



HAL
open science

Caractérisation des process de fabrication microélectroniques pour l'éco-conception des futures technologies (partenaire industriel STMicroelectronics)

Ingwild Baudry

► **To cite this version:**

Ingwild Baudry. Caractérisation des process de fabrication microélectroniques pour l'éco-conception des futures technologies (partenaire industriel STMicroelectronics). Autre. Université de Grenoble, 2013. Français. NNT : 2013GRENI043 . tel-00957329

HAL Id: tel-00957329

<https://theses.hal.science/tel-00957329>

Submitted on 10 Mar 2014

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Ingwild BAUDRY

Thèse dirigée par **Daniel BRISSAUD**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
dans l'**École Doctorale I-MEP2**

Caractérisation environnementale des procédés de fabrication microélectronique pour l'éco- conception des technologies

Thèse soutenue publiquement le **14 Octobre 2013**,
devant le jury composé de :

M. Alain BERNARD

Professeur à l'École Centrale de Nantes, Président

Mme Valérie LAFOREST

Professeur à l'École des Mines de Saint-Etienne, Rapporteur

M. Patrick MARTIN

Professeur à l'ENSAM de Metz, Rapporteur

M. Daniel BRISSAUD

Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de thèse

M. Pascal ROQUET

Ingénieur à ST-Ericsson Grenoble, Examineur

M. Alan LELAH

Ingénieur de recherche au laboratoire G-SCOP, Examineur

Mme Marion GARCIA

Ingénieur à STMicroelectronics Crolles, Invitée



« La seule certitude que j'ai, c'est d'être dans le doute »

Pierre Desproges

***« Ce sont rarement les réponses qui apportent la vérité,
mais l'enchaînement des questions »***

Daniel Pennac, La Fée Carabine

RESUME ET MOTS-CLEFS / ABSTRACT AND KEY-WORDS

L'industrie microélectronique est engagée depuis longtemps dans des mesures visant à réduire ses impacts sur l'environnement, et ce sur toutes les phases du cycle de vie de ses produits. Sur les sites de fabrication, la suite logique à la mise en place de système de traitement des pollutions est l'anticipation de ces dernières. L'éco-conception des technologies microélectroniques, c'est-à-dire l'intégration de paramètres environnementaux dans leur processus de développement, permet de répondre à cet objectif.

Notre travail de recherche a pour but de caractériser environnementalement les procédés de fabrication microélectronique afin de proposer des outils et méthodes pour leurs concepteurs. Nous avons donc modélisé une technologie microélectronique, et associé des impacts environnementaux aux flux entrants et sortants. Cela nous a permis de proposer des indicateurs environnementaux destinés à la R&D et adaptés à un site de développement et de production microélectronique.

Mots-clefs : évaluation environnementale, procédés de fabrication microélectronique, éco-conception

The microelectronic industry has been engaged for a long time in measures to reduce its impacts on the environment, regarding all the life cycle phases of its products. For the manufacturing sites, the logical follow-ups to the implementation of pollutions treatment systems are their anticipation. The eco-design of microelectronic technologies, that is the integration of environmental parameters in their development process, enables to meet this objective.

The aim of our research work is to environmentally characterize the microelectronic manufacturing processes to propose tools and methods for their designers. Therefore, we modeled a microelectronic technology, and we matched environmental impacts with its inputs and outputs. This allows us to suggest environmental indicators for the R&D, which are adapted to a microelectronic development and manufacturing site.

Key-words : environmental assessment, microelectronic manufacturing processes, eco-design

Remerciements

REMERCIEMENTS

Selon une étude statistique très sérieuse menée par mes soins auprès d'un panel de doctorants et de jeunes docteurs arbitrairement sélectionnés, il apparaît que les remerciements constituent la partie la plus lue d'un manuscrit de thèse. Oui, je sais que c'est triste, mais c'est comme ça. Je vais donc oublier pour un temps mon orgueil scientifique bafoué, et essayer de m'appliquer pour satisfaire le cœur de cible de cet ouvrage.

Ces travaux ont été réalisés au sein du laboratoire G-SCOP, sous la direction de Daniel Brissaud et l'encadrement d'Alan Lelah.

Daniel, je te remercie de m'avoir permis de mener ce projet à bien, et d'avoir su être là aux moments stratégiques. Merci pour ton talent de négociateur quand j'ai sonné à ta porte en disant : « Cette fois c'est décidé, j'arrête ». Merci de savoir poser les bonnes questions, même si je te demandais plutôt de poser les bonnes réponses et pas de créer un nouveau problème : c'est comme ça qu'on avance ! Et merci de n'avoir jamais douté que j'y arriverai (ou de l'avoir très bien caché).

Alan, merci à toi pour ta patience sans failles : ça ne doit pas toujours être évident de gérer des discussions houleuses avec des doctorants stressés, et sans doute un peu caractériels. Et merci d'avoir été un élément moteur très efficace. Se plaindre qu'on a l'impression de n'avoir rien fait de bien, et s'entendre répondre : « Mais si c'est bien, d'ailleurs tu as deux jours pour écrire un résumé d'article avant la clôture des dépôts pour la prochaine conférence », ça rend efficace !

J'ai également envie de rappeler que mon implication dans ce projet a commencé par un simple échange avec Fabrice Mathieux : merci Fabrice d'avoir pensé à moi pour ce travail.

Je remercie aussi la région Rhône-Alpes pour le financement de cette thèse, ainsi que la compagnie STMicroelectronics sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. Ce projet était une initiative d'Agnès Fender (soutenue par Michel Masselot), dont le rôle de coach a été repris par Marion Garcia. Merci sincèrement à vous trois pour votre aide, votre bonne humeur, et vos idées. J'ai passé deux années très sympathiques au service ESH du site de Crolles, et je tiens particulièrement à remercier Sandrine, Christophe, Maurice, Catherine, Annie, Lahn, Franck, Magali : merci d'avoir fait en sorte que je me sente si bien parmi vous.

Un grand merci également à Didier Lévy, qui a su me guider dans les bonnes directions, et ne m'a jamais lâchée jusqu'aux dernières heures de cette aventure.

Merci à Valérie Laforest et Patrick Martin d'avoir accepté de rapporter mes travaux de thèse. Merci à Alain Bernard d'avoir présidé mon jury, et à Pascal Roquet et Marion Garcia d'avoir également fait partie de ce jury. Les discussions qui ont suivi ma présentation furent très intéressantes, et ont mis en valeur de nombreuses pistes à explorer dans ce domaine de recherche.

Dans les remerciements, c'est comme en dissertation, il y a des règles. Il faut commencer par la partie « professionnelle », pour finir par une partie plus personnelle, même si dans mon cas

Remerciements

tout se mélange un peu puisque j'ai eu la chance de travailler avec plein de gens chouettes. Mais bon, je passe donc à la sphère privée de mon sentimentalisme post-soutenance.

D'abord, mille mercis à vous, amis g-scopiens. Je ne peux pas citer tout le monde, mais dans le désordre : merci à la team F200, Lucie, Alex, Gab et Lucile, c'est le rêve de tomber sur des co-bureaux comme vous. Merci au soutien, à l'humour douteux et aux bons moments passés avec vous autour d'une bière et/ou d'un jeu de cartes, d'un piano, d'un accordéon : Benjamin, Chloé, Jérémy, Laura, Matthieu (et Modération), Pauline, Julien, Olivier, Hélène, Hugo, Clément, Golnoosh, Julie, Michaël, Maud, Yacine, Egor, Natalia, Boris, Aurélie, Guillaume... Merci, j'ai bien ri !

Merci également aux permanents toujours prêts à nous aider et à nous remonter le moral quand ils voient à nos têtes que c'est nécessaire : je pense entre autres à Guy, Khaled, Peggy, Frédéric, Franck...

Et merci à Marie-Jo, Fadila et Myriam de gérer pour nous tout ce qu'on ne pense pas à faire.

Ensuite, merci aux Autres, les non-g-scopiens, voire même non-Grenoblois, pour avoir accepté mes humeurs changeantes au long de ces quatre années (oui, quatre) : Mahaut, Alvin, Anne-Sou, Clèm (Cui !), Rémy, Aurélie (Louloute), Sandrine, Armelle (un concombre pas comme les autres), Alex, Romain, Morgane, Pascal, Laure, Livia...

J'ai sûrement oublié des gens qui mériteraient largement d'être remerciés : ne vous vexez surtout pas, regardez de combien de personnes j'ai eu besoin pour arriver au bout de ce petit jeu, et vous comprendrez que j'aie pu me laisser aller à quelques omissions involontaires. Merci aussi à vous donc !

