

- Renseigner la ligne « \hat{c} : seuils de concordance » puis la ligne « \hat{d} : seuils de discordance » en modifiant directement les valeurs dans les cellules de cette ligne (fond bleu). L'utilisateur a la possibilité de modifier les seuils de concordance et de discordance, pour les durcir ou les assouplir. Ces seuils sont compris entre 0 et 1. Pour durcir les seuils il faut augmenter la valeur attribuée au seuil de concordance, ou diminuer la valeur du seuil de discordance.

Les indices de concordance et de discordance sont alors calculés automatiquement dans le tableau 3.

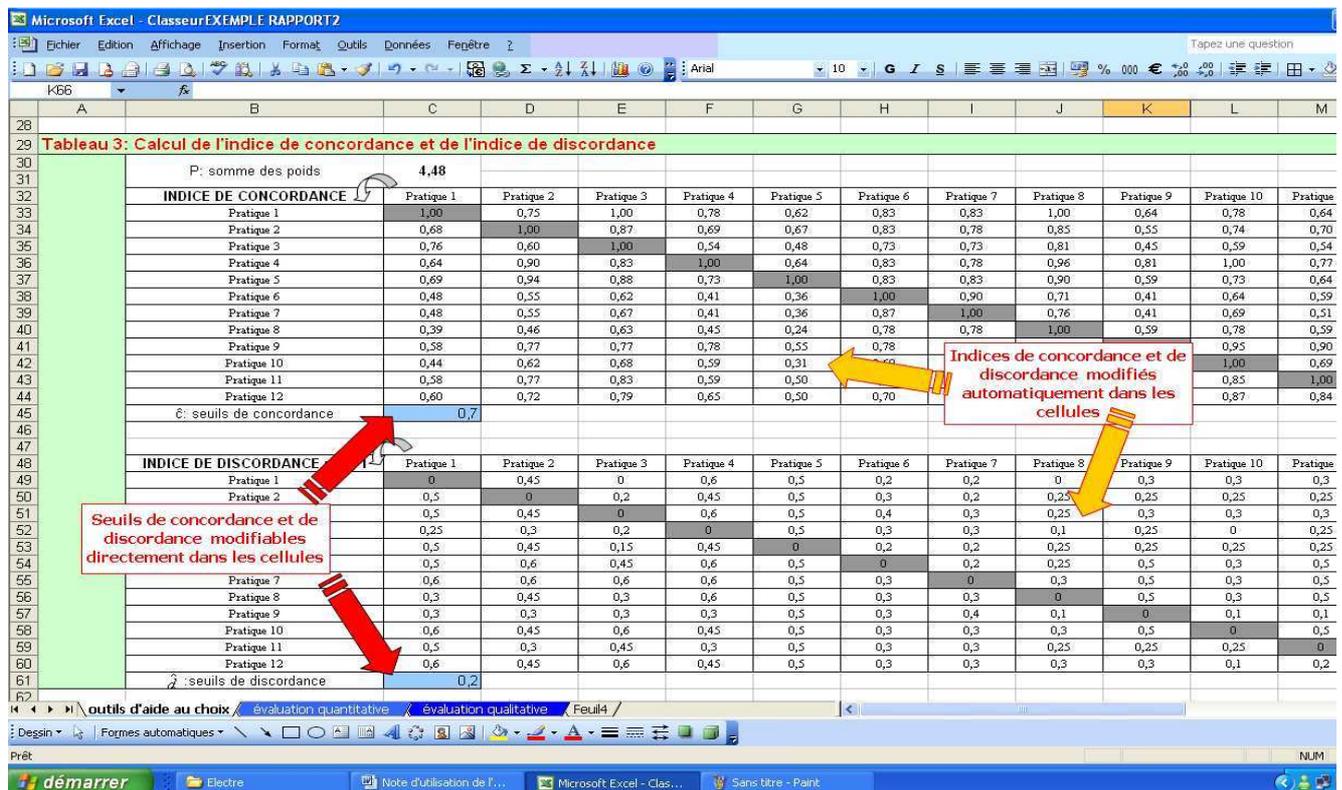


Figure 76 : Lieu de modification des seuils de concordance et de discordance

4. Établissement des relations de surclassement (Tableau 4, Figure 78)

Dans le tableau 4 sont établies automatiquement les relations de surclassement. Si une pratique (en colonne) en surclasse une autre (en ligne), cela est représenté par une croix.

Microsoft Excel - ClasseurEXEMPLE RAPPORT2

Tableau 4: Etablissement des relations de surclassement

seuils de surclassement 0,7/0,2/1

surclassement	Pratique 1	Pratique 2	Pratique 3	Pratique 4	Pratique 5	Pratique 6	Pratique 7	Pratique 8	Pratique 9	Pratique 10	Pratique 11	Pratique 12
Pratique 1			x			x	x	x				
Pratique 2			x									
Pratique 3												
Pratique 4					x						x	
Pratique 5					x				x	x		
Pratique 6										x		
Pratique 7												
Pratique 8												
Pratique 9												x
Pratique 10												
Pratique 11												
Pratique 12												

La pratique 3 surclasse la pratique 5: cela est représenté par une croix

Figure 77: Représentation de la relation de surclassement dans le tableau 4

Visualisation des résultats

Pas de génération automatique des graphes de résultats

À partir des tableaux fournis par l'outil (Figure 78), l'utilisateur peut manuellement construire des graphiques de résultat (Figure 79) permettant de mettre en relief les pratiques surclassantes. Pour réaliser ce graphe (Figure 79), tracer des flèches entre les actions surclassantes dans le sens de l'action surclassée (de l'action surclassante vers l'action surclassée).

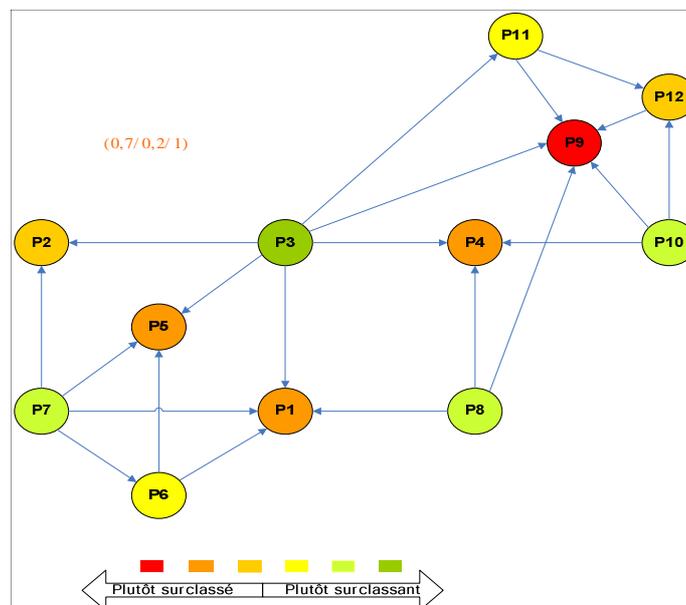


Figure 78 : Exemple de graphe des résultats

ANNEXE 12 : TABLEAUX DE BORDS DE LA SOCIÉTÉ A

Avant le remplacement du bain de passivation au chrome VI par du Chrome III

DONNEES / PARAMETRES	VALEUR PARAMETRE	INDICATEUR		UNITES	VALEUR INDICATEUR	ECHELLE		CONFORMITE	NOTE ECHELLE N _{Indicateur}	CRITERE	IMPACT DU CRITERE IC	POIDS CRITERE	SOUS-SYSTEME	POIDS SOUS-SYSTEME	IMPACT PONDERE CRITERE IPC			
Niveau sonore mesuré à l'extérieur	45	Mesure du bruit à l'extérieur de l'atelier	NS1	dB(A)	45	échelle réglementaire-émergence en semaine de 7h à 22h	<6dBsi NS-45dB; conforme; >6dB si NS-45dB; non-conforme; <5dBsi NS-45dB; conforme; >5dB si NS-45dB; non-conforme	conforme	10	Population	1	1	Social	0,35	0,35			
émergence	5				Eau					1	0,65	Ecosystème				0,32	0,02	
Niveau sonore mesuré dans l'atelier	40	Mesure du bruit à l'intérieur	NS2	sans dimension	40	Niveau de gêne	De 0 à 60 dB(A) : Calme, De 60 à 85 dB(A) : Gênant, De 85 à 100dB(A) : nocif, Supérieur à 100 dB(A): insupportable	calme	10	Air	0,5		0,13	Ecosystème	0,32			0,02
pH des rejets	7,4	pH des rejets	pH	sans dimension	7,4	pH réglementaire	<6,5: non-conforme; 6,5<pH<9: conforme; >9:nonconforme	conforme	10	Sol	0,50	0,21	Ecosystème			0,32	0,03	
température	13,18	température des rejets	T	°C	16,82	T réglementaire	<30°C: conforme; >30°C: non-conforme	conforme	10	Client	1	1		Economique	0,33			0,33
DCO	154	Indice de biodégradabilité des rejets en eau	lbiodég	sans dimension	1,81	biodégradabilité	<2: facilement biodégradable; <3:biodégradable; >3 non biodégradable	facilement biodégradable	10	Environnement de travail	0,88	0,63	Opérateurs	0,35	0,19			
DBO5	85									Sécurité	0,85	0,37				0,11		
Concentration du bain de traitement le plus contraignant à t=0, Cb (g/L)	Non nécessaire	Entrainement (ml/m2)	e	L/m2	2,64	indicateur de suivi	échelle: si entrainement< valeur à t=0: bon, si entrainement> valeur à t=0:moins bon (valeur à t=0: 2,64)	sans effet	10	Approvisionnement	1	0,2	Opérations	0,26	0,05			
Concentration dans le bain de rinçage associé à t=0, Cr0 (g/L)										Production	0,80	0,37				0,08		
Concentration dans le bain de rinçage associé à t>0, (Crg/L)										Entretien	1	0,19					0,05	
Surface des pièces rincées entre t= et t>0, S (m2)										Détoxication	1	0,24						0,06
Volume du bain de rinçage, V										Perspective	1	0,22						
nombre d'heures de tenue au brouillard salin en rouille blanche (h)	200	Caractéristiques anti-corrosion	BS	heures	200	Classe du cahier des charges	BS>400h: très bon; BS<192h bon;BS<120h: mauvais;	très bon	10	Perspective client	1	0,43	Stratégie d'entreprise	0,39	0,17			
niveau global de risques (voir tables)	III	Niveau global de risques	NGR	sans dimension	III	6 niveaux de risque : niveau I très haut niveau de risque, niveau VI: très bas niveau de risque	I: très haut;II: haut;III: moyennement haut; IV:moyennement bas; V:bas et VI:très bas	moyennement haut	4	Processus internes	1	0,16				0,06		
Nombre de personnel présent en moyenne par mois	29	Taux de présentisme	Tprésent	%	100%	échelle établie à partir du questionnaire	>98% très bon; 96<Tp<98%:bon; 90<Tp<96% médiocre; <90% inadmissible	très bon	10	Perspective organisationnelle	1	0,19	0,07					
Effectif total	29																	
Nombre de personnel formé	29	Taux de formation du personnel	Tformation	%	100,0%	échelle établie à partir du questionnaire	>75% fort; >50% moyen; <50% faible	Fort	10									
Nombre d'accidents et d'arrêts pour les 6 derniers mois	0	Taux de fréquence des accidents du travail	Faccident	%	0	échelle donnée par la CRAM	Face<20: très bon résultat; 20<Face<30: bon résultat; 30<Face<40 assez bon résultat; Face>40: résultat moins bon	très bon résultat	10									
Nombre d'heures travaillées pour les 6 derniers mois	52920																	
Investissement annuel en matériel (€)	200000	Taux de renouvellement de l'équipement	Réquip	%	266,67%	échelle établie à partir du questionnaire	<5%: faible; 5<Rég<10% moyen; Rég >10%: Fort	Fort	10									
Chiffre d'affaires annuel	15000000	Taux de valeur ajoutée: (CA-coûts)/CA	VA	%	98,5%	Définie à partir des statistiques du secteur (sessi)	<20% très faible; <40% faible; 40% <Taux moyen des PMI du secteur>40%: fort	très bon	10									
Coûts de production annuels (€)	220437	Productivité apparente du travail	Tprod	€/pers	509640,10	Définie à partir des statistiques du secteur (sessi)	<20000 très faible; <30000 faible; 30000<Taux moyen PMI du secteur<50000; >50000fort	fort	10									
enquête sur le niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	1	Niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	odeur in	sans dimension	1	échelle assez subjective	0: pas d'odeur; 1: Non gêné; 2: Peu gêné; 3: Gêné; 4: très gêné; 5:extrêmement gêné	Non gêné	7,5									
enquête sur le niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	0	Niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	odeur ext	sans dimension	0	échelle assez subjective	0: pas d'odeur; 1: Non gêné; 2: Peu gêné; 3: Gêné; 4: très gêné; 5:extrêmement gêné	Pas d'odeur	10									
													Perf=ΣIPCx	1,88				

Phrases de risque classifiant les substances toxiques	r53 r50	Indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide	lpoll	sans dimension	r53 r50	échelle de 6 niveaux donnés par Tixier	6:très toxique; 5:assez toxique; 4:toxique ; 3: assez nocif; 2:nocif; 1: peu nocif; 0: faiblement nocif	très toxique	0
Q est calculé sur site	7,35	Consommation spécifique	Q	L/m2/fdr	7,35	échelle de conformité réglementaire	Q<8: bon; Q=8:limite;Q>8: non-conforme	bon	10
Nombre de réclamations	Non nécessaire	Taux de satisfaction des clients	Tsatisf	%	0,1%	échelle établie à partir du questionnaire	<1%: très satisfait; <3%:relativement satisfait; <5% ni satisfait ni mécontent; <10%relativement mécontent; >10%inadmissible	très satisfait	10
Nombre de pièces réalisées									
Nombre d'éléments conformes pour l'eau	13	Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée	Ce	sans dimension	0	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	conforme	10
Nombre d'éléments surveillés pour l'eau	13								
Nombre d'éléments conformes pour l'air	6	Charge toxique et polluante dans l'air	Ca	sans dimension	1	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	non conforme	0
Nombre d'éléments surveillés pour l'air	7								
Nombre d'éléments dont la concentration dans les rejets aqueux a diminué ou est stable	1	Suivi de charge toxique et polluante dans l'eau	Sce	sans dimension	0,0	échelle: si SCe<0: moins bon, si SCe> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les rejets aqueux a augmenté	1								
Nombre d'éléments dont la concentration dans les rejets gazeux a diminué ou est stable	1	Suivi de charge toxique et polluante dans l'air	Sca	sans dimension	0,0	échelle: si SCa<0: moins bon, si SCa> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les rejets gazeux a augmenté	1								
Phrases de risque classifiant les substances inflammables	NC	Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique	lft	sans dimension	NC	échelle de 3 classe de dangerosité donnée par Tixier	3: extrêmement inflammable; 2:facilement inflammable ; 1: inflammable; 0: faiblement inflammable	faiblement inflammable	10
Phrase de risque classifiant les substances explosives	NC	Indice de dangerosité pour un effet de surpression	lsurp	sans dimension	NC	échelle de 3 classesde dangerosité donnée par Tixier	3: explosif sensible; 2:Explosif ; 1: possibilité d'être explosif; 0: non explosif	non explosif	10
Nombre de rapport de dilution optimaux :Par exemple bain de dépôts:<5000:bon; 5000-Rd<10000: optimal-2000:moins bon	36	Taux de conformité au rapport de dilution des bains de rinçage	Rd	sans dimension	1,00	échelle à confirmer	>80%: très bon; >70%: bon; >60%: moins bon;<50%:mauvais	très bon	10
Nombre de fonction de rinçages	36								
Capacité de production (m2/j estimée) 2002	824	Taux d'utilisation de l'équipement	Uéquip	%	0,8	3 niveaux	<50% peu utilisé; 50<Uéquip<75%: utilisé; >75%: très utilisé	très utilisé	10
Quantité de déchets réutilisés	0	Indicateur d'utilisation déchet (%)	Ud	%	0,0	4 niveaux	<25% moyen;25<Ud<50%:bon; 50<Ud<75%: très bon; >75%: excellent	moyen	0
temps nécessaire au traitement d'un mètre carré de surface	2,16	Productivité opérationnelle	PO	minute	2,2	échelle: si PO< valeur à t=0: bon, si PO> valeur à t=0:moins bon		sans effet	10
Énergie consommée (kWh/j)	15,17	Indicateurs d'intensité énergétique	lénergie	kWh/m2	2,28E-02	échelle: si lnergie< valeur à t=0: bon, si lnergie> valeur à t=0:moins bon	0,02	sans effet	10
production (m2/j)	665								
Masse de M 1ère utilisée (kg/j)	275	Indicateur intensité matière première	Imp	kg/m2	0,41	échelle: si Imp< valeur à t=0: bon, si Imp> valeur à t=0:moins bon	0,4	sans effet	10
Masse de déchets générés (kg/j)	296	indicateur d'intensité déchet	ldéchet	kg/m2	0,45	échelle: si ldéchet< valeur à t=0: bon, si ldéchet> valeur à t=0:moins bon	0,4	sans effet	10
Quantité de réactifs utilisés en station (kg/j)	212	Quantité de réactifs utilisés en station	réactifs	kg/m3	3,85	échelle: si réactifs< valeur à t=0: bon, si réactifs> valeur à t=0:moins bon	3,85	sans effet	10
Volume d'effluent traité par jour m3/j)	55								
nombre de clients	1	Gain de clientèle	Gclient	clients	1,00	échelle: si Gclients< valeur à t=0: bon, si Gclient< valeur à t=0:moins bon	1	sans effet	10
Excès de risque individuel	1,14E-07	Excès de risque individuel	ERI	sans dimension	0,00	ERI>10 ⁻⁵ : possibilité d'apparition d'un effet toxique; ERI<10 ⁻⁵ : effet toxique peu probable		bon	10
Masse de boues produites (kg/j)	181	intensité boues	boues	kg/m2	0,27	échelle: si boues< valeur à t=0: bon, si boues> valeur à t=0:moins bon	0,27	sans effet	10
Stockage à l'abri des intempéries	oui	Gestion des déchets solides	GES	sans dimension	6,00	Stockage à l'abri des intempéries et sur sol étanche : très bon; Stockage sur sol étanche : bon; Stockage à l'abri des intempéries: moins bon; stockage sauvage: mauvais		très bon	10
Stockage sur sol étanche	oui								
indice de risques	0,02	Indice de risques	IR	sans dimension	0,02	IR>1 : possibilité d'apparition d'un effet toxique; IR<1: effet toxique peu probable		bon	10

Après le remplacement du bain de passivation au chrome VI par du Chrome III

DONNEES / PARAMETRES	VALEUR PARAMETRE	INDICATEUR		UNITES	VALEUR INDICATEUR	ECHELLE		CONFORMITE	NOTE ECHELLE N_indicateur	CRITERE	IMPACT DU CRITERE IC	POIDS CRITERE	SOUS-SYSTEME	POIDS SOUS-SYSTEME	IMPACT PONDERE CRITERE IPC
Niveau sonore mesuré à l'extérieur	45	Mesure du bruit à l'extérieur de l'atelier	NS1	dB(A)	45	échelle réglementaire: émergence en semaine de 7h à 22h	<6dBsi NS<45dB; conforme; >6dB si NS<45dB: non-conforme; <5dBsi NS<45dB: conforme; >5dB si NS<45dB: non-conforme	conforme	10	Population	1	1	Social	0,35	0,35
émergence	5				Eau					1	0,65	0,21			
Niveau sonore mesuré dans l'atelier	40	Mesure du bruit à l'intérieur	NS2	sans dimension	40	Niveau de gêne	De 0 à 60 dB(A) : Calme, De 60 à 85 dB(A) : Gênant, De 85 à 100dB(A) : nocif, Supérieur à 100 dB(A): insupportable	calme	10	Air	0,5	0,13	Ecosystème	0,32	0,02
pH des rejets	7,4	pH des rejets	pH	sans dimension	7,4	pH réglementaire	<6,5: non-conforme; 6,5<pH<9: conforme; >9:nonconforme	conforme	10	Sol	0,50	0,21			0,03
température	13,18	température des rejets	T	°C	16,82	T réglementaire	<30°C: conforme; >30°C: non-conforme	conforme	10	Client	0,8	1	Economique	0,33	0,26
DCO	154	Indice de biodégradabilité des rejets en eau	lbiodég	sans dimension	1,81	biodégradabilité	<2: facilement biodégradable; <3:biodégradable; >3 non biodégradable	facilement biodégradable	10	Environnement de travail	0,88	0,63	Opérateurs	0,35	0,19
DBO5	85									Sécurité	0,95	0,37			0,12
Concentration du bain de traitement le plus contraignant à t=0, Cb (g/L)	Non nécessaire	Entrainement (ml/m2)	e	L/m2	2,64	indicateur de suivi	échelle: si entraînement: valeur à t=0: bon; si entraînement: valeur à t=0: moins bon (valeur à t=0: 2,64)	sans effet	10	Approvisionnement	0,75	0,2	Opérations	0,26	0,04
Concentration dans le bain de rinçage associé à t=0, Cr0 (g/L)										Production	0,80	0,37			0,08
Concentration dans le bain de rinçage associé à t>0, (Crg/L)										Entretien	1	0,19			0,05
Surface des pièces rincées entre t= et t>0, S (m2)										Détoxication	1	0,24			0,06
Volume du bain de rinçage, V										Perspective	1	0,22			0,09
nombre d'heures de tenue au brouillard salin en rouille blanche (h)	120	Caractéristiques anti-corrosion	BS	heures	120	Classe du cahier des charges	BS<400h: très bon; BS<192h bon; BS<120h: mauvais;	bon	5	Perspective client	0,625	0,43	Stratégie d'entreprise	0,39	0,10
niveau global de risques (voir tables)	V	Niveau global de risques	NGR	sans dimension	V	6 niveaux de risque : niveau I très haut niveau de risque, niveau VI: très bas niveau de risque	I: très haut; II: haut; III: moyennement haut; IV: moyennement bas; V: bas et VI: très bas	bas	8	Processus internes	1	0,16			0,06
Nombre de personnel présent en moyenne par mois	29	Taux de présentéisme	Tprésent	%	100%	échelle établie à partir du questionnaire	>98% très bon; 96-Tp<98%: bon; 90-Tp<96%: médiocre; <90% inadmissible	très bon	10	Perspective organisationnelle	1	0,19			0,07
Effectif total	29												Perf=ΣIPCx		1,75
Nombre de personnel formé	29	Taux de formation du personnel	Tformation	%	100,0%	échelle établie à partir du questionnaire	>75% fort; >50% moyen; <50% faible	Fort	10						
Nombre d'accidents et d'arrêts pour les 6 derniers mois	0	Taux de fréquence des accidents du travail	Faccident	%	0	échelle donnée par la CRAM	Face<20: très bon résultat; 20-Face<30: bon résultat; 30-Face<40: assez bon résultat; Face<40: résultat moins bon	très bon résultat	10						
Nombre d'heures travaillées pour les 6 derniers mois	52920														
Investissement annuel en matériel (€)	200000	Taux de renouvellement de l'équipement	Réquip	%	266,67%	échelle établie à partir du questionnaire	<5%: faible; 5-Réq<10% moyen; Réq >10%: Fort	Fort	10						
Chiffre d'affaires annuel	15000000	Taux de valeur ajoutée: (CA-coûts)/CA	VA	%	98,5%	Définie à partir des statistiques du secteur (sessi)	<20% très faible; <40% faible; 40%: Taux moyen des PMI du secteur<60%; >60%: fort	très bon	10						
Coûts de production annuels (€)	220437	Productivité apparente du travail	Tprod	€/pers	509640,10	Définie à partir des statistiques du secteur (sessi)	<20000 très faible; <30000 faible; 30000-<Taux moyen PMI du secteur<50000; >50000: fort	fort	10						