Et puis voilà, j'en arrive maintenant au noyau dur, aux plus proches, à ceux qui sont toujours là et sans conditions, qui n'ont pas vraiment le choix mais qui pourraient le faire moins bien : mes parents, mon frère. Mille mercis de savoir me remotiver ou me distraire selon les besoins, merci de m'écouter chougner de longues heures quand je dois faire de la place à l'intérieur de moi pour la suite, merci pour ça et pour tout le reste.

Et enfin merci à toi à qui je pense, tu as presque tenu le coup jusqu'au bout, mais ne t'en fais pas, c'est de ma faute, j'ai un peu traîné. N'empêche, t'as vu ? J'ai réussi...

Table des matières

TABLE DES TABLEAUX.....	19
TABLE DES FIGURES.....	24
1. INTRODUCTION GENERALE	33
1.1 Impact des activités humaines sur l'environnement.....	33
1.1.1 Constat.....	33
1.1.2 Mobilisation internationale dans la protection de l'environnement.....	34
1.2 Les impacts environnementaux de l'industrie.....	35
1.2.1 L'industrie des équipements électriques et électroniques.....	35
1.2.2 L'industrie des semiconducteurs.....	36
1.2.3 Evolution du rapport de l'industrie à l'environnement.....	37
1.3 Comment l'industrie des semiconducteurs s'implique-t-elle pour préserver l'environnement ?	42
1.3.1 Principales actions menées par l'industrie des semiconducteurs pour préserver l'environnement	42
1.3.2 L'éco-conception dans l'industrie des semiconducteurs.....	43
1.4 Question de recherche.....	44
1.5 Le cas industriel de support à l'étude : le site de Crolles de STMicroelectronics.....	45
1.5.1 Qu'est-ce qu'une technologie microélectronique ?.....	45
1.5.2 Présentation du site	46
1.5.2.1 Les salles blanches.....	48
1.5.2.2 Les ateliers de production.....	50
1.5.2.3 La station de traitement des effluents aqueux industriels	51
1.5.2.4 Le traitement des effluents gazeux	53
1.5.2.5 La gestion des déchets.....	54
1.5.3 La R&D sur le site STMicroelectronics de Crolles 300	54
1.5.4 Conclusion.....	57
1.6 Annonce du plan de la thèse	57
2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	59
2.1 Les impacts environnementaux de la microélectronique	59
2.1.1 Les produits microélectroniques.....	59
2.1.2 Cycle de vie d'un produit microélectronique.....	60
2.1.3 Impacts environnementaux de la microélectronique par phase du cycle de vie	61

Table des matières

2.1.3.1	Extraction des matières premières et préparation des matériaux et des auxiliaires de fabrication	62
2.1.3.2	Fabrication des produits microélectroniques	63
2.1.3.3	Transport.....	64
2.1.3.4	Usage	64
2.1.3.5	Fin de vie	65
2.1.3.6	Bilan des impacts environnementaux de la microélectronique sur tout le cycle de vie des produits.....	65
2.1.4	Evolution des impacts environnementaux de l'industrie microélectronique.....	66
2.1.5	Conclusion.....	67
2.2	Description d'une technologie microélectronique	68
2.2.1	Enchaînement d'étapes de procédé.....	68
2.2.2	Entrants et sortants pour la fabrication de produits microélectroniques.....	70
2.2.3	Conclusion.....	71
2.3	Eco-conception des technologies microélectroniques	72
2.3.1	Qu'est-ce que l'éco-conception ?.....	72
2.3.2	Pourquoi éco-concevoir ?	72
2.4	Méthodes d'évaluation des impacts environnementaux.....	73
2.4.1	L'Analyse de Cycle de Vie (ACV).....	73
2.4.2	Evaluation des impacts environnementaux de la microélectronique : quelques méthodes 74	
2.4.2.1	ACV sur les entrants et sortants économiques	74
2.4.2.2	ACV hybride.....	75
2.4.2.3	Analyse d'inventaire de cycle de vie.....	75
2.4.2.4	ProTox [Griese, 2004]	76
2.4.3	Conclusion.....	76
2.5	Accès aux données pour l'évaluation environnementale des procédés de fabrication microélectronique lors de leur phase de conception.....	77
2.5.1	Manque de données.....	77
2.5.2	Différentes méthodes de collecte de données selon leur nature.....	77
2.5.2.1	L'approche « top-down »	78
2.5.2.2	L'approche « bottom-up »	78

Table des matières

2.5.3	Conclusion.....	78
2.6	Comment éco-concevoir les technologies microélectroniques ?.....	79
2.6.1	Acteurs.....	79
2.6.1.1	Constat : manques et difficultés.....	79
2.6.1.2	Quels sont les besoins des concepteurs ?.....	80
2.6.2	Outils.....	81
2.6.2.1	Informations nécessaires	81
2.6.2.2	Les outils et méthodes d'éco-conception	81
2.6.3	Conclusion.....	83
2.7	Nos questions de recherche	83
3.	MODELISATION D'UNE TECHNOLOGIE MICROELECTRONIQUE	85
3.1	Modèle du processus de production d'un produit microélectronique.....	85
3.2	Identification des flux.....	87
3.2.1	Identification des flux entrants	89
3.2.1.1	Consommations liées aux process des wafers	89
3.2.1.2	Consommations liées aux infrastructures.....	90
3.2.1.3	Limites de la méthode	90
3.2.2	Identification des flux sortants	90
3.2.2.1	Rejets liés aux process des wafers.....	91
3.2.2.2	Rejets des infrastructures	91
3.2.3	Identification des données disponibles sur le site	92
3.2.3.1	Consommation de produits chimiques liquides et gazeux	92
3.2.3.2	Consommation d'eau et d'énergie	92
3.2.3.3	Rejets liquides	93
3.2.3.4	Rejets atmosphériques	93
3.2.3.5	Déchets	93
3.2.3.6	Conclusion.....	93
3.3	Modélisation environnementale d'une technologie microélectronique.....	94
3.3.1	Modélisation du système de production.....	94
3.3.1.1	Frontières de l'étude	95
3.3.2	Modélisation d'une technologie microélectronique.....	96

Table des matières

4. ESTIMATION DES FLUX ENTRANTS ET SORTANTS POUR UNE TECHNOLOGIE MICROELECTRONIQUE : l'exemple de la technologie 45 nm	99
4.1 Nombre d'étapes de procédé de la technologie 45 nm (pour le produit majoritaire)	100
4.2 Méthode d'estimation de la consommation de produits chimiques liquides et gazeux de la technologie 45 nm.....	100
4.2.1 Première méthode : à partir des recettes de production.....	101
4.2.1.1 Modèle d'une recette de production	101
4.2.1.2 Collecte des recettes de production : méthodologie	101
4.2.1.3 Résultat de la collecte des recettes de production	103
4.2.1.4 Exploitation des recettes de production : méthodologie et calculs.....	106
4.2.1.5 Présentation et analyse des résultats : cas de l'atelier CMP pour toutes les étapes de procédé de la technologie 45 nm	107
4.2.2 Seconde méthode : à partir des quantités mensuelles de produits chimiques achetées	110
4.2.2.1 Description des données utilisées	110
4.2.2.2 Collecte des données : méthodologie	111
4.2.2.3 Résultat de la collecte des données	111
4.2.2.4 Exploitation des données : méthodologie et calculs	112
4.2.2.5 Présentation et analyse des résultats : cas de l'atelier CMP	112
4.2.3 Comparaison des deux méthodes : cas de l'atelier CMP.....	113
4.2.3.1 Résultats de l'approche recette pour la consommation de produits chimiques de l'atelier CMP pour le mois d'Août 2010.....	113
4.2.3.2 Comparaison des résultats obtenus par l'approche recette avec ceux issus des achats mensuels de produits chimiques pour l'atelier CMP	113
4.2.3.3 Conclusion sur la comparaison des deux méthodes	119
4.2.4 Résultats sur les consommations de produits chimiques liquides et gazeux obtenues par les recettes, pour la technologie 45 nm.....	120
4.2.4.1 Atelier Photolithographie	121
4.2.4.2 Atelier Wet.....	123
4.2.4.3 Atelier Etch.....	125
4.2.4.4 Atelier Dry Stripping	127
4.2.4.5 Atelier Métal	129
4.2.4.6 Atelier Traitement Thermique	130
4.2.4.7 Atelier Diel.....	132