enquête sur le niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	1	Niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	odeur in	sans dimension	1	échelle assez subjective	0: pas d'odeur; 1: Non gêné; 2: Peu gêné; 3: Gêné; 4: très gêné; 5:extrêmement gêné	Non gêné	7,5
enquête sur le niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	0	Niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	odeur ext	sans dimension	0	échelle assez subjective	0: pas d'odeur; 1: Non gêné; 2: Peu gêné; 3: Gêné; 4: très gêné; 5:extrêmement gêné	Pas d'odeur	10
Phrases de risque classifiant les substances toxiques	r53 r50	Indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide	lpoll	sans dimension	r53 r50	échelle de 6 niveaux donnés par Tixier	6:très toxique; 5:assez toxique; 4:toxique; 3: assez nocif; 2: nocif; 1: peu nocif; 0: faiblement nocif	très toxique	0
Q est calculé sur site	7,35	Consommation spécifique	Q	L/m2/ldr	7,35	échelle de conformité réglementaire	Q<8: bon; Q=8:limite;Q>8: non-conforme	bon	10
Nombre de réclamations	Non nécessaire	Taux de satisfaction des clients	Tsatisf	%	2,9%	échelle établie à partir du questionnaire	<1%: très satisfait; <3%:relativement satisfait; <5%:ni satisfait ni mécontent; <10%relativement mécontent; >10%inadmissible	relativement satisfait	7,5
Nombre de pièces réalisées									
Nombre d'éléments conformes pour l'eau	13	Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée	Ce	sans dimension	0	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	conforme	10
Nombre d'éléments surveillés pour l'eau	13								
Nombre d'éléments conformes pour l'air	6	Charge toxique et polluante dans l'air	Ca	sans dimension	1	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	non conforme	0
Nombre d'éléments surveillés pour l'air	7								
Nombre d'éléments dont la concentration dans les rejets aqueux a diminué ou est stable	1	Suivi de charge toxique et polluante dans l'eau	Sce	sans dimension	0,0	échelle: si SCe<0: moins bon, si SCe> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les rejets aqueux a augmenté	1								
Nombre d'éléments dont la concentration dans les rejets gazeux a diminué ou est stable	1	Suivi de charge toxique et polluante dans l'air	Sca	sans dimension	0,0	échelle: si SCa<0: moins bon, si SCa> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les rejets gazeux a augmenté	1								
Phrases de risque classifiant les substances inflammables	NC	Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique	lft	sans dimension	NC	échelle de 3 classe de dangerosité donnée par Tixier	3: extrêmement inflammable; 2:facilement inflammable; 1: inflammable; 0: faiblement inflammable	faiblement inflammable	10
Phrase de risque classifiant les substances explosives	NC	Indice de dangerosité pour un effet de surpression	Isurp	sans dimension	NC	échelle de 3 classesde dangerosité donnée par Tixier	3: explosif sensible; 2:Explosif ; 1: possiblé d'être explosif; 0: non explosif	non explosif	10
Nombre de rapport de dilution optimaux :Par exemple bain de dépôts:<5000:bon; 5000<Rd<10000: optimal>2000:moins bon	36	Taux de conformité au rapport de dilution des bains de rinçage	Rd	sans dimension	1,00	échelle à confirmer	>80%: très bon; >70%: bon; >60%: moins bon;<50%:mauvais	très bon	10
Nombre de fonction de rinçages	36								
Capacité de production (m2/j estimée) 2002	824	Taux d'utilisation de l'équipement	Uéquip	%	0,8	3 niveaux	<50% peu utilisé; 50-Uéquip<75%: utilisé; >75%: très utilisé	très utilisé	10
Quantité de déchets réutilisés	0	Indicateur d'utilisation déchet (%)	Ud	%	0,0	4 niveaux	<25%: moyen;25<Ud<50%:bon; 50<Ud<75%: très bon; >75%: excellent	moyen	0
temps nécessaire au traitement d'un mètre carré de surface	2,16	Productivité opérationnelle	PO	minute	2,2	échelle: si PO< valeur à t=0: bon, si PO> valeur à t=0:moins bon		sans effet	10
Énergie consommée (kWh/j)	15,17	Indicateurs d'intensité énergétique	lénergie	kWh/m2	2,28E-02	échelle: si lénergie< valeur à t=0: bon, si lénergie> valeur à t=0:moins bon	0,02	sans effet	10
production (m2/j)	665								
Masse de M 1ère utilisée (kg/j)	407	Indicateur intensité matière première	Imp	kg/m2	0,61	échelle: si Imp< valeur à t=0: bon, si Imp> valeur à t=0:moins bon	0,4	moins bon	5

Masse de déchets générés (kg/j)	296	indicateur d'intensité déchet	ldéchet	kg/m2	0,45	échelle: si ldéchet< valeur à t=0: bon, si ldéchet> valeur à t=0:moins bon	0,4	sans effet	10
Quantité de réactifs utilisés en station (kg/j)	180	Quantité de réactifs utilisés en station	réactifs	kg/m3	8,34	échelle: si réactifs< valeur à t=0: bon, si réactifs> valeur à t=0:moins bon	9,83	bon	10
Volume d'effluent traité par jour m3/j)	21,57								
nombre de clients	8	Gain de clientèle	Gclient	clients	10,00	échelle: si Gclient< valeur à t=0: bon, si Gclient> valeur à t=0:moins bon	10	moins bon	8
Excès de risque individuel	1,14E-07	Excès de risque individuel	ERI	sans dimension	0,00	ERI>10 ⁻⁵ : possibilité d'apparition d'un effet toxique; ERI<10 ⁻⁵ : effet toxique peu probable		bon	10
Masse de boues produites (kg/j)	181	intensité boues	boues	kg/m2	0,27	échelle: si boues< valeur à t=0: bon, si boues> valeur à t=0:moins bon	0,27	sans effet	10
Stockage à l'abri des intempéries	oui	Gestion des déchets solides	GES	sans dimension	6,00	Stockage à l'abri des intempéries et sur sol étanche : très bon; Stockage sur sol étanche : bon; Stockage à l'abri des intempéries: moins bon; stockage sauvage: mauvais		très bon	10
Stockage sur sol étanche	oui								
indice de risques	0,02	Indice de risques	IR	sans dimension	0,02	IR>1 : possibilité d'apparition d'un effet toxique; IR<1: effet toxique peu probable		bon	10

ANNEXE 13 : TABLEAU DE BORD DE LA SOCIÉTÉ B

DONNEES / PARAMETRES	VALEUR PARAMETRE	INDICATEUR	UNITES	VALEUR INDICATEUR	ECHELLE		CONFORMITE	NOTE ECHELLE N _{Indicateur}	CRITERE	IMPACT DU CRITERE IC	POIDS CRITERE	SOUS-SYSTEME	POIDS SOUS-SYSTEME	IMPACT PONDERE CRITERE IPC
Niveau sonore mesuré à l'extérieur	42	Mesure du bruit à l'extérieur de l'atelier	NS1	dB(A)	42	échelle réglementaire: émergence en semaine de 7h à 22h	conforme	10	Population	0,94	1	Social	0,35	0,33
émergence	5								Eau	0,90	0,65			0,19
Niveau sonore mesuré dans l'atelier	40	Mesure du bruit à l'intérieur	NS2	sans dimension	40	Niveau de gêne	calme	10	Air	1,00	0,13	Ecosystème	0,32	0,04
pH des rejets	7,65	pH des rejets	pH	sans dimension	7,65	pH réglementaire	conforme	10	Sol	0,50	0,21			0,03
température	16,9	température des rejets	T	°C	13,1	T réglementaire	conforme	10	Client	1,00	1	Economique	0,33	0,33
DCO	180	Indice de biodégradabilité des rejets en eau	Ibiodég	sans dimension	2,12	biodégradabilité	biodégradable	5	Environnement de travail	0,88	0,63	Opérateurs	0,35	0,19
DBO5	85								Sécurité	0,73	0,37			0,09
Concentration du bain de traitement le plus contraignant à t=0, C _b (g/L)	Non nécessaire	Entrainement (ml/m ²)	e	L/m ²	2,64	indicateur de suivi	sans effet	10	Approvisionnement	1,00	0,2	Opérations	0,26	0,05
Concentration dans le bain de rinçage associé à t=0, Cr ₀ (g/L)									Production	0,80	0,37			0,08
Concentration dans le bain de rinçage associé à t=0, (C _{rg} /L)									Entretien	1,00	0,19			0,05
Surface des pièces rincées entre t= et t>0, S (m ²)									Détoxication	1,00	0,24			0,06
Volume du bain de rinçage, V									Perspective	0,83	0,22			0,07
nombre d'heures de tenue au brouillard salin en rouille blanche (h)	70	Caractéristiques anti-corrosion	BS	heures	70	Classe du cahier des charges	très bon	10	Perspective client	1,00	0,43	Stratégie d'entreprise	0,39	0,17
niveau global de risques (voir tables)	IV	Niveau global de risques	NGR	sans dimension	IV	6 niveaux de risque : niveau I très haut niveau de risque, niveau VI: très bas niveau de risque	moyennement bas	6	Processus internes	0,50	0,16			0,03
Nombre de personnel présent en moyenne par mois	129	Taux de présentéisme	Tprésent	%	99%	échelle établie à partir du questionnaire	très bon	10	Perspective organisationnelle	1,00	0,19			0,07
Effectif total	130											Perf=ΣIPCx		1,79
Nombre de personnel formé	5	Taux de formation du personnel	Tformation	%	83,3%	échelle établie à partir du questionnaire	Fort	10						
Nombre d'accidents et d'arrêts pour les 6 derniers mois	0	Taux de fréquence des accidents du travail	Faccident	%	0	échelle donnée par la CRAM	très bon résultat	10						
Nombre d'heures travaillées pour les 6 derniers mois	1920													
Investissement annuel en matériel (€)	10139	Taux de renouvellement de l'équipement	Réquip	%	13,52%	échelle établie à partir du questionnaire	Fort	10						
Chiffre d'affaires annuel	15000000	Taux de valeur ajoutée: (CA-coûts)/CA	VA	%	50,0%	Définie à partir des statistiques du secteur (sessi)	moyen	6,6						
Coûts de production annuels (€)	7500000	Productivité apparente du travail	Tprod	€/pers	57692,31	Définie à partir des statistiques du secteur (sessi)	fort	10						
enquête sur le niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	1	Niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	odeur in	sans dimension	1	échelle assez subjective	Non gêné	7,5						

enquête sur le niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	1	Niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	odeur ext	sans dimension	1	échelle assez subjective	0: pas d'odeur; 1: Non gêné; 2: Peu gêné; 3: Gêné; 4: très gêné; 5:extrêmement gêné	Non gêné	7,5
Phrases de risque classifiant les substances toxiques	r53 r50	Indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide	lpoll	sans dimension	r53 r50	échelle de 6 niveaux donnés par Tixier	6:très toxique; 5:assez toxique; 4:toxique ; 3: assez nocif; 2:nocif; 1: peu nocif; 0: faiblement nocif	très toxique	0
Q est calculé sur site	7,39	Consommation spécifique	Q	L/m2/ldr	7,39	échelle de conformité réglementaire	Q<8: bon; Q=8:limite;Q>8: non-conforme	bon	10
Nombre de pièces rebutées	Non nécessaire	Taux de rebuts	Trebuts	%	0,5%	échelle établie à partir du questionnaire	<1%: très satisfait; <3%:relativement satisfait; <5% ni satisfait ni mécontent; <10%relativement mécontent; >10%inadmissible	très satisfait	10
Nombre de pièces réalisées									
Nombre d'éléments conformes pour l'eau	18	Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée	Ce	sans dimension	0	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	conforme	10
Nombre d'éléments surveillés pour l'eau	18								
Nombre d'éléments conformes pour l'air	6	Charge toxique et polluante dans l'air	Ca	sans dimension	0	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	conforme	10
Nombre d'éléments surveillés pour l'air	6								
Nombre d'éléments dont la concentration dans les rejets aqueux a diminué ou est stable	1	Suivi de charge toxique et polluante dans l'eau	Sce	sans dimension	0,0	échelle: si SCE<0: moins bon, si SCE> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les rejets aqueux a augmenté	1								
Nombre d'éléments dont la concentration dans les rejets gazeux a diminué ou est stable	1	Suivi de charge toxique et polluante dans l'air	Sca	sans dimension	0,0	échelle: si SCA<0: moins bon, si SCA> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les rejets gazeux a augmenté	1								
Phrases de risque classifiant les substances inflammables	r15	Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique	lft	sans dimension	r15	échelle de 3 classe de dangerosité donnée par Tixier	3: extrêmement inflammable; 2:facilement inflammable ; 1: inflammable; 0: faiblement inflammable	facilement inflammable	3,3
Phrase de risque classifiant les substances explosives	NC	Indice de dangerosité pour un effet de surpression	lsurp	sans dimension	NC	échelle de 3 classesde dangerosité donnée par Tixier	3: explosif sensible; 2:Explosif ; 1: possibilité d'être explosif; 0: non explosif	non explosif	10
Nombre de rapport de dilution optimaux :Par exemple bain de dépôts:<5000:bon:	12	Taux de conformité au rapport de dilution des bains de rinçage	Rd	sans dimension	1,00	échelle à confirmer	>80%: très bon; >70%: bon; >60%: moins bon;<50%:mauvais	très bon	10
Nombre de fonction de rinçages	12								
Capacité de production (m2/j estimée)	289,06	Taux d'utilisation de l'équipement	Uequip	%	0,4	3 niveaux	<50% peu utilisé; 50<Uequip<75%: utilisé; >75%: très utilisé	peu utilisé	0
Quantité de déchets réutilisés	0	Indicateur d'utilisation déchet (%)	Ud	%	0,0	4 niveaux	<25% moyen;25<Ud<50%:bon; 50<Ud<75%: très bon; >75%: excellent	moyen	0
temps nécessaire au traitement d'un mètre carré de surface	4,53	Productivité opérationnelle	PO	minute	4,5	échelle: si PO< valeur à t=0: bon, si PO> valeur à t=0:moins bon		sans effet	10
Énergie consommée (kWh/j)	1227	Indicateurs d'intensité énergétique	lénergie	kWh/m2	9,6	échelle: si lénergie< valeur à t=0: bon, si lénergie> valeur à t=0:moins	9,6	sans effet	10
production (m2/j)	128,32								
Masse de M 1ère utilisée (kg/j)	91,2	Indicateur intensité matière première	Imp	kg/m2	0,7	échelle: si Imp< valeur à t=0: bon, si Imp> valeur à t=0:moins bon	0,7	sans effet	10
Masse de déchets générés (kg/j)	3200	indicateur d'intensité déchet	ldéchet	kg/m2	24,9	échelle: si ldéchet< valeur à t=0: bon, si ldéchet> valeur à t=0:moins	24,9	sans effet	10
Quantité de réactifs utilisés en station (kg/j)	179,5	Quantité de réactifs utilisés en station	réactifs	kg/m3	8,3	échelle: si réactifs< valeur à t=0: bon, si réactifs> valeur à t=0:moins bon	8,321743162	sans effet	10
Volume d'effluent traité par jour m3/j)	21,57								
nombre de clients	1	Gain de clientèle	Gclient	clients	1,0	échelle: si Gclient> valeur à t=0: bon, si Gclient< valeur à t=0:moins	1	sans effet	10
Excès de risque individuel	3,50E-06	Excès de risque individuel	ERI	sans dimension	3.5E-06	ERI>10 ⁻⁵ : possibilité d'apparition d'un effet toxique; ERI<10 ⁻⁵ : effet toxique peu probable		bon	10
Masse de boues produites (kg/j)	50	intensité boues	boues	kg/m2	0,39	échelle: si boues< valeur à t=0: bon, si boues> valeur à t=0:moins bon	0,39	sans effet	10
Stockage à l'abri des intempéries	oui	Gestion des déchets solides	GES	sans dimension	6,00	Stockage à l'abri des intempéries et sur sol étanche : très bon; Stockage sur sol étanche : bon; Stockage à l'abris des intempéries: moins bon; stockage sauvage: mauvais		très bon	10
Stockage sur sol étanche	oui								
indice de risques	0,41	Indice de risques	IR	sans dimension	0,4	IR>1 : possibilité d'apparition d'un effet toxique; IR<1: effet toxique peu probable		bon	10

ANNEXE 14 : TABLEAU DE BORD DE LA SOCIÉTÉ C

DONNEES / PARAMETRES	VALEUR PARAMETRE	INDICATEUR		UNITES	VALEUR INDICATEUR	ECHELLE		CONFORMITE	NOTE ECHELLE N _{Indicateur}	CRITERE	IMPACT DU CRITERE IC	POIDS CRITERE	SOUS-SYSTEME	POIDS SOUS-SYSTEME	IMPACT PONDERE CRITERE IPC									
Niveau sonore mesuré à l'extérieur	42	Mesure du bruit à l'extérieur de l'atelier	NS1	dB(A)	42	échelle réglementaire émergence en semaine de 7h à 22h	<6dB si NS<45dB: conforme; >6dB si NS<45dB: non conforme; <5dB si NS<45dB: conforme; >5dB si NS<45dB: non conforme	conforme	10	Population	1	1	Social	0,35	0,35									
émergence	5				Eau					0,8	0,65	Ecosystème				0,32	0,17							
Niveau sonore mesuré dans l'atelier	65	Mesure du bruit à l'intérieur	NS2	sans dimension	65	Niveau de gêne	De 0 à 60 dB(A) : Calme. De 60 à 85 dB(A) : Gênant. De 85 à 100dB(A) : nocif. Supérieur à 100 dB(A): insupportable	gênant	10	Air	1		0,13	Ecosystème	0,32			0,04						
pH des rejets	8	pH des rejets	pH	sans dimension	8	pH réglementaire	<6,5: non conforme; 6,5-pH<9: conforme; >9:nonconforme	conforme	10	Sol	1,00	0,21	Ecosystème			0,32	0,07							
température	20	température des rejets	T	°C	10	T réglementaire	<30°C: conforme; >30°C: non conforme	conforme	10	Client	1	1		Economique	0,33			0,33						
DCO	115	Indice de biodégradabilité des rejets en eau	Ibiodég	sans dimension	28,75	biodégradabilité	<2: facilement biodégradable; <3: biodégradable; >3: non biodégradable	non biodégradable	0	Environnement de travail	0,88	0,63	Opérateurs	0,35	0,19									
DBO5	4									Sécurité	0,85	0,37				Opérations	0,26	0,11						
Concentration du bain de traitement le plus contraignant à t=0, Cb (g/L)	Non nécessaire	Entrainement (l/m2)	e	L/m2	0	indicateur de suivi	échelle: si entrainement< valeur à t=0: bon; si entrainement> valeur à t=0: moins bon (valeur à t=0: 2,64)	bon	10	Approvisionnement	1	0,2	Opérations	0,26	0,05									
Concentration dans le bain de rinçage associé à t=0, Cr0 (g/L)	0									Production	1,00	0,37				Opérations	0,26	0,10						
Concentration dans le bain de rinçage associé à t>0, (Crq/L)										Entretien	1	0,19							Opérations	0,26	0,05			
Surface des pièces rincées entre t= et t>0, S (m2)										Détoxication	1	0,24										Opérations	0,26	0,06
Volume du bain de rinçage, V										Perspective financière	0,66	0,22												
ampérage	2	épaisseur de la couche	EC	µm	2	Classe du cahier des charges	EC=> EC cahier des charges: conforme; EC<EC cahier des charges: non conforme	conforme	10	Perspective client	1	0,43	Stratégie d'entreprise	0,39	0,17									
durée du revêtement										Processus internes	1	0,16				Stratégie d'entreprise	0,39	0,06						
niveau global de risques (voir tables)	III	Niveau global de risques	NGR	sans dimension	III	6 niveaux de risque : niveau I très haut niveau de risque, niveau II, très hae	I : très haut;II: haut;III: moyennement haut; IV:moyennement bas; V:bas et V:très bas	moyennement haut	4	Perspective organisationnelle	0,5	0,19	Stratégie d'entreprise	0,39	0,04									
Nombre de personnel présent en moyenne par mois	17	Taux de présentisme	Tprésent	%	100%	échelle établie à partir du questionnaire	>98% très bon; 96-Tp<98%:bon; >90-Tp<96%: médiane; <90%: inadmissible	très bon	10							Stratégie d'entreprise	0,39	1,84						
Effectif total	17												Stratégie d'entreprise	0,39	1,84									
Nombre de personnel formé	2	Taux de formation du personnel	Tformation	%	11,8%	échelle établie à partir du questionnaire	>75% fort; >50% moyen; <50% faible	Faible	0							Stratégie d'entreprise	0,39	1,84						
Nombre d'accidents et d'arrêts pour les 6 derniers mois	1	Taux de fréquence des accidents du travail	Faccident	%	4,90	échelle donnée par la CRAM	Face<20: très bon résultat; 20<Face<30: bon résultat; 30<Face<40 assez bon résultat; Face>40: résultat moins bon	très bon résultat	10				Stratégie d'entreprise	0,39	1,84									
Nombre d'heures travaillées pour les 6 derniers mois	20400																			Stratégie d'entreprise	0,39	1,84		
Investissement annuel en matériel (€)	150000	Taux de renouvellement de l'équipement	Réquip	%	10,72%	échelle établie à partir du questionnaire	<5%: faible; 5<Req<10%: moyen; Req >10%: Fort	Fort	10				Stratégie d'entreprise	0,39	1,84									
Chiffre d'affaires annuel	1399766	Taux de valeur ajoutée: (CA-coûts)/CA	VA	%	40,0%	Définie à partir des statistiques du secteur (sessi)	<20% très faible; <40% faible; 40%<Taux moyen des PMI du secteur<60%; >60% fort	moyen	6,6							Stratégie d'entreprise	0,39	1,84						