Table des matières

4.2.4.8	Bilan pour tous les ateliers de production pour la technologie 45 nm	134
4.3	Estimation de la consommation d'électricité, d'eau, de gaz de ville, de réactifs, et des rejets aqueux et atmosphériques de la technologie 45 nm	139
4.3.1	Les données globales du site	139
4.3.1.1	Détail des réactifs de la station de traitement.....	142
4.3.1.2	Détail des rejets aqueux	142
4.3.1.3	Détail des rejets atmosphériques.....	143
4.3.2	Fonction de répartition des consommations et rejets sur les différentes technologies..	144
4.3.3	Consommation d'électricité pour la technologie 45 nm	147
4.3.4	Contribution de la technologie 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet du site pour l'année 2011	149
4.4	Première évaluation : bilan de la contribution de la technologie 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet du site pour l'année 2011 (hors produits chimiques)	150
4.5	Méthode d'attribution des consommations et rejets du site à une étape de procédé de la technologie 45 nm.....	151
4.5.1	Consommation d'électricité.....	151
	✓ Estimation de la part fixe de la consommation d'électricité du site pour l'année 2011, ainsi que de la part variable dépendant du nombre d'étapes de procédé réalisées.....	153
4.5.2	Consommation d'eau désionisée (= EDI)	158
4.5.3	Consommation de Gaz Naturel	163
4.5.4	Consommation de réactifs de la station de traitement	165
4.5.4.1	Méthode	165
4.5.4.2	Exemple pour la consommation d'acide sulfurique (H ₂ SO ₄) de la station de traitement	165
4.5.4.3	Résultats sur les réactifs consommés par la station de traitement des effluents aqueux industriels.....	166
4.5.5	Rejets liquides	166
4.5.5.1	Méthode	166
4.5.5.2	Exemple pour la charge d'Azote dans les rejets aqueux de la station de traitement ..	167
4.5.5.3	Résultats sur les rejets liquides de la station de traitement des effluents aqueux industriels.....	169
4.5.6	Rejets gazeux	169
4.5.6.1	Méthode	169

Table des matières

4.5.6.2	Exemple pour la charge d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques.....	169
4.5.6.3	Résultats sur les rejets gazeux	172
4.5.7	Conclusion.....	172
4.6	Seconde évaluation : bilan de la contribution de la technologie 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet du site pour l'année 2011	172
5.	DEFINITION D'INDICATEURS ET D'OUTILS ENVIRONNEMENTAUX POUR L'AIDE A L'ECO-CONCEPTION DES FUTURES TECHNOLOGIES MICROELECTRONIQUES.....	179
5.1	Définition d'indicateurs environnementaux pour l'éco-conception des technologies microélectroniques.....	179
5.1.1	Objectifs des indicateurs environnementaux.....	179
5.1.2	Utilisation des indicateurs environnementaux.....	179
5.1.3	Forme des indicateurs environnementaux.....	180
5.1.4	Communication	180
5.2	Types d'indicateurs et accès aux données	180
5.2.1	Trois types d'indicateurs.....	181
5.2.2	Accès aux données pour les indicateurs Procédés.....	181
5.2.2.1	Nombre de steps par atelier de production.....	181
5.2.2.2	Volumes de produits chimiques consommés pendant les steps	181
5.2.3	Accès aux données pour les indicateurs Environnement	182
5.2.4	Accès aux données pour les indicateurs Chimie	183
5.3	Définition et utilisation des indicateurs	184
5.3.1	Indicateurs Procédés	184
5.3.1.1	Nombre de steps	184
5.3.1.2	Consommation de produits chimiques pendant les steps.....	187
5.3.2	Indicateurs Environnement	190
5.3.3	Indicateurs Chimie.....	206
5.4	Conclusion	214
6.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	217
6.1	Conclusions.....	217
6.2	Perspectives.....	219
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	223
	ANNEXES.....	229

Table des matières

A.1 Consommation de produits chimiques liquides et gazeux du produit majoritaire de la technologie 45 nm, par étape de procédé et par wafer, pour tous les ateliers de production.....	229
A.1.1 Atelier Photolithographie.....	230
A.1.2 Atelier Wet	232
A.1.3 Atelier Etch	235
A.1.4 Atelier Dry Stripping.....	236
A.1.5 Atelier Métal.....	238
A.1.6 Atelier Traitement Thermique.....	239
A.1.7 Atelier Diel.....	241
A.2 Détail des valeurs mensuelles ou trimestrielles des autres paramètres de consommation et de rejet du site pour l'année 2011	243
A.2.1 Consommation d'EDI pour l'année 2011	243
A.2.2 Consommation de gaz naturel pour l'année 2011	243
A.2.3 Consommation d'acide sulfurique H ₂ SO ₄ pour l'année 2011	244
A.2.4 Consommation d'Hydroxyde de Sodium NaOH pour l'année 2011	244
A.2.5 Consommation de Chlorure de Calcium CaCl ₂ pour l'année 2011	245
A.2.6 Consommation de chaux Ca(OH) ₂ pour l'année 2011	245
A.2.7 Charge d'Azote dans les rejets liquides pour l'année 2011	246
A.2.8 Charge de Fluorure dans les rejets liquides pour l'année 2011	246
A.2.9 Charge de Cuivre dans les rejets liquides pour l'année 2011.....	247
A.2.10 Flux massique de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques pour l'année 2011	247
A.2.11 Flux massique de Fluor dans les rejets atmosphériques pour l'année 2011	248
A.2.12 Flux massique d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques pour l'année 2011.....	248
A.2.13 Flux massique de COV dans les rejets atmosphériques pour l'année 2011.....	248
A.3 Contribution moyenne d'une étape de procédé de la technologie 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet du site	249
A.3.1 Consommation d'Hydroxyde de Sodium (NaOH) de la station de traitement.....	249
A.3.2 Consommation de Chlorure de Calcium (CaCl ₂) de la station de traitement.....	250
A.3.3 Consommation de chaux (Ca(OH) ₂) de la station de traitement.....	251
A.3.4 Charge de Fluorure dans les rejets aqueux de la station de traitement.....	251
A.3.5 Charge de Cuivre dans les rejets aqueux de la station de traitement	254

Table des matières

A.3.6 Charge de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques du site.....	256
A.3.7 Charge de Fluor dans les rejets atmosphériques du site	258
A.3.8 Charge de COV dans les rejets atmosphériques du site	261
A.4 Indicateurs Environnement.....	264
A.4.1 Macro-indicateurs Environnement : consommation de réactifs de la station de traitement	264
A.4.1.1 Consommation d'Hydroxyde de Sodium (NaOH)	264
A.4.1.2 Consommation de Chlorure de Calcium (CaCl ₂)	265
A.4.1.3 Consommation de Chaux (Ca(OH) ₂)	266
A.4.2 Micro-indicateurs Environnement.....	267
A.4.2.1 Rejets liquides.....	267
A.4.2.2 Rejets atmosphériques.....	269

Table des tableaux

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1 Différences entre Crolles 200 et Crolles 300.....	47
Tableau 1. 2 Fonctions et procédés des différents ateliers de production.	50
Tableau 1. 3 Drains Crolles 300 des effluents ségrégués dilués (donc traités à la station de traitement). 52	
Tableau 1. 4 Exhausts de Crolles 300.	53
Tableau 1. 5 Traitement des effluents gazeux en sortie d'exhaust.	53
Tableau 1. 6 Exemples de DnD et de DD (listes non exhaustives).	54
Tableau 2. 1 Ressources nécessaires au process des wafers pour la fabrication d'une puce de 2 grammes (1,6 cm ² de wafer entrant dans le process), d'après [Williams, 2004].....	63
Tableau 2. 2 Impacts environnementaux par phase du cycle de vie des produits microélectroniques. ...	65
Tableau 2. 3 Principaux procédés de fabrication microélectronique [Krishnan, 2008] mis en relation avec les ateliers de production du site de Crolles de STMicroelectronics [STMicroelectronics Crolles, 2011]..	68
Tableau 2. 4 Entrants et sortants des procédés de fabrication microélectronique [Krishnan, 2008], [Liu, 2010] et [Yao, 2004].	70
Tableau 3. 1 Exemple de brique pour la route d'un produit de la technologie 45 nm.	86
Tableau 3. 2 Consommations et rejets des différentes entités du site.....	87
Tableau 3. 3 Entrants des ateliers de production.	89
Tableau 3. 4 Entrants des différentes activités des infrastructures.....	90
Tableau 3. 5 Sortants des ateliers de production.	91
Tableau 3. 6 Sortants des différentes activités des infrastructures.....	91
Tableau 4. 1 Répartition des étapes de procédé de la technologie 45 nm dans les ateliers de production.	100
Tableau 4. 2 Modélisation d'une recette pour un step j.	101
Tableau 4. 3 Nombre d'interlocuteurs par atelier nécessaires à la collecte et l'étude des recettes de production.	102
Tableau 4. 4 Principales raisons aux différents taux de collecte et d'analyse des recettes de production.	104
Tableau 4. 5 Rôles des différents procédés de l'atelier CMP.	108
Tableau 4. 6 Forme des données utilisées dans la seconde approche de quantification des consommations de produits chimiques liées au process des wafers.....	110

Table des tableaux

Tableau 4. 7 Quantités de produits chimiques achetées au mois d’Août 2010 par l’atelier CMP.....	112
Tableau 4. 8 Quantités de produits chimiques consommées au mois d’Août 2010 par les procédés de l’atelier CMP, d’après l’étude des recettes de production de la technologie 45 nm.....	113
Tableau 4. 9 Ecart entre les volumes de produits chimiques consommés obtenus par les deux méthodes (étude des recettes et approche « top-down »).....	115
Tableau 4. 10 Exemples d’utilisations de produits chimiques pour le fonctionnement des équipements, hors steps mais directement liés aux procédés.	115
Tableau 4. 11 Volumes des slurries de CMP Cuivre obtenus par les recettes grâce aux modifications apportées par les experts CMP.	116
Tableau 4. 12 Ecart entre les volumes de produits chimiques consommés obtenus par les deux méthodes (étude des recettes et approche « top-down »), après discussion avec les experts des procédés de CMP.	119
Tableau 4. 13 Consommations de produits chimiques liquides, par wafer, par les étapes de procédé du produit majoritaire de la technologie 45 nm.....	134
Tableau 4. 14 Consommations de produits chimiques gazeux, par wafer, par les étapes de procédé du produit majoritaire de la technologie 45 nm.....	137
Tableau 4. 15 Type de données disponibles pour les différents paramètres.....	140
Tableau 4. 16 Réactifs consommés pour le traitement des effluents liquides industriels et leur utilisation.	142
Tableau 4. 17 Paramètres de rejets atmosphériques suivis.	143
Tableau 4. 18 Nombre d’étapes nécessaires au process d’un wafer pour le produit majoritaire de chaque technologie.	146
Tableau 4. 19 Nombre de steps total réalisés pour toutes les technologies sur l’année 2011.	146
Tableau 4. 20 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation d’électricité du site sur l’année 2011.....	147
Tableau 4. 21 Contribution de la technologie 45 nm aux différents paramètres de consommation et de rejet du site sur l’année 2011.	149
Tableau 4. 22 Périodes de l’année 2011 pour lesquelles les courbes de consommation d’électricité et de nombre d’étapes de procédé n’évoluent pas de la même façon.	152
Tableau 4. 23 Valeurs de $C_{\text{Electricité_Step}}$ obtenues pour une part fixe nulle pour la consommation d’électricité du site.....	154
Tableau 4. 24 Incertitude sur $C_{\text{Electricité_Step}}$ pour la consommation d’électricité en fonction de la valeur de la part fixe F.	155

Table des tableaux

Tableau 4. 25 Contribution mensuelle de chaque étape de procédé pour un wafer d'une technologie à la consommation d'électricité du site pour l'année 2011 avec une part fixe de 9626374 kWh.....	157
Tableau 4. 26 Etapes de procédé des technologies du site consommant de l'EDI, par atelier de production.	159
Tableau 4. 27 Contributions moyennes d'une étape de procédé à la consommation des réactifs utilisés par la station de traitement des effluents aqueux industriels.....	166
Tableau 4. 28 Etapes de procédé des technologies du site rejetant de l'Azote, par atelier de production.	167
Tableau 4. 29 Steps contributeurs et contributions moyennes d'un step aux rejets liquides de la station de traitement des effluents aqueux industriels.....	169
Tableau 4. 30 Etapes des technologies du site rejetant de l'Ammoniac, par atelier de production.	170
Tableau 4. 31 Steps contributeurs et contributions moyennes d'un step aux rejets atmosphériques des laveurs de gaz.....	172
Tableau 4. 32 Contribution de la technologie 45 nm aux impacts environnementaux du site pour l'année 2011.....	173
Tableau 4. 33 Contribution moyenne d'un wafer 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet.	177
Tableau 5. 1 Type de données disponibles pour les différents paramètres sur le site.	183
Tableau 5. 2 Potentiels de réchauffement climatique à 100 ans des gaz à effet de serre consommés par les technologies sur le site.	197
Tableau 5. 3 Synthèse des caractéristiques des indicateurs Environnement.....	205
Tableau 5. 4 Rapport $\Delta NSc, p\Delta NStotal$ pour les paramètres de consommation et de rejet du site.....	206
Tableau 5. 5 Différentes catégories de substances définies par la liste des substances interdites, exemptées et soumises à déclaration.	209
Tableau 5. 6 Extrait de l'outil Chimie.....	211
Tableau 5. 7 Code couleur des cellules dans lesquelles est mentionnée la classe de chaque substance, dans l'outil Chimie.	212
Tableau 5. 8 Code couleur des cellules dans lesquelles sont mentionnées les phrases R de chaque substance, dans l'outil Chimie.	212
Tableau 5. 9 Code couleur des cellules dans lesquelles sont mentionnées les combinaisons de phrases R de chaque substance, dans l'outil Chimie.	213
Tableau 5. 10 Code couleur des cellules dans lesquelles est mentionnée la rubrique ICPE de chaque substance classée, dans l'outil Chimie.	213

Table des tableaux

Tableau 5. 11 Bilan des indicateurs d'aide à l'éco-conception proposés.....	214
Tableau 5. 12 Evolution des indicateurs environnementaux entre les technologies 45 et 28 nm.....	215
Tableau A. 1 Etapes de procédé de l'atelier Photolithographie pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.....	230
Tableau A. 2 Etapes de procédé de l'atelier Wet pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.	232
Tableau A. 3 Etapes de procédé de l'atelier Etch pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.	235
Tableau A. 4 Etapes de procédé de l'atelier Dry Stripping pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.	236
Tableau A. 5 Etapes de procédé de l'atelier Métal pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.	238
Tableau A. 6 Etapes de procédé de l'atelier Métal pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.	239
Tableau A. 7 Etapes de procédé de l'atelier Diel pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm..	241
Tableau A. 8 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation d'EDI du site pour l'année 2011.	243
Tableau A. 9 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation de gaz naturel du site pour l'année 2011.	243
Tableau A. 10 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation d'Acide sulfurique de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.....	244
Tableau A. 11 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation d'Hydroxyde de Sodium de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	244
Tableau A. 12 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation de Chlorure de Calcium de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	245
Tableau A. 13 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation de chaux de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	245
Tableau A. 14 Contribution de la technologie 45 nm à la charge d'Azote dans les rejets aqueux de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	246
Tableau A. 15 Contribution de la technologie 45 nm à la charge de Fluorures dans les rejets aqueux de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	246
Tableau A. 16 Contribution de la technologie 45 nm à la charge de Cuivre dans les rejets aqueux de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	247
Tableau A. 17 Contribution de la technologie 45 nm au flux massique de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.	247

Table des tableaux

Tableau A. 18 Contribution de la technologie 45 nm au flux massique de Fluor dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.	248
Tableau A. 19 Contribution de la technologie 45 nm au flux massique d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.	248
Tableau A. 20 Contribution de la technologie 45 nm au flux massique de COV dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.	248
Tableau A. 21 Etapes de procédé des technologies du site rejetant des fluorures, par atelier de production.	252
Tableau A. 22 Etapes de procédé des technologies du site rejetant du Cuivre, par atelier de production.	254
Tableau A. 23 Etapes de procédé des technologies du site rejetant du Chlorure d'Hydrogène, par atelier de production.	256
Tableau A. 24 Etapes de procédé des technologies du site rejetant du Fluor, par atelier de production.	258
Tableau A. 25 Etapes de procédé des technologies du site rejetant des COV, par atelier de production.	261