enquête sur le niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	1	Niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	odeur in	sans dimension	1	échelle assez subjective	0: pas d'odeur; 1: Non gêné; 2: Peu gêné; 3: Gêné; 4: très gêné; 5:extrêmement gêné	Non gêné	7,5
enquête sur le niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	0	Niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	odeur ext	sans dimension	0	échelle assez subjective	0: pas d'odeur; 1: Non gêné; 2: Peu gêné; 3: Gêné; 4: très gêné; 5:extrêmement gêné	Pas d'odeur	10
Phrases de risque classifiant les substances toxiques	-	Indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide	Ipoll	sans dimension	-	échelle de 6 niveaux donnés par Tixier	6:très toxique; 5:assez toxique; 4:toxique; 3: assez nocif; 2:nocif; 1: peu nocif; 0: faiblement nocif	faiblement nocif	10
Q est calculé sur site	7,4	Consommation spécifique	Q	L/m2/ldr	7,42721331	échelle de conformité réglementaire	Q<8: bon; Q<8: limite; Q<8: non conforme	bon	10
Nombre de pertes	0,5%	Taux de pertes	Trebuts	%	0,5%	échelle établie à partir du questionnaire	<1%: très satisfait; <3%:relativement satisfait; <5%: ni satisfait ni mécontent; <10%:relativement mécontent; >10%:inadmissible	très satisfait	10
Nombre de pièces réalisées									
Nombre d'éléments conformes pour l'eau	8	Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée	Ce	sans dimension	0	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	conforme	10
Nombre d'éléments surveillés pour l'eau	8								
Nombre d'éléments conformes pour l'air	4	Charge toxique et polluante dans l'air	Ca	sans dimension	0	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	conforme	10
Nombre d'éléments surveillés pour l'air	4								
Nombre d'éléments dont la concentration dans	1	Suivi de charge toxique et polluante dans l'eau	Sce	sans dimension	0,0	échelle: si SCe<0: moins bon, si SCe> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les	1								
Nombre d'éléments dont la concentration dans	1	Suivi de charge toxique et polluante dans l'air	Sca	sans dimension	0,0	échelle: si SCa<0: moins bon, si SCa> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les	1								
Phrases de risque classifiant les substances inflammables	-	Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique	lft	sans dimension	-	échelle de 3 classe de dangerosité donnée par Tixier	3: extrêmement inflammable; 2:facilement inflammable; 1: inflammable; 0: faiblement inflammable	faiblement inflammable	10
Phrase de risque classifiant les substances explosives	-	Indice de dangerosité pour un effet de surpression	lsurp	sans dimension	-	échelle de 3 classes de dangerosité donnée par Tixier	3: explosif sensible; 2:Explosif; 1: possibilité d'être explosif; 0: non explosif	non explosif	10
Nombre de rapport de dilution optimaux :Par exemple bain de dégraiss:<5000:bon	18	Taux de conformité au rapport de dilution des bains de rinçage	Rd	sans dimension	1,00	échelle à confirmer	>80%: très bon; >70%: bon; >60%: moins bon;>50%:mauvais	très bon	10
Nombre de fonction de rinçages	18								
Capacité de production (m2j) estimée)	208,33	Taux d'utilisation de l'équipement	Uéquip	%	0,9	3 niveaux	<50%: peu utilisé; 50-Uéquip>75%: utilisé; >75%: très utilisé	très utilisé	10
Quantité de déchets réutilisés	20,83	Indicateur d'utilisation déchet (%)	Ud	%	83,3	4 niveaux	<25%: moyen; 25-44%:50%:bon; 50-64%:75%: très bon; >75%: excellent	excellent	10
temps nécessaire au traitement d'un mètre carré de surface	120,00	Productivité opérationnelle	PO	minute	120,0	échelle: si PO< valeur à t=0: bon, si PO> valeur à t=0:moins bon		sans effet	10
Énergie consommée (kWh/j)	503,40	Indicateurs d'intensité énergétique	lénergie	kWh/m2	2,7	échelle: si lnergie< valeur à t=0: bon, si lnergie> valeur à t=0:moins bon	2,7	sans effet	10
production (m2j)	187,50								
Masse de M 1ère utilisée (kg/j)	83,33	Indicateur intensité matière première	Imp	kg/m2	0,4	échelle: si Imp< valeur à t=0: bon, si Imp> valeur à t=0:moins bon	0,4	sans effet	10
Masse de déchets générés (kg/j)	25,00	indicateur d'intensité déchet	ldéchet	kg/m2	0,1	échelle: si ldéchet< valeur à t=0: bon, si ldéchet> valeur à t=0:moins bon	0,1	sans effet	10
Quantité de réactifs utilisés en station (kg/j)	4,38	Quantité de réactifs utilisés en station	réactifs	kg/m3	0,2	échelle: si réactifs< valeur à t=0: bon, si réactifs> valeur à t=0:moins bon		sans effet	10
Volume d'effluent traité par jour m3/j)	25,00								
nombre de clients	50	Gain de clientèle	Gclient	clients	50,0	échelle: si Gclient< valeur à t=0: bon, si Gclient> valeur à t=0:moins bon	3	sans effet	10
Excès de risque individuel	0,00E+00	Excès de risque individuel	ERI	sans dimension	0,0E+00	ERI>10 ⁻³ : possibilité d'apparition d'un effet toxique; ERI<10 ⁻³ : effet toxique peu probable		bon	10
Masse de boues produites (kg/j)	6,25	intensité boues	boues	kg/m2	0,03	échelle: si boues< valeur à t=0: bon, si boues> valeur	6,25	bon	10

Stockage à l'abri des intempéries	oui	Gestion des déchets solides	GES	sans dimension	6,00	Stockage à l'abri des intempéries et sur sol étanche : très bon; Stockage sur sol étanche : bon; Stockage à l'abris des intempéries: moins bon; stockage sauvage: mauvais	très bon	10
Stockage sur sol étanche	oui							
Indice de risques	0,00E+00	Indice de risques	IR	sans dimension	0,0	IR>1 : possibilité d'apparition d'un effet toxique; IR<1: effet toxique peu probable	bon	10

ANNEXE 15:ÉTUDE DE CAS « RÉSINES »

Tableau : Attribution de poids et d'échelles aux critères

		Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxification	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
Poids des critères		1	0	0	1	0	0,1	0,2	0,3	1	0	0	1	1	1	0,5
Échelles		0-10	3-7	3-7	0-10	3-7	3-7	3-7	3-7	0-10	3-7	3-7	0-10	0-10	0-10	2-8

Tableau : Pratiques de production propre et leur évaluation aux yeux des critères

Pratiques sélectionnées																	
			Eau	Air	Sol	Population	Client	Sécurité	Environnement de travail	Entretien	Production	Détoxification	Approvisionnement	Clients (stratégie)	Financier	Processus internes	Organisation
	Évaporation	P1	10,00	3,66	5,00	1,66	7,00	3,66	5,00	6,33	6,66	4,33	4,33	8,33	0,00	5,00	4,00
	Résines échangeuses d'ions	P2	10,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,66	10,00	4,33	3,66	8,33	3,30	5,00	5,00
Osiose inverse	P3	8,33	5,00	5,00	5,00	6,33	4,33	5,00	6,33	10,00	5,66	6,33	5,00	8,33	6,66	7,00	

Tableau : Calcul de l'indice de concordance et de l'indice de discordance

P: somme des poids		7,1		
INDICE DE CONCORDANCE		Pratique 1	Pratique 2	Pratique 3
Pratique 1		1,00	0,96	0,72
Pratique 2		0,49	1,00	0,70
Pratique 3		0,35	0,68	1,00
INDICE DE DISCORDANCE		Pratique 1	Pratique 2	Pratique 3
Pratique 1		0	0,2	0,333
Pratique 2		0,334	0	0,333
Pratique 3		0,833	0,503	0

Tableau : Établissement des relations de surclassement

seuils de surclassement 0,7/0,2/1				
SURCLASSEMENT		Pratique 1	Pratique 2	Pratique 3
Pratique 1		x	x	
Pratique 2			x	
Pratique 3				x

Tableau de bord de la société A avant la mise en œuvre des résines

DONNEES / PARAMETRES	VALEUR PARAMETRE	INDICATEUR	UNITES	VALEUR INDICATEUR	ECHELLE		CONFORMITE	NOTE ECHELLE N _{Indicateur}	CRITERE	IMPACT DU CRITERE IC	POIDS CRITERE	SOUS-SYSTEME	POIDS SOUS-SYSTEME	IMPACT PONDERE CRITERE IPC
Niveau sonore mesuré à l'extérieur	45	Mesure du bruit à l'extérieur de l'atelier	NS1	dB(A)	45	échelle réglementaire-émergence en semaine de 7h à 22h	conforme	10	Population	1,00	1	Social	0,35	0,35
émergence	5								Eau	0,80	0,65			0,17
Niveau sonore mesuré dans l'atelier	40	Mesure du bruit à l'intérieur	NS2	sans dimension	40	Niveau de gêne	calme	10	Air	1,00	0,13	Ecosystème	0,32	0,04
pH des rejets	7,4	pH des rejets	pH	sans dimension	7,4	pH réglementaire	conforme	10	Sol	0,50	0,21			0,03
température	13,18	température des rejets	T	°C	16,82	T réglementaire	conforme	10	Client	1,00	1	Economique	0,33	0,33
DCO	154	Indice de biodégradabilité des rejets en eau	Ibiodég	sans dimension	1,81	biodégradabilité	facilement biodégradable	10	Conditions de travail	0,88	0,63	Opérateurs	0,35	0,19
DBO5	85								Hygiène et Sécurité	0,95	0,37			0,12
Concentration du bain de traitement le plus contraignant à t=0, Cb (g/L)	Non nécessaire	Entrainement (ml/m2)	e	L/m2	2,64	indicateur de suivi	sans effet	10	Approvisionnement	1,00	0,2	Opérations	0,26	0,05
Concentration dans le bain de rinçage associé à t=0, Cr0 (g/L)									Production	0,80	0,37			0,08
Concentration dans le bain de rinçage associé à t>0, (Crq/L)									Entretien	1,00	0,19			0,05
Surface des pièces rincées entre t= et t>0, S (m2)									Détoxication	1,00	0,24			0,06
Volume du bain de rinçage, V									Perspective	1,00	0,22			0,09
nombre d'heures de tenue au brouillard salin en rouille blanche (h)	120	Caractéristiques anti-corrosion	BS	heures	120	Classe du cahier des charges	bon	5	Perspective client	0,63	0,43	Stratégie d'entreprise	0,39	0,10
niveau global de risques (voir tables)	V	Niveau global de risques	NGR	sans dimension	V	6 niveaux de risque : niveau I très haut niveau de risque, niveau VI: très bas niveau de risque	bas	8	Processus internes	1,00	0,16			0,06
Nombre de personnel présent en moyenne par mois	29	Taux de présentisme	Tprésent	%	100%	échelle établie à partir du questionnaire	très bon	10	Perspective organisationnelle	1,00	0,19			0,07
Effectif total	29											Perf=ΣIPCx		1,81
Nombre de personnel formé	29	Taux de formation du personnel	Tformation	%	100,0%	échelle établie à partir du questionnaire	Fort	10						
Nombre d'accidents et d'arrêts pour les 6 derniers mois	0	Taux de fréquence des accidents du travail	Faccident	%	0	échelle donnée par la CRAM	très bon résultat	10						
Nombre d'heures travaillées pour les 6 derniers mois	52920													
Investissement annuel en matériel (€)	200000	Taux de renouvellement de l'équipement	Réquip	%	266,67%	échelle établie à partir du questionnaire	Fort	10						
Chiffre d'affaires annuel	15000000	Taux de valeur ajoutée; (CA-coûts)/CA	VA	%	98,5%	Définie à partir des statistiques du secteur (sessi)	très bon	10						
Coûts de production annuels (€)	220437	Productivité apparente du travail	Tprod	€/pers	509640,10	Définie à partir des statistiques du secteur	fort	10						
enquête sur le niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	1	Niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	odeur in	sans dimension	1	échelle assez subjective	Non gêné	7,5						
enquête sur le niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	0	Niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	odeur ext	sans dimension	0	échelle assez subjective	Pas d'odeur	10						
Phrases de risque classifiant les substances toxiques	r53 r50	Indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide	Ipoll	sans dimension	r53 r50	échelle de 6 niveaux donnés par Toxir	très toxique	0						
Q est calculé sur site	7,35	Consommation spécifique	Q	L/m2/ldr	7,35	échelle de conformité réglementaire	bon	10						
Nombre de réclamations	Non nécessaire	Taux de satisfaction des clients	Tatisf	%	2,9%	échelle établie à partir du questionnaire	relativement satisfait	7,5						
Nombre de pièces réalisées														