Table des figures

TABLE DES FIGURES

Figure 1. 1 Concentration atmosphérique en CO ₂ et forçage radiatif durant les 10000 dernières années et depuis 1750 (encadré) [GIEC 2007].....	33
Figure 1. 2 Un des scénarios d'évolution de plusieurs paramètres, proposé dans la mise à jour de 2002 de The Limits to Growth [Meadows, 2004].	34
Figure 1. 3 Evolution du nombre d'équipements électriques et électroniques mis sur le marché en France entre 2006 et 2010 [ADEME, données 2010].	36
Figure 1. 4 Cycle de vie d'un produit / procédé / service.	40
Figure 1. 5 Cycle de vie d'un produit / procédé / service en intégrant la phase de conception.	41
Figure 1. 6 Wafer traité (1), Circuit intégré (2) et Circuit intégré encapsulé (3).....	45
Figure 1. 7 Transistor MOS (Métal Oxyde Semiconducteur).	45
Figure 1. 8 Evolution du nombre de grilles par wafer avec la réduction de la dimension des technologies.	46
Figure 1. 9 Phases de production de produits microélectroniques.	46
Figure 1. 10 Photographie du site STMicroelectronics de Crolles (Isère, France).....	47
Figure 1. 11 Photographie d'une partie de la salle blanche Crolles 300.	48
Figure 1. 12 Différents niveaux de la salle blanche Crolles 300 et circulation du flux d'air.	49
Figure 1. 13 Acheminement des effluents liquides dilués à la station de traitement (source : Ondéo Industrial Solutions).....	51
Figure 1. 14 Différentes zones de la station de traitement des effluents aqueux industriels (source : Ondéo Industrial Solutions).	52
Figure 1. 15 Développement d'une nouvelle technologie microélectronique sur le site de STMicroelectronics de Crolles.....	55
Figure 1. 16 Avancement du développement d'une nouvelle technologie microélectronique.	56
Figure 2. 1 Cycle de vie d'un produit microélectronique.	60
Figure 2. 2 Les quatre phases d'une étude d'ACV [ISO, 2006].....	73
Figure 3. 1 Modèle d'une route pour un produit issu d'une technologie microélectronique.....	85
Figure 3. 2 Lien entre step, sous-step et équipement.....	87
Figure 3. 3 Inventaire des flux d'un site de fabrication de produits microélectroniques.	88
Figure 3. 4 Process-flow (a) et recette de production (b).....	92
Figure 3. 5 Système de production.....	94

Table des figures

Figure 3. 6 Frontières de l'étude sur le système de production.	95
Figure 3. 7 Modélisation d'une technologie microélectronique.....	96
Figure 4. 1 Mode initial de collecte de données.	102
Figure 4. 2 Nombre de recettes collectées par rapport au nombre d'étapes différentes pour les ateliers de production et pour la technologie 45 nm.	103
Figure 4. 3 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier CMP en fonction des quantités consommées par toutes les étapes de procédé de la technologie 45 nm.....	108
Figure 4. 4 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques liquides dans l'atelier CMP pour la technologie 45 nm.....	109
Figure 4. 5 Comparaison des volumes de produits chimiques consommés par l'atelier CMP en Août 2010, obtenus par les recettes de production et par l'approche « top-down ».	114
Figure 4. 6 Comparaison des écarts entre les deux méthodes pour le volume de slurry GK consommé par wafer 300 mm.....	117
Figure 4. 7 Comparaison des écarts entre les deux méthodes pour le volume de slurry EPL2361 consommé par wafer 300 mm.....	118
Figure 4. 8 Comparaison des volumes de produits chimiques consommés par l'atelier CMP en Août 2010, obtenus par les recettes de production et par les achats, après discussion avec les experts de l'atelier CMP.	118
Figure 4. 9 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier Photolithographie en fonction des quantités consommées par toutes les étapes de la technologie 45 nm.	121
Figure 4. 10 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier Photolithographie en fonction des quantités consommées par toutes les étapes de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.	122
Figure 4. 11 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier Wet, par étape de la technologie 45 nm : détail des deux produits les plus consommés.....	123
Figure 4. 12 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier Wet, par étape de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.	124
Figure 4. 13 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Etch, par étape de la technologie 45 nm : détail des trois produits les plus consommés.	125
Figure 4. 14 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Etch, par étape de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.	126
Figure 4. 15 Consommation par étape du produit chimique gazeux le plus utilisé dans l'atelier Dry Stripping, pour la technologie 45 nm.	127

Table des figures

Figure 4. 16 Consommation par étape du second produit chimique gazeux le plus utilisé dans l'atelier Dry Stripping, pour la technologie 45 nm.....	128
Figure 4. 17 Consommation par étape des autres produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Dry Stripping, pour la technologie 45 nm.	128
Figure 4. 18 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Métal, par étape de la technologie 45 nm : détail des quatre produits les plus consommés.....	129
Figure 4. 19 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Métal, par étape de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.	129
Figure 4. 20 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Traitement Thermique, par étape de la technologie 45 nm : détail des trois produits les plus consommés.	130
Figure 4. 21 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Traitement Thermique, par step de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.	131
Figure 4. 22 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Diel, par étape de la technologie 45 nm : détail des quatre produits les plus consommés.....	132
Figure 4. 23 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Diel, par step de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.	133
Figure 4. 24 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier Diel, par étape de la technologie 45 nm.....	133
Figure 4. 25 Volumes consommés des trois produits chimiques liquides les plus utilisés pour le process des wafers 45 nm.	135
Figure 4. 26 Volumes consommés des produits chimiques liquides les plus utilisés pour le process des wafers 45 nm (produit 8500).	136
Figure 4. 27 Volumes consommés des quatre produits chimiques gazeux les plus utilisés pour le process des wafers 45 nm (produit 8500).....	138
Figure 4. 28 Volumes consommés des produits chimiques gazeux les plus utilisés pour le process des wafers 45 nm (produit 8500), hors N ₂	139
Figure 4. 29 Evolution du nombre d'étapes de procédé réalisées en 2011, pour la technologie 45 nm et pour l'ensemble des technologies du site.	141
Figure 4. 30 Evolution du nombre d'étapes de procédé par technologie.	144
Figure 4. 31 Flux entrants et sortants quantifiés du site et de la technologie 45 nm pour l'année 2011.	150
Figure 4. 32 Evolution de la consommation d'électricité et du nombre d'étapes de procédé réalisées chaque mois sur le site pour l'année 2011.	152
Figure 4. 33 Consommation d'électricité mensuelle du site pour l'année 2011.	153

Table des figures

Figure 4. 34 Représentation graphique de l'incertitude sur $C_{\text{Electricité_Step}}$ en fonction de la valeur de la part fixe F pour la consommation d'électricité du site en 2011.	156
Figure 4. 35 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site consommant de l'EDI.	159
Figure 4. 36 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation d'EDI du site pour l'année 2011.	161
Figure 4. 37 Ecart à la moyenne des valeurs mensuelles de $C_{\text{EDI_Step}}$ sur l'année 2011.	162
Figure 4. 38 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation de gaz naturel du site pour l'année 2011.	164
Figure 4. 39 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation d'acide sulfurique de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	165
Figure 4. 40 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge d'Azote dans les rejets de la station.	167
Figure 4. 41 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la charge d'Azote dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	168
Figure 4. 42 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques.	170
Figure 4. 43 Contributions trimestrielles d'une étape de procédé à la charge d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques pour l'année 2011.	171
Figure 4. 44 Réévaluation de la contribution de la technologie 45 nm aux impacts environnementaux du site pour l'année 2011.	174
Figure 4. 45 Contribution moyenne des étapes de procédé aux paramètres de consommation et de rejet.	176
Figure 5. 1 Indicateur Nombre de steps global et par atelier pour les technologies microélectroniques 45 et 28 nm.	185
Figure 5. 2 Suggestion d'utilisation de l'indicateur Nombre de steps par les différents acteurs du site.	186
Figure 5. 3 Indicateur Consommation de produits chimiques par step et par wafer, pour un atelier de production (CMP), pour les technologies microélectroniques 45 et 28 nm.	188
Figure 5. 4 Suggestion d'utilisation de l'indicateur Consommation de produits chimiques par step par les différents acteurs du site.	190
Figure 5. 5 Indicateur Consommation d'électricité pour les technologies 45 et 28 nm.	193
Figure 5. 6 Indicateur Consommation d'Electricité par atelier pour les technologies 45 et 28 nm.	193
Figure 5. 7 Indicateur Consommation d'Acide Sulfurique pour les technologies 45 et 28 nm.	195

Table des figures

Figure 5. 8 Indicateur Consommation d'Acide Sulfurique par atelier pour les technologies 45 et 28 nm.	195
Figure 5. 9 Indicateur PRG pour un atelier de production (Etch), pour les technologies microélectroniques 45 et 28 nm.	198
Figure 5. 10 Indicateur PRG détaillé pour un atelier de production (Etch), pour les technologies microélectroniques 45 et 28 nm.	199
Figure 5. 11 Indicateur Consommation d'EDI, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.	200
Figure 5. 12 Indicateur Rejet d'Azote, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.....	201
Figure 5. 13 Indicateur Rejet d'Ammoniac, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.....	202
Figure 5. 14 Suggestion d'utilisation des indicateurs Environnement par les différents acteurs du site.	204
Figure 5. 15 Processus de demande d'entrée de nouveaux produits chimiques sur le site.....	207
Figure 5. 16 Evolution du nombre d'étapes de procédé et du nombre de grilles avec le diminution de la dimension des technologies.	216
Figure 6. 1 Apports des indicateurs environnementaux d'aide à l'éco-conception des technologies micro- électroniques	218
Figure A. 1 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques liquides dans l'atelier Photolithographie, pour les deux produits les plus consommés, pour la technologie 45 nm.....	231
Figure A. 2 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques liquides dans l'atelier Photolithographie, hormis les deux produits les plus consommés, pour la technologie 45 nm.....	231
Figure A. 3 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques liquides dans l'atelier Wet, pour les deux étapes les plus consommatrices, pour la technologie 45 nm.	233
Figure A. 4 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques liquides dans l'atelier Wet, pour les étapes suivantes, pour la technologie 45 nm.....	234
Figure A. 5 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Etch, pour les huit étapes les plus consommatrices, pour la technologie 45 nm. .	235
Figure A. 6 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Etch, pour les étapes les moins consommatrices, pour la technologie 45 nm.	236
Figure A. 7 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Dry Stripping, pour les deux produits chimiques les plus consommés, pour la technologie 45 nm.....	237

Table des figures

Figure A. 8 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Dry Stripping, pour les autres produits chimiques, pour la technologie 45 nm.....	237
Figure A. 9 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Métal, pour les cinq étapes les plus consommatrices, pour la technologie 45 nm.	238
Figure A. 10 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Métal, pour les quatre étapes les moins consommatrices, pour la technologie 45 nm.....	239
Figure A. 11 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Traitement Thermique, pour les dix étapes les plus consommatrices, pour la technologie 45 nm.....	240
Figure A. 12 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Traitement Thermique, pour les quatre étapes les moins consommatrices, pour la technologie 45 nm.	240
Figure A. 13 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques dans l'atelier Diel, pour les sept étapes les plus consommatrices, pour la technologie 45 nm.	242
Figure A. 14 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques dans l'atelier Diel, pour les sept étapes les moins consommatrices, pour la technologie 45 nm.	242
Figure A. 15 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation d'Hydroxyde de Sodium de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	249
Figure A. 16 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation de chlorure de calcium de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	250
Figure A. 17 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation de chaux de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.....	251
Figure A. 18 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge de fluorure dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels.	252
Figure A. 19 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la charge de Fluorure dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	253
Figure A. 20 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge de Cuivre dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels.	255
Figure A. 21 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la charge de Cuivre dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.	255
Figure A. 22 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques.	257

Table des figures

Figure A. 23 Contributions trimestrielles d'une étape de procédé à la charge de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.	257
Figure A. 24 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge de Fluor dans les rejets atmosphériques.	259
Figure A. 25 Contributions trimestrielles d'une étape de procédé à la charge de Fluor dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.	260
Figure A. 26 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge de COV dans les rejets atmosphériques.	262
Figure A. 27 Contributions trimestrielles d'une étape de procédé à la charge de COV dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.	262
Figure A. 28 Indicateur Consommation d'Hydroxyde de Sodium pour les technologies 45 et 28 nm.	264
Figure A. 29 Indicateur Consommation d'Hydroxyde de Sodium par atelier pour les technologies 45 et 28 nm.	264
Figure A. 30 Indicateur Consommation de Chlorure de Calcium pour les technologies 45 et 28 nm.	265
Figure A. 31 Indicateur Consommation de Chlorure de Calcium par atelier pour les technologies 45 et 28 nm.	265
Figure A. 32 Indicateur Consommation de Chaux pour les technologies 45 et 28 nm.	266
Figure A. 33 Indicateur Consommation de Chaux par atelier pour les technologies 45 et 28 nm.	266
Figure A. 34 Indicateur Rejet de Fluorure, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.	267
Figure A. 35 Indicateur Rejet de Cuivre, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.	268
Figure A. 36 Indicateur Rejet de Chlorure d'Hydrogène, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.	269
Figure A. 37 Indicateur Rejet de Fluor, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.	270
Figure A. 38 Indicateur Rejet de COV, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.	271

1. INTRODUCTION GENERALE

1.1 Impact des activités humaines sur l'environnement

1.1.1 Constat

Les activités humaines ont des effets très importants sur notre environnement ; ceux-ci se sont beaucoup amplifiés depuis la révolution industrielle (début du XIX^{ème} siècle). Parmi les principaux impacts environnementaux qui ont largement augmenté avec l'industrialisation massive, on peut citer l'épuisement des ressources naturelles, l'augmentation de l'effet de serre (nous voyons par exemple l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ sur la figure 1.1), la destruction de la couche d'ozone, l'acidification des océans, etc.

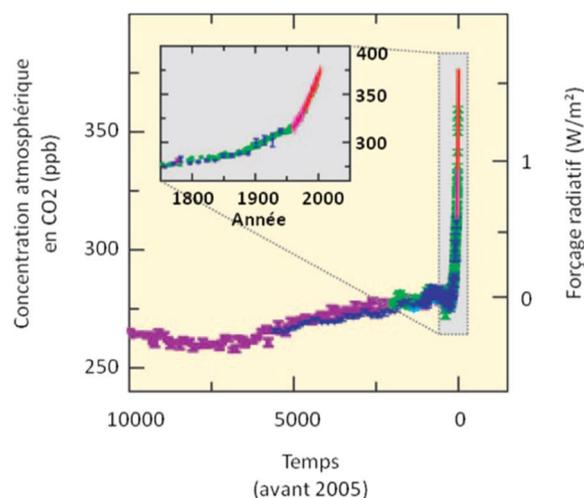


Figure 1. 1 Concentration atmosphérique en CO₂ et forçage radiatif durant les 10000 dernières années et depuis 1750 (encadré) [GIEC 2007].

Les effets visibles de tels impacts sont l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère et des océans, la fonte des neiges et de la glace, ou encore l'élévation du niveau moyen de la mer. Et il semble de plus en plus évident que les activités humaines sont en grande partie responsables de ces changements : « On peut affirmer avec un degré de confiance très élevé qu'en moyenne, les activités humaines menées depuis 1750 ont eu globalement un effet de réchauffement net » [GIEC, 2007].

Par ailleurs, en marge des effets à long terme des activités humaines sur l'environnement, d'importantes catastrophes écologiques et humaines liées à l'industrie ont eu lieu depuis le XIX^{ème} siècle : épisodes de smog soufré à Londres (à la fin du XIX^{ème} et au XX^{ème} siècle), fuite de gaz toxique d'une usine de pesticides à Bhopal (Inde, décembre 1984), pollution des eaux aux métaux lourds par l'industrie pétrochimique à Minamata (Japon, XX^{ème} siècle), etc.

Chapitre 1 – Introduction générale

Ces constats ont placé les problématiques environnementales parmi les préoccupations majeures de notre temps. Cette prise de conscience de notre impact sur l'environnement et des risques que cela représente pour notre avenir s'accompagne de nombreuses concertations des gouvernements et des collectivités, menant à des réglementations internationales et nationales dans le but de maîtriser et réduire notre empreinte écologique.

1.1.2 Mobilisation internationale dans la protection de l'environnement

L'importance de réfléchir aux conséquences environnementales à long terme du développement économique et industriel de nos sociétés a été formalisée pour la première fois par les membres du Club de Rome, dans leur premier rapport : *The Limits to Growth* [Meadows, 1972]. Cette association, créée en 1968 par des hommes politiques, des scientifiques, des industriels... a permis la prise de conscience des risques pour la planète, et donc pour l'Homme, de ne pas tenir compte du caractère limité des ressources naturelles.

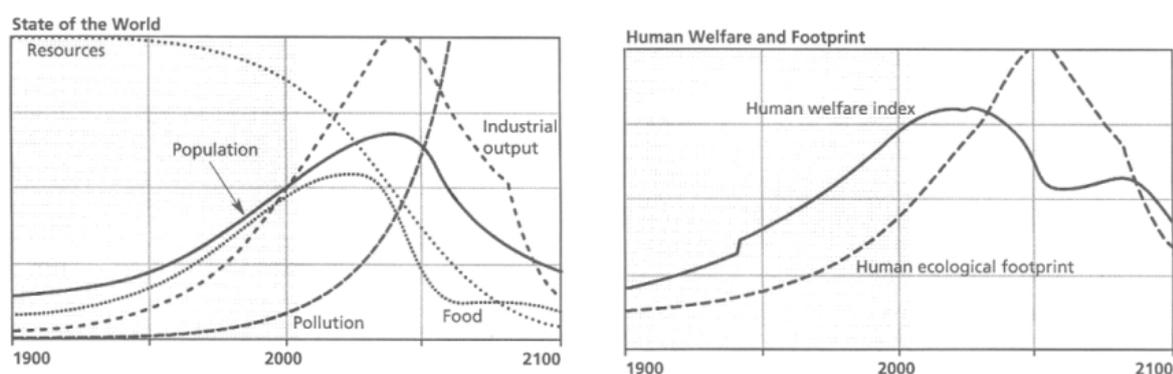


Figure 1. 2 Un des scénarios d'évolution de plusieurs paramètres, proposé dans la mise à jour de 2002 de The Limits to Growth [Meadows, 2004].