Nombre d'éléments conformes pour l'eau	11	Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée	Ce	sans dimension	2	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	non conforme	0
Nombre d'éléments surveillés pour l'eau	13								
Nombre d'éléments conformes pour l'air	7	Charge toxique et polluante dans l'air	Ca	sans dimension	0	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	conforme	10
Nombre d'éléments surveillés pour l'air	7								
Nombre d'éléments dont la concentration dans les rejets aqueux a diminué ou est stable	0	Suivi de charge toxique et polluante dans l'eau	Sce	sans dimension	0,0	échelle: si SCE<0: moins bon, si SCE> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les rejets aqueux a augmenté	0								
Nombre d'éléments dont la concentration dans les rejets gazeux a diminué ou est stable	0	Suivi de charge toxique et polluante dans l'air	Sca	sans dimension	0,0	échelle: si SCA<0: moins bon, si SCA> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les rejets gazeux a augmenté	0								
Phrases de risque classifiant les substances inflammables	NC	Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique	lft	sans dimension	NC	échelle de 3 classe de dangerosité donnée par Tixier	3: extrêmement inflammable; 2:facilement inflammable; 1: inflammable; 0: faiblement inflammable	faiblement inflammable	10
Phrase de risque classifiant les substances explosives	NC	Indice de dangerosité pour un effet de surpression	Isurp	sans dimension	NC	échelle de 3 classes de dangerosité donnée par Tixier	3: explosif sensible; 2:Explosif; 1: possibilité d'être explosif; 0: non explosif	non explosif	10
Nombre de rapport de dilution optimaux :Par exemple bain de dépôts:<5000:bon; 5000<Rd<10000: optimal>2000:moins bon	36	Taux de conformité au rapport de dilution des bains de rinçage	Rd	sans dimension	1,00	échelle à confirmer	>80%: très bon; >70%: bon; >60%: moins bon;<50%:mauvais	très bon	10
Nombre de fonction de rinçages	36								
Capacité de production (m2/j estimée) 2002	824	Taux d'utilisation de l'équipement	Uequip	%	0,8	3 niveaux	<50% peu utilisé; 50<Uequip<75%: utilisé; >75%: très utilisé	très utilisé	10
Quantité de déchets réutilisés	49,32	Indicateur d'utilisation déchet (%)	Ud	%	0,2	4 niveaux	<25% moyen;25<Ud<50%:bon; 50<Ud<75%: très bon; >75%: excellent	moyen	0
temps nécessaire au traitement d'un mètre carré de surface	2,16	Productivité opérationnelle	PO	minute	2,2	échelle: si PO< valeur à t=0: bon, si PO> valeur à t=0:moins bon		sans effet	10
Énergie consommée (kWh/j)	15,17	Indicateurs d'intensité énergétique	lénergie	kWh/m2	2,28E-02	échelle: si lénergie< valeur à t=0: bon, si lénergie> valeur à t=0:moins bon	0,02	sans effet	10
production (m2/j)	665								
Masse de M 1ère utilisée (kg/j)	147,2	Indicateur intensité matière première	Imp	kg/m2	0,22	échelle: si Imp< valeur à t=0: bon, si Imp> valeur à t=0:moins bon	0,6	bon	10
Masse de déchets générés (kg/j)	246,58	indicateur d'intensité déchet	ldéchet	kg/m2	0,37	échelle: si ldéchet< valeur à t=0: bon, si ldéchet> valeur à t=0:moins bon	0,4	sans effet	10
Quantité de réactifs utilisés en station (kg/j)	180	Quantité de réactifs utilisés en station	réactifs	kg/m3	8,34	échelle: si réactifs< valeur à t=0: bon, si réactifs> valeur à t=0:moins bon	9,83	bon	10
Volume d'effluent traité par jour m3/j)	21,57								
nombre de clients	10	Gain de clientèle	Gclient	clients	10,00	échelle: si Gclient> valeur à t=0: bon, si Gclient< valeur à t=0:moins bon	10	sans effet	10
Excès de risque individuel	1,14E-07	Excès de risque individuel	ERI	sans dimension	0,00	ERI>10 ⁻⁵ : possibilité d'apparition d'un effet toxique; ERI<10 ⁻⁵ : effet toxique peu probable		bon	10
Masse de boues produites (kg/j)	96,86	intensité boues	boues	kg/m2	0,15	échelle: si boues< valeur à t=0: bon, si boues> valeur à t=0:moins bon	0,15	sans effet	10
Stockage à l'abri des intempéries	oui	Gestion des déchets solides	GES	sans dimension	6,00	Stockage à l'abri des intempéries et sur sol étanche : très bon; Stockage sur sol étanche : bon; Stockage à l'abri des intempéries: moins bon; stockage sauvage: mauvais		très bon	10
Stockage sur sol étanche	oui								
indice de risques	0,02	Indice de risques	IR	sans dimension	0,02	IR>1 : possibilité d'apparition d'un effet toxique; IR<1: effet toxique peu probable		bon	10

Tableau de bord de la société A après la mise en œuvre des résines

DONNEES / PARAMETRES	VALEUR PARAMETRE	INDICATEUR		UNITES	VALEUR INDICATEUR	ECHELLE		CONFORMITE	NOTE ECHELLE N _{Indicateur}	CRITERE	IMPACT DU CRITERE IC	POIDS CRITERE	SOUS-SYSTEME	POIDS SOUS-SYSTEME	IMPACT PONDERE CRITERE IPC	
Niveau sonore mesuré à l'extérieur	45	Mesure du bruit à l'extérieur de l'atelier	NS1	dB(A)	45	échelle réglementaire:émergence en semaine de 7h à 22h	<6dBSi NS<45dB: conforme; >6dB si NS<45dB: non-conforme; <5dBSi NS>45dB: conforme; >5dB si NS>45dB: non-conforme	conforme	10	Population	1,00	1	Social	0,35	0,35	
émergence	5				Eau					1,00	0,65	0,21				
Niveau sonore mesuré dans l'atelier	40	Mesure du bruit à l'intérieur	NS2	sans dimension	40	Niveau de gêne	De 0 à 60 dB(A) : Calme, De 60 à 85 dB(A) : Gênant, De 85 à 100dB(A) : nocif. Supérieur à 100 dB(A): insupportable	calme	10	Air	1,00	0,13	Ecosystème	0,32	0,04	
pH des rejets	7,4	pH des rejets	pH	sans dimension	7,4	pH réglementaire	<6.5: non-conforme; 6.5<pH<9: conforme; >9:nonconforme	conforme	10	Sol	0,50	0,21			0,03	
température	13,18	température des rejets	T	°C	16,82	T réglementaire	<30°C: conforme; >30°C: non-conforme	conforme	10	Client	1,00	1	Economique	0,33	0,33	
DCO	154	Indice de biodégradabilité des rejets en eau	Ibiodèg	sans dimension	1,81	biodégradabilité	<2: facilement biodégradable; <3:biodégradable; >3 non biodégradable	facilement biodégradable	10	Environnement de travail	0,88	0,63	Opérateurs	0,35	0,19	
DBO5	85									Sécurité	0,95	0,37				0,12
Concentration du bain de traitement le plus contraignant à t=0, Cb (g/L)	Non nécessaire	Entrainement (ml/m2)	e	L/m2	2,64	indicateur de suivi	échelle: si entrainement< valeur à t=0: bon, si entrainement> valeur à t=0:moins bon (valeur à t=0: 2,64)	sans effet	10	Approvisionnement	1,00	0,2	Opérations	0,26	0,05	
Concentration dans le bain de rinçage associé à t=0, Cr0 (g/L)										Production	0,87	0,37				0,08
Concentration dans le bain de rinçage associé à t>0, (Crg/L)										Entretien	1,00	0,19				0,05
Surface des pièces rincées entre t= et t>0, S (m2)										Détoxication	1,00	0,24				0,06
Volume du bain de rinçage, V										Perspective	1,00	0,22				0,09
nombre d'heures de tenue au brouillard salin en rouille blanche (h)	119	Caractéristiques anti-corrosion	BS	heures	119	Classe du cahier des charges	BS>400h: très bon; BS<192h bon;BS<120h: mauvais;	mauvais	0	Perspective client	0,38	0,43	Stratégie d'entreprise	0,39	0,06	
niveau global de risques (voir tables)	V	Niveau global de risques	NGR	sans dimension	V	6 niveaux de risque : niveau I très haut niveau de risque, niveau VI: très bas niveau de risque	I : très haut;II: haut;III: moyennement haut; IV: moyennement bas; V: bas et VI:très bas	bas	8	Processus internes	1,00	0,16			0,06	
Nombre de personnel présent en moyenne par mois	29	Taux de présentéisme	Tprésent	%	100%	échelle établie à partir du questionnaire	>98% très bon; 96<Tp<98%:bon; 90<Tp<96%: médiocre; <90% inadmissible	très bon	10	Perspective organisationnelle	1,00	0,19			0,07	
Effectif total	29														Perf=ΣIPCx	1,81
Nombre de personnel formé	29	Taux de formation du personnel	Tformation	%	100,0%	échelle établie à partir du questionnaire	>75% fort; >50% moyen; <50% faible	Fort	10							
Nombre d'accidents et d'arrêts pour les 6 derniers mois	0	Taux de fréquence des accidents du travail	Faccident	%	0	échelle donnée par la CRAM	Facc<20: très bon résultat; 20<Facc<30: bon résultat; 30<Facc<40 assez bon résultat; Facc<40: résultat moins bon	très bon résultat	10							
Nombre d'heures travaillées pour les 6 derniers mois	52920															
Investissement annuel en matériel (€)	200000	Taux de renouvellement de l'équipement	Réquip	%	266,67%	échelle établie à partir du questionnaire	<5%: faible; 5<Réq<10%: moyen; Réq >10%: Fort	Fort	10							
Chiffre d'affaires annuel	15000000	Taux de valeur ajoutée: (CA-coûts)/CA	VA	%	98,5%	Définie à partir des statistiques du secteur (sessi)	<20% très faible; <40% faible; 40%;<Taux moyen des PMI du secteur;<60%; >60%fort	très bon	10							
Coûts de production annuels (€)	220437	Productivité apparente du travail	Tprod	€/pers	509640,10	Définie à partir des statistiques du secteur (sessi)	<20000 très faible; <30000 faible; 30000;<Taux moyen PMI du secteur<50000; >50000fort	fort	10							
enquête sur le niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	1	Niveau d'odeur à l'intérieur de l'atelier	odeur in	sans dimension	1	échelle assez subjective	0: pas d'odeur; 1: Non gêné; 2: Peu gêné; 3: Gêné; 4: très gêné; 5:extrêmement gêné	Non gêné	7,5							
enquête sur le niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	0	Niveau d'odeur à l'extérieur de l'atelier	odeur ext	sans dimension	0	échelle assez subjective	0: pas d'odeur; 1: Non gêné; 2: Peu gêné; 3: Gêné; 4: très gêné; 5:extrêmement gêné	Pas d'odeur	10							
Phrases de risque classifiant les substances toxiques	r53 r50	Indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide	lpoll	sans dimension	r53 r50	échelle de 6 niveaux donnés par Tixier	6:très toxique; 5:assez toxique; 4:toxique ; 3: assez nocif; 2:nocif; 1: peu nocif; 0: faiblement nocif	très toxique	0							
Q est calculé sur site	7,35	Consommation spécifique	Q	L/m2/fdr	7,35	échelle de conformité réglementaire	Q<8: bon; Q=8:limite;Q>8: non-conforme	bon	10							

Nombre de réclamations	Non nécessaire	Taux de satisfaction des clients	Tsatisf	%	2,9%	échelle établie à partir du questionnaire	<1%: très satisfait; <3%:relativement satisfait; <5%: ni satisfait ni mécontent; <10%:relativement mécontent; >10%:inadmissible	relativement satisfait	7,5
Nombre de pièces réalisées									
Nombre d'éléments conformes pour l'eau	13	Charge toxique et polluante dans l'eau rejetée	Ce	sans dimension	0	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	conforme	10
Nombre d'éléments surveillés pour l'eau	13								
Nombre d'éléments conformes pour l'air	7	Charge toxique et polluante dans l'air	Ca	sans dimension	0	Réglementation en vigueur	conforme ou non conforme	conforme	10
Nombre d'éléments surveillés pour l'air	7								
Nombre d'éléments dont la concentration dans les rejets aqueux a diminué ou est stable	2	Suivi de charge toxique et polluante dans l'eau	Sce	sans dimension	2,0	échelle: si SCe<0: moins bon, si SCe> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les rejets aqueux a augmenté	0								
Nombre d'éléments dont la concentration dans les rejets gazeux a diminué ou est stable	0	Suivi de charge toxique et polluante dans l'air	Sca	sans dimension	0,0	échelle: si SCa<0: moins bon, si SCa> 0: bon		bon	10
Nomb d'éléments dont la concentration dans les rejets gazeux a augmenté	0								
Phrases de risque classifiant les substances inflammables	NC	Indice de dangerosité pour un effet de flux thermique	lft	sans dimension	NC	échelle de 3 classe de dangerosité donnée par Tixier	3: extrêmement inflammable; 2:facilement inflammable ; 1: inflammable; 0: faiblement inflammable	faiblement inflammable	10
Phrase de risque classifiant les substances explosives	NC	Indice de dangerosité pour un effet de surpression	lsurp	sans dimension	NC	échelle de 3 classesde dangerosité donnée par Tixier	3: explosif sensible; 2:Explosif ; 1: possibilité d'être explosif; 0: non explosif	non explosif	10
Nombre de rapport de dilution optimaux :Par exemple bain de dépôts:<5000:bon; 5000<Rd<10000: optimal>2000:moins bon	36	Taux de conformité au rapport de dilution des bains de rinçage	Rd	sans dimension	1,00	échelle à confirmer	>80%: très bon; >70%: bon; >60%: moins bon;<50%:mauvais	très bon	10
Nombre de fonction de rinçages	36								
Capacité de production (m2/j estimée) 2002	824	Taux d'utilisation de l'équipement	Uequip	%	0,8	3 niveaux	<50% peu utilisé; 50-U4equip<75%: utilisé; >75%: très utilisé	très utilisé	10
Quantité de déchets réutilisés	73,97	Indicateur d'utilisation déchet (%)	Ud	%	0,3	4 niveaux	<25% moyen;25<Ud<50%:bon; 50<Ud<75%: très bon; >75%: excellent	bon	3,3
temps nécessaire au traitement d'un mètre carré de surface	2,16	Productivité opérationnelle	PO	minute	2,2	échelle: si PO< valeur à t=0: bon, si PO> valeur à t=0:moins bon		sans effet	10
Énergie consommée (kWh/j)	15,17	Indicateurs d'intensité énergétique	lénergie	kWh/m2	2,28E-02	échelle: si lénergie< valeur à t=0: bon, si lénergie> valeur à t=0:moins bon	0,02	sans effet	10
production (m2/j)	665								
Masse de M 1ère utilisée (kg/j)	147,2	Indicateur intensité matière première	Imp	kg/m2	0,22	échelle: si Imp< valeur à t=0: bon, si Imp> valeur à t=0:moins bon	0,6	bon	10
Masse de déchets générés (kg/j)	246,58	indicateur d'intensité déchet	ldéchet	kg/m2	0,37	échelle: si ldéchet< valeur à t=0: bon, si ldéchet> valeur à t=0:moins bon	0,4	sans effet	10
Quantité de réactifs utilisés en station (kg/j)	180	Quantité de réactifs utilisés en station	réactifs	kg/m3	8,34	échelle: si réactifs< valeur à t=0: bon, si réactifs> valeur à t=0:moins bon	9,83	bon	10
Volume d'effluent traité par jour m3/j)	21,57								
nombre de clients	10	Gain de clientèle	Gclient	clients	10,00	échelle: si Gclient> valeur à t=0: bon, si Gclient< valeur à t=0:moins bon	10	sans effet	10
Excès de risque individuel	1,14E-07	Excès de risque individuel	ERI	sans dimension	0,00	ERI>10 ⁻⁶ : possibilité d'apparition d'un effet toxique; ERI<10 ⁻⁶ : effet toxique peu probable		bon	10
Masse de boues produites (kg/j)	96,86	intensité boues	boues	kg/m2	0,15	échelle: si boues< valeur à t=0: bon, si boues> valeur à t=0:moins bon	0,15	sans effet	10
Stockage à l'abri des intempéries	oui	Gestion des déchets solides	GES	sans dimension	6,00	Stockage à l'abri des intempéries et sur sol étanche : très bon; Stockage sur sol étanche : bon; Stockage à l'abri des intempéries: moins bon; stockage sauvage: mauvais		très bon	10
Stockage sur sol étanche	oui								
indice de risques	0,02	Indice de risques	IR	sans dimension	0,02	IR>1 : possibilité d'apparition d'un effet toxique; IR<1: effet toxique peu probable		bon	10

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES RELATIVES AUX ANNEXES

- [ABDMOULEH, 2004] Abdmouleh A.; Composants pour la Modélisation des processus Métier en Productique, basés sur CIMOSA; thèse.sci; 18 p; 2004.
- [ADEME, 2007] ADEME; Association De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie; site internet www2.ademe.fr; visité le 02/10/2007.
- [BARKAWI et al., 2008] Barkawi A., Prestbo J. A. et Bürki W.; Dow Jones Sustainability Indexes Review 2008; Rapport; 3 p; Disponible sur le site www.sustainability-index.com/07_html/reviews/review2008.html; 2008.
- [BARPI, 2007] Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles; Pollution de la rivière Cher par déversement d'effluents pollués le 14 septembre 2005; volume n°31236; 4 p; Disponible sur le site internet www.aria.developpement-durable.gouv.fr; consulté le 07/05/2007.
- [BAURAING et al., 2000] Bauraing E., Nicolas J. et Von Frenckell M.; Mission de soutien à la mise en place d'un système de management environnemental dans les PME: Indicateurs de performance environnementale et stratégie de communication; Rapport; 63 p; 2000.
- [BENOIT, 2002] Benoit V.; Analyse technique, économique, environnementale et sociale de trois filières de production d'hydrogène par la méthode Multicriteria Analysis for Sustainable Industrial Technologies (MASIT); rapport; 89 p; 2002.
- [BERGERON, 2000] Bergeron H.; Les indicateurs de performance en contexte PME: quel modèle appliquer? XXI^{ème} Congrès de l'association française de comptabilité; 2000.
- [BERRAH, 2002] Berrah L.; L'indicateur de performance, Concepts et Applications; Éditions Cépaduès; ISBN 2854285670; 171 p; 2002.
- [BIAU, 2007] BIAU J. B.; Évaluation des impacts environnementaux, choix d'une méthode; rapport de stage de Master EDF; 57 p; 2007.
- [BLANCHARD et al., 2004] Blanchard O. et Parodi S.; Bilan-gaz à effet de serre : Méthodologie et application au cas de l'UPMF; Rapport; 31 p; 2004.
- [BONNEFOUS et al., 2001] Bonnefous C. et Courtois A.; Indicateurs de performance; Éditions Hermès Sciences 285 p; 2001.
- [BOURGUIGNON et al., 2007] Bourguignon B. et Norotte T.; Dossier d'études d'impact, de danger et de déchets pour la société EUROTAL; Rapport; 58 p; 2007.
- [BOUSCAREN et al., 1989] Bouscaren R. et Leygonie M.; Le programme européen CORINAIR; Pollution atmosphérique; volume 31; Issue 124; p 445-455; 1989.
- [BOUVIER et al., 1998] Bouvier H., Gaudret De La Mauricière, G., Lê Quang X., Mahieu J. C., Perrin P. et Dimerman S.; Ateliers de traitement de surface: "Prévention des risques chimiques" santé, sécurité des personnes; Publication INRS; volume ED 827; 60 p; 1998.
- [BURNHAM, 2007] Burnham C.; Les indicateurs de l'éco-efficacité; Disponible sur le site www.nrtee-trnee.ca/Publications/PDF/Eco-efficiency_Workbook_F.pdf; Consulté le 27/7/2007.

- [CARPP, 2002] Centre des activités régionales pour une production propre; Alternatives de prévention de la pollution à la source dans le secteur du traitement de surfaces; 158 p; Disponible sur www.cprac.org; 2002.
- [CASEAU, 2002] Caseau P.; Les ACV entre Comptabilités Matières et Aides à la Décision; Académie des Technologies Publications; p 36-40; 2002.
- [COSTE-CHAREYRE et al., 2007] Coste-Chareyre P. et Marchand P.; Tableau de bord prospectif: la méthode BSC; Rapport de Master EMSE; 35p; 2007.
- [CRAM, 2009] Caisse Régionale d'Assurance Maladie - La prévention des risques professionnels; Disponible sur le site www.cram-normandie.fr; consulté le 09/06/2009.
- [CRAM, 2007] Caisse Régionale d'Assurance Maladie; Exposition des salariés au bruit; 4 p; Disponible sur le site www.cram-bfc.fr/documents/Fiche_bruits.pdf; 2007.
- [DARMENDRAIL, 2001a] Darmendrail D.; Diagnostic approfondi. Évaluations détaillées des risques; Techniques de l'ingénieur- Traité de l'Environnement; volume G2591; 6 p; 2001.
- [DARMENDRAIL, 2001b] Darmendrail D.; Diagnostic initial. Évaluation simplifiée des risques; Techniques de l'ingénieur- Traité de l'Environnement; volume G2590; 6 p; 2001.
- [DAWEI et al., 2004] Dawei X., Ziyang W. et Weiyin S.; The Process Analysis of Industrial Metabolism Based on Chain Management; EIA; volume 2; p 56-64; 2004.
- [DENORME ENERGY SYSTEM, 2004] Denorme Energy System; ScanRWin; Disponible sur le site www.denorme.be/fr/services_comptabiliser.asp; 2004.
- [DEPOERS et al., 2002] Depoers F., Reynaud E. et Maunoury G. S.; Indicateurs de développement durable; 139 p; 2002.
- [DOR et al., 2005] Dor F., Zmirou D., Bard D., Volatier J. L., Pichard A., Laurier D., Mur J. M., Guyonnet D. et Hours M.; Estimations de l'impact sanitaire d'une pollution environnementale et évaluation quantitative des risques sanitaires; Rapport InVS/Afsset; 160 p; 2005.
- [DROGOUL, 2006] Drogoul A.; Évaluation du niveau de risque lors de la mise en place d'une pratique de production plus propre dans un atelier de traitement de surfaces; rapport de stage de Master EMSE; 116 p; 2006.
- [ECOINTESYS, 2009] Ecointesys - Life Cycle Systems; Green - E; Disponible sur le site www.green-e.ch/index.php?rubrique=3&langue=F; Visité le 15/05/2009.
- [EEA, 2007] European Environmental Agency; EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook; Rapport; 16p; 2007.
- [FIJAL, 2007] Fijał T.; An environmental assessment method for cleaner production technologies; Journal of Cleaner Production; volume 15; Issue 10; p 914-919; 2007.
- [GLASSEY et al., 2002] Glassey O. et Chapelet J. L.; Comparaison de trois techniques de modélisation de processus: ADONIS, OSSAD et UML; Éditions IDHEAP; volume 14; 30 p; 2002.
- [IFEN, 2001] Institut Français de l'environnement; Propositions d'indicateurs de développement durable pour la France; ISBN 2-911089-47-2; 110 p; 2001.