Les ressources de notre planète ne sont en effet pas infinies, de même que ses capacités à absorber les émissions dues aux activités humaines : la croissance démographique, et le développement des sociétés qu'elle implique, doit tenir compte de ces réalités (figure 1.2). La première conférence des Nations unies sur les thèmes de l'environnement et du développement (Sommet de la Terre) a eu lieu à Stockholm peu après la publication du rapport du Club de Rome, en 1972 : pour la première fois, de nombreux gouvernements se réunissent afin de définir les bases d'une réflexion à long terme sur l'importance d'intégrer les préoccupations environnementales aux stratégies de développement économique.

La première définition du développement durable a alors été donnée par le rapport Brundtland [Brundtland, 1987], rédigé en 1987 par la Commission mondiale sur l'Environnement et le Développement de l'Organisation des Nations Unies :

« Le développement durable, c'est s'efforcer de répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité de satisfaire ceux des générations futures. »

Chapitre 1 – Introduction générale

Depuis environ quarante ans, la protection de l'environnement est donc progressivement devenue l'une des grandes préoccupations internationales. Les conférences régulières sur ce thème ont donné lieu à plusieurs programmes d'actions à l'échelle mondiale afin d'impliquer tous les acteurs de nos sociétés (individus, industries, collectivités, gouvernements) et de coordonner leurs efforts. Le Protocole de Montréal [ONU, 1987], en 1987, consiste en un ensemble de mesures visant à lutter contre la diminution de la couche d'ozone : les états se sont engagés à supprimer et remplacer progressivement les substances responsables de ce phénomène.

Le Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992 s'est ensuite appuyé sur le rapport Brundtland pour mettre en place un programme d'actions, Action 21 [ONU, 1992], composé de 21 engagements internationaux en faveur du développement durable qui ont été déclinés à tous les niveaux de nos sociétés (collectivités, entreprises...). L'industrie fait partie des secteurs visés par Action 21 : d'après le chapitre 30, elle est notamment incitée à améliorer les performances environnementales de ses techniques de production, en maîtrisant au mieux ses interactions avec l'environnement (en réduisant son utilisation de ressources naturelles par exemple) [ONU, 1992].

Nous pouvons enfin citer le Protocole de Kyoto [ONU, 1997], en 1997, dans le cadre duquel des pays se sont engagés à réduire leurs émissions de six gaz à effet de serre.

Les conférences internationales se poursuivent régulièrement afin d'assurer un développement durable, et de coordonner les actions : Sommet de la Terre de Johannesburg (2002), 15^{ème} Conférence des parties de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (Copenhague, 2009), Sommet de la Terre de Rio de Janeiro (Juin 2012)...

1.2 Les impacts environnementaux de l'industrie

L'industrie participe largement aux effets des activités humaines sur l'environnement : consommation de ressources naturelles, rejets dans l'air, l'eau et le sol, génération de déchets... En effet, on estime qu'en France en 2007, l'industrie était responsable de plus de 60 % des prélèvements totaux en eau [Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2011 - A]. Concernant la consommation d'énergie, en 2009, la consommation finale énergétique de l'industrie représentait plus de 20 % de l'énergie finale totale consommée en France [Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2011 - B]. Quant à la génération de déchets, les industries françaises en ont produit plus de 20 millions de tonnes en 2008, dont presque 3 millions de déchets dangereux [Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2011 - C].

1.2.1 L'industrie des équipements électriques et électroniques

Les équipements électriques et électroniques (EEE) sont, d'après l'article R543-172 du Code de l'Environnement [Etat Français, 2007], les « équipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques, et les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs [...], et conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1000 volts en courant alternatif et 1500 volts en courant continu ».

Ces équipements représentent un marché en forte croissance : la quantité d'EEE mis sur le marché en France augmente depuis 2006 jusqu'à 2010 (la crise économique de 2009 a provoqué la diminution de la

quantité d'EEE que l'on observe sur la figure 1.3). En 2010, le tonnage d'EEE mis sur le marché en France a augmenté de 5 % par rapport à 2009. La quantité d'EEE mis sur le marché en France en 2010 a augmenté de 10 % par rapport à 2009 (l'augmentation plus importante de la quantité d'EEE par rapport au tonnage d'EEE s'explique par la miniaturisation et les avancées technologiques) [EEE-ADEME].

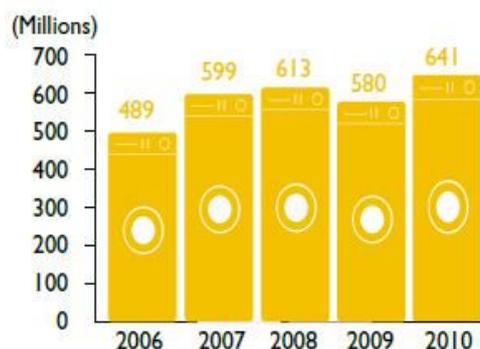


Figure 1. 3 Evolution du nombre d'équipements électriques et électroniques mis sur le marché en France entre 2006 et 2010 [ADEME, données 2010].

La croissance importante du marché des EEE incite à identifier les impacts environnementaux que ces équipements génèrent, et ce sur toutes les phases de leur cycle de vie (consommation de ressources pour la production d'EEE et pendant les phases d'utilisation, déchets...).

1.2.2 L'industrie des semiconducteurs

Les semiconducteurs sont des matériaux, comme le Silicium, dont la conductivité électrique se situe entre celle des conducteurs et celle des isolants. On les utilise pour fabriquer des composants électroniques. Les semiconducteurs sont destinés à être intégrés dans des produits de nombreux secteurs : l'informatique (ordinateurs, périphériques), l'automobile (systèmes de sécurité, énergie, systèmes de contrôle), la communication (téléphonie, serveurs), l'électroménager..., et représentent un marché très important. D'après l'ESIA (European Semiconductor Industry Association), sur les quarante dernières années, la croissance annuelle moyenne de l'industrie des semiconducteurs a été plus forte que celle de tous les autres secteurs industriels. Des moyens sont en outre mis en œuvre pour assurer l'avancée technologique et la compétitivité des filières microélectroniques : lancé en 2009, le programme coopératif de recherche et développement Nano 2012, associant l'Etat français, des collectivités territoriales ainsi que des partenaires scientifiques et industriels (CEA, STMicroelectronics, IBM), vise à maintenir les industries du bassin grenoblois parmi les leaders du secteur des semiconducteurs.

Malgré les petites dimensions des circuits intégrés, et une tendance à la miniaturisation, l'industrie des semiconducteurs a des impacts importants sur l'environnement sur toutes les phases du cycle de vie des produits microélectroniques. Pour certains produits, la phase de fabrication de produits électroniques fait partie des étapes les plus impactantes : grande consommation de ressources (énergie,

produits chimiques, eau), génération de déchets... D'après une étude de la consommation énergétique d'une puce DRAM de 32 MB tout au long de son cycle de vie, la phase de fabrication est la plus importante : elle représente presque la moitié de la quantité d'énergie utilisée sur tout le cycle de vie [Williams, 2004]. Ce résultat est confirmé par Plepys [Plepys, 2004] : fabriquer une micro-puce nécessite trois fois plus d'énergie que son utilisation (en incluant la production de Silicium et des produits chimiques), et constitue l'étape qui consomme le plus d'énergie. Des centaines de produits chimiques parfois dangereux pour l'homme et l'environnement peuvent être utilisés, dont des perfluorocarbures (PFC) qui ont un impact important sur l'effet de serre. Par ailleurs, les nouvelles technologies de production de semiconducteurs imposent une pureté de plus en plus élevée de ces produits chimiques, ce qui implique des consommations énergétiques plus importantes lors de la fabrication de ces substances (les étapes de purification étant très énergivores) [Williams, 2004]. La consommation d'eau est également significative : 32 litres par puce DRAM 32 MB selon Williams [Williams, 2004].