- [INERIS, 2003] Institut National de l'environnement industriel et des risques ; Évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des ICPE-Substances chimiques; Rapport; 152 p; 2003.
- [INRS, 2001] Institut national de recherche et de sécurité; Cuves de traitement de surfaces, guide pratique de ventilation n°2; Publications INRS; volume ED 651; 23 p; 2001.
- [ISO 14001, 2004] Norme NF EN ISO 14001: Système de management environnemental, Exigences et lignes pour son utilisation; 25 p; 2004.
- [ISO 14040, 1997] Norme NF EN ISO 14040 - Environmental Management Life cycle assessment Principles and framework; 14 p; 1997.
- [KOWALSKI, 2006] Kowalski K.; Aide à la décision par l'analyse sémantique et la simulation des interactions dans l'organigramme, modèle qualitatif général d'audit pour les entreprises; thèse.sci; 431 p; 2006.
- [LACOSTE, 2003] Lacoste L.; Pilotage de la performance: quelles solutions pour quelles entreprises? Rapport ENMP; 44 p; 2003.
- [LAFOREST, 1999] Laforest V.; Technologies Propres: Méthode de minimisation des rejets et de choix des procédés de valorisation des effluents: Application aux ateliers de traitement de surface; thèse.sci; 218 p; 1999.
- [LAURAS, 2004] Lauras M.; Méthodes de diagnostic et d'évaluation de performances pour la gestion de chaînes logistiques: Application à la coopération maison-mère - filiales internationales dans un groupe pharmaceutique et cosmétique; thèse.sci; n°2119; 197 p; 2004.
- [LE PROGRÈS, 2007] La Tribune Le Progrès; Interdiction de consommer les végétaux autoproduits hors serre; article parut en juin 2007.
- [LEVEILLARD et al., 2006] Leveillard F., Laforest V., Piatyszek E. et Bourgois J.; Estimation et réduction de l'entraînement sur une chaîne d'un atelier de traitement de surface; Rapport; 15p; 2006.
- [LOI 1976, 1976] Loi n°76-663 relative à la législation des installations classées pour la protection de l'environnement; Code de l'environnement Livre V Titre I; 1976.
- [LOI 2006, 2006] Arrêté du 30 juin 2006 relatif aux installations de traitement de surface soumises à autorisation au titre de la rubrique 2565 de la nomenclature des installations classées; JO du 05/09/2006.
- [LUPAN et al., 2006] Lupan R., Kobi A., Robledo C., Delamarre A. et Christofol H.; Modélisation et évaluation de la performance en conception; 6^{ème} conférence francophone de modélisation et simulation MOSIM'06; 10 p; 2006.
- [MEGARTSI, 1997] Megartsi R.; Étude comparative des méthodes d'analyse des systèmes de production; Rapport de Master Université de droit d'Aix-Marseille; 78 p; 1997.
- [NANCY, 2007] Nancy P.; S.A.D.T.; 8 p; Disponible sur le site web.univ-pau.fr/~nancy/sadt/#concept; visité le 02/05/2007.
- [ORÉE, 1996] Association Orée; Guide d'autodiagnostic pour la mise en place d'une stratégie environnement; 67 p; 1996.
- [PÉPIOT, 2005] Pépiot G.; Modélisation des entreprises sur la base des compétences; thèse.sci; n°3300; 257 p; 2005.

- [PERRODIN *et al.*, 2004] Perrodin Y., Babut M., Bedell J. P., Bray M., Clement B., Delolme C., Devaux A., Durrieu C., Garric J. Et Montuelle B.; Approche méthodologique de l'évaluation des risques écotoxicologiques liés à la mise en dépôt sur sol de sédiments de dragage; Déchets Sciences & Techniques; p 4-14; 2004.
- [PERSONNE, 1998] Personne M.; Contribution à la méthodologie d'intégration de l'environnement dans les PME-PMI: Évaluation des performances environnementales; thèse.sci; 293 p; 1998.
- [PSA, 2006] PSA; Indicateurs de développement durable; Rapport; Disponible sur le site www.developpement-durable.psa.fr; Visité le 08/11/2006.
- [QUÉRÉ *et al.*, 2007] Quéré L., Legrand S. et Kobierska F.; Demande d'autorisation à exploiter d'EUROTHAL; Rapport de Mater EMSE; 54 p; 2007.
- [RAFENBERG, 2001] Rafenberg C.; MASIT nouvel outil d'évaluation comparative pour technologies durables; Déchets Sciences & Techniques; volume 23; p 3-8; 2001.
- [REYNE, 1991] Reyne M.; Le diagnostic technico-économique de l'entreprise; Éditions Hermès; ISBN:2-86601-262-3; 86 p; 1991.
- [RHODIA, 1999] RHODIA, L'engagement de progrès; Rapport; Disponible sur le site www.rhodia.com/fr/downloads/hsefr.pdf; visité le 14/ 06/ 2006; 1999.
- [ROGNON *et al.*, 2000] Rognon C. et Pourtier L.; Mesurer les odeurs; Techniques de l'ingénieur- Traité de l'Environnement; volume G 2940; 16 p; 2000.
- [SESSI, 2007] SESSI; Enquête annuelle d'entreprise 2007; Disponible sur le site www.industrie.gouv.fr/sessi/enquetes; visité le 16/07/2008.
- [SFTS, 2006] Société Forézienne de traitement de surfaces; Documents internes; 2006.
- [TIXIER, 2002] Tixier J.; Méthodologie d'évaluation du niveau de risque d'un site industriel de type Seveso, basée sur la gravité des accidents majeurs et la vulnérabilité de l'environnement; thèse.sci; 2002.
- [VAN BERKEL, 2007a] Van Berkel R.; Eco-efficiency in primary metals production: Context, perspectives and methods; Journal of Resources, Conservation and Recycling; volume 51; Issue 3; p 511-540; 2007.
- [VAN BERKEL, 2007b] Van Berkel R.; Eco-efficiency in the Australian minerals processing sector; Journal of Cleaner Production; volume 15; Issue 8-9; p 772-781; 2007.
- [VAN HALEN *et al.*, 2005] Van Halen C., Vezzoli C. et Wimmer R.; Methodology for product service system innovation - How to implement clean, clever and competitive strategies in European industries; ISBN: 90-232-4143-6; 220 p; 2005.
- [WBCSD, 1999] World business council for sustainable development; Eco-efficiency Indicators: A tool for better decision making; 2 p; 1999.
- [WEIDENHAUPT *et al.*, 2000] Weidenhaupt A. et Meier M. A.; Analyse du cycle de vie . Application aux systèmes de dépollution; Techniques de l'ingénieur- Traité de l'Environnement; volume G 5810; 14 p; 2000.

N° d'ordre : 554 SGE

Gaëlle RAYMOND

RÉDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ATELIERS DE TRAITEMENT DE SURFACE : APPLICATION DE STRATÉGIES DE PRODUCTION PLUS PROPRE ET PLUS SÛRE

Speciality: Environmental Sciences and Engineering

Keywords: Cleaner production, Systemic Analysis, Multi-criteria analysis,
Metal finishing...

Abstract:

Cleaner production practices are increasingly used in industrial applications. These numerous and various practices generate multiple benefits. However, the overall impact resulting from their implementation on the company cannot be easily apprehended. A methodology providing a global management approach is proposed, in order to help corporate managers in setting up cleaner and safer production practices and in the assessment of the impacts related to their implementation. A Cleaner and Safer Production (CSP) process is also obtained through this approach. This methodology has been developed into the metal finishing industry.

The structure of the methodology for assessment of CSP practices impacts is based on a 4 level tree (system, subsystems, criteria, indicators). It was developed through a systemic (MADS model) and functional analysis of the industrial establishment. The criteria were weighted by the use of a multi-criteria analysis method (AHP). The 15 CSP criteria identified are the foundation of two distinct but complementary methods developed in this methodology:

- A CSP practices' impacts diagnosis method, which helps to take the situation into account, to support decision making, and to measure progress after cleaner production practice implementation. For that purpose, the method relies on the use of 38 CSP indicators, feeding the 15 previously defined criteria.
- A CSP practices decision aid method which highlights, in a panel of 86 practices identified into the metal finishing BREF, these that are best suited to the company by using the multi-criteria analysis method (ELECTRE I).

The validation of the methodology, carried out through 4 industrial case studies, has shown that it can be easily set up into different types of metal finishing workshops. Moreover, these case studies help validate the usefulness of such a methodology, particularly through the corporate managers' positive feedback.

Hence, our methodology contributes to answering the Best Available Techniques issue by assisting corporate managers in the choice of the above mentioned processes. Furthermore, the use of this methodology could be helpful for BAT's knowledge improvement in preparation for BREF re-examination.

École Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Étienne

N° d'ordre : 554 SGE

Gaëlle RAYMOND

RÉDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ATELIERS DE
TRAITEMENT DE SURFACE : APPLICATION DE STRATÉGIES DE
PRODUCTION PLUS PROPRE ET PLUS SÛRE

Spécialité: Sciences et Génie de l'environnement

Mots clefs : Production Plus Propre Et Plus Sûre, Analyse Systémique, Analyse multicritère, Traitement de surface...

Résumé :

Les industriels ont de plus en plus souvent recours à des pratiques de production plus propre. Ces pratiques, nombreuses et variées, sont génératrices de multiples effets bénéfiques. Néanmoins, l'impact global de leur mise en œuvre sur l'entreprise peut être difficilement appréhendable. Afin d'aider les industriels d'une part, à évaluer les impacts liés à la mise en œuvre de ces pratiques, et d'autre part, dans le choix de l'implantation de pratiques de production plus propre et plus sûre, une méthodologie qui repose sur une approche globale de la gestion de cette implémentation en vue d'obtenir un outil de Production Plus Propre et Plus Sûre (4PS) est proposée. Cette méthodologie a été développée pour le secteur du traitement de surface.

La structuration de cette méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS s'appuie sur une arborescence à 4 niveaux (système, sous-systèmes, critères, indicateurs) élaborée grâce à une analyse systémique (modèle MADDS) et fonctionnelle de l'installation. Les critères sont pondérés en utilisant la méthode hiérarchique multicritère. Sur la base des 15 critères de 4PS identifiés, deux méthodes distinctes mais complémentaires ont été élaborées :

- Une méthode de diagnostic qui permet de rendre compte d'une situation, d'aider à la prise de décision, et de mesurer les progrès et évolutions suite à la mise en place d'une pratique de production plus propre. Dans ce but, la méthode s'appuie sur l'utilisation de 38 indicateurs de 4PS alimentant les 15 critères précédemment définis.
- Une méthode d'aide au choix de pratiques de 4PS qui fait ressortir, dans un panel de 86 pratiques tirées du BREF traitement de surface (STM), les pratiques les plus adaptées à l'entreprise en utilisant la méthode d'analyse multicritère ELECTRE I.

La validation de la méthodologie, réalisée par le biais de 4 cas d'étude, montre d'une part sa facilité de mise en œuvre et son applicabilité à différents types d'ateliers de traitement de surfaces. D'autre part, ces études de cas valident l'utilité d'une telle méthodologie, notamment au travers du retour positif des industriels.

En dernier lieu, la méthodologie d'évaluation des impacts des pratiques de 4PS contribue ainsi à répondre à la problématique des Meilleures Techniques Disponibles en aidant les industriels dans leur mise en place et dans le cadre de la révision du BREF STM.