L'intégration de l'électronique dans de plus en plus de produits, et les évolutions rapides des performances techniques des produits issus de l'industrie des semiconducteurs imposent de maîtriser les répercussions de ce secteur d'activités sur l'homme et l'environnement. Les études déjà menées depuis plusieurs années dans ce domaine confirment que ces impacts ne sont pas négligeables. Toutes les phases du cycle de vie des semiconducteurs sont concernées, y compris la phase de production. C'est dans ce but que les entreprises de l'industrie des semiconducteurs mettent en place des projets leur permettant de connaître précisément les impacts environnementaux liés à leurs activités, et ainsi de les réduire.

1.2.3 Evolution du rapport de l'industrie à l'environnement

Les années 1960-1970 marquent l'apparition des premières mesures de protection de l'environnement : les industries investissent alors essentiellement dans des actions curatives centrées sur les sites de production. Il s'agit de traiter la pollution sur les sites où se déroulent les activités industrielles, selon l'approche « End-of-pipe », afin que ces activités n'aient pas de répercussions négatives sur l'environnement. Les systèmes de traitement peuvent être des infrastructures comme les stations de traitement des effluents liquides, des laveurs de gaz,... et s'accompagnent de contrôles de pollution avant rejet vers le milieu naturel.

Sous la pression des gouvernements, les industries s'impliquent donc dans la réduction de leurs impacts environnementaux. Les activités industrielles sont en effet de plus en plus contrôlées, et soumises à des contraintes réglementaires strictes en ce qui concerne leurs impacts sur l'environnement. Les entreprises peuvent par exemple être soumises à la réglementation ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) si des risques pour l'environnement découlent de leurs activités : elles ont alors à respecter des prescriptions techniques, et sont contrôlées régulièrement. Par ailleurs, d'après la directive européenne Seveso [Commission Européenne, 1996], les industries utilisant des produits chimiques dangereux doivent être recensées. Les risques majeurs pour l'homme et pour l'environnement liés à leurs activités doivent être identifiés, et ces entreprises doivent

être capables de maîtriser au mieux les conséquences d'un accident industriel. Nous sommes alors dans une approche « site » : des systèmes de traitement de la pollution sont implantés sur les sites de production afin d'empêcher les conséquences des activités industrielles sur l'extérieur, que ce soit en fonctionnement normal ou en cas d'accident.

Les industriels cherchent alors à réduire les coûts engendrés par toutes ces mesures de protection de l'environnement ; dans les années 1980, ils s'attachent à minimiser la quantité de polluants à traiter, et donc la quantité de rejets. La prévention de la pollution sur site se développe : les équipements les plus polluants sont remplacés afin d'assurer une production plus respectueuse de l'environnement. Nous sommes alors dans une approche « middle-of-pipe ».

Afin de prévenir la pollution de leurs sites de production, les industriels s'investissent dans des démarches leur permettant de maîtriser au mieux les impacts environnementaux de leurs activités. Les entreprises sont par exemple de plus en plus nombreuses à développer un système de management environnemental (SME). Les objectifs d'un SME sont d'évaluer les impacts environnementaux d'une activité, et de chercher à les réduire. Les entreprises mettent en place un tel système pour répondre aux exigences réglementaires, pour réaliser des économies, pour améliorer leur image et ainsi mieux se placer par rapport à la concurrence,... Les actions découlant d'un SME, dont la première est l'évaluation des impacts de l'entreprise sur l'environnement et les risques qu'ils représentent, peuvent être la réduction des consommations (matières premières, énergie), la diminution des déchets et rejets,... Les SME sont basés sur le principe d'amélioration continue : les entreprises ayant fait le choix de s'investir dans la protection de l'environnement s'adaptent en permanence aux évolutions réglementaires et techniques et cherchent toujours de nouvelles solutions pour améliorer leurs performances environnementales. De plus, les industriels valorisent souvent leurs efforts pour l'environnement grâce à des démarches volontaires de certification, comme l'ISO 14001 [ISO, 2004] ou l'EMAS (Eco-Management and Audit Scheme) [Commission Européenne, 2009]. En effet, les exigences réglementaires locales imposent aux industriels de surveiller et de maîtriser la qualité de leurs interactions avec l'environnement. Les entreprises peuvent enfin renforcer leur système de management de l'environnement par un système de management de la santé et de la sécurité au travail afin de prévenir les risques professionnels, grâce à la certification par la norme britannique OHSAS 18001 (Occupational Health and Safety Assessment Series) [BSI, 2007].

L'approche « Middle-of-pipe » constitue donc une réelle avancée en ce qui concerne la prise en compte de l'environnement par les industries. Cependant, la mise en place de systèmes de management et les certifications aux normes, que ce soit du domaine de l'environnement ou de la santé et sécurité, visant à prévenir les impacts d'une industrie sur l'environnement sont toujours basées sur la seule gestion de l'activité du site de production. Il s'agit en effet d'améliorer les techniques de production et de suivre des paramètres environnementaux liés à l'activité du site afin d'avoir moins de pollutions à gérer.

Un premier changement important s'opère ensuite avec la reconnaissance d'une responsabilité des industries sur la fin de vie des produits qu'ils fabriquent. Les industries manufacturières sont directement incitées à améliorer leurs performances environnementales par le principe de pollueur-payeur, énoncé dans l'article L110-1 du Code de l'Environnement [Etat Français, 2013], qui stipule que

« les frais résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur ». Ce principe a été à l'origine du principe de Responsabilité Elargie du Producteur (REP) consistant à faire prendre en charge la gestion des déchets par les producteurs de produits manufacturés, et sur lequel se basent les politiques environnementales actuelles. Le Code de l'Environnement [Etat Français, 2005] français, qui date de 2005, regroupe ainsi des textes permettant d'encadrer toutes les activités qui peuvent avoir des impacts sur l'environnement. Les risques technologiques sont pris en compte dans ces textes, notamment dans le livre V concernant la prévention des risques, des pollutions et des nuisances (textes sur les ICPE, les produits chimiques, les déchets...).

Des directives spécifiques à différents secteurs industriels ont ainsi été établies, notamment pour les producteurs d'équipements électriques et électroniques (EEE). La directive européenne RoHS [Commission Européenne, 2011] vise à limiter la présence de certaines substances dangereuses dans les EEE destinés au marché européen. Dans ce but, les substances jugées les plus nocives ne doivent pas apparaître en quantité supérieure aux seuils fixés par cette directive, et doivent être remplacées par des substances plus sûres. Cela permet de réduire les risques directs pour l'homme et pour l'environnement, mais également de mieux gérer les déchets d'EEE (notamment en augmentant les possibilités de recyclage). La directive DEEE [Commission Européenne, 2012] a quant à elle pour but d'impliquer les producteurs d'équipements électriques et électroniques dans l'élimination de ces équipements en fin de vie. Elle incite les producteurs à prendre en compte la problématique déchets dès la conception et la fabrication d'équipements électriques et électroniques, et de mettre en place des filières de traitement de ces déchets (réutilisation, valorisation) afin de réduire la quantité de déchets à éliminer.

Nous pouvons enfin citer le règlement REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) [Commission Européenne, 2006] qui oblige les industriels à gérer l'utilisation de leurs produits chimiques dangereux pour l'homme et l'environnement, et à communiquer aux utilisateurs sur la présence de ces substances dans leurs produits. On reconnaît ainsi que les impacts pour l'homme et l'environnement liés à l'utilisation de produits chimiques pour la fabrication d'un produit ne se limitent pas qu'aux impacts que cela peut représenter pendant sa phase de production. Par ailleurs, un des objectifs de cette réglementation est de remplacer les substances les plus préoccupantes par des substances (ou des technologies) moins dangereuses, si des alternatives économiquement et techniquement viables existent.

Bien que la REP implique essentiellement des actions sur la gestion des produits en fin de vie, comme la collecte sélective et la mise en place de filières de traitement des déchets, et est donc centrée en aval de la phase de production, le fait de transférer aux industriels une responsabilité qui incombait auparavant aux collectivités est une étape importante pour que les entreprises reconnaissent tous les impacts environnementaux générés par leurs activités, et qu'elles cherchent à les réduire.

La dernière avancée majeure concernant le rôle de l'industrie dans la protection de l'homme et de l'environnement arrive avec la notion de cycle de vie des produits. Un produit (ou un procédé ou un service) est caractérisé par l'ensemble des étapes nécessaires à sa fabrication, à sa distribution, à son

Chapitre 1 – Introduction générale

utilisation et à sa fin de vie. Les industries manufacturières se reconnaissent alors une responsabilité sur les impacts environnementaux de toutes les phases du cycle de vie des produits (figure 1.4).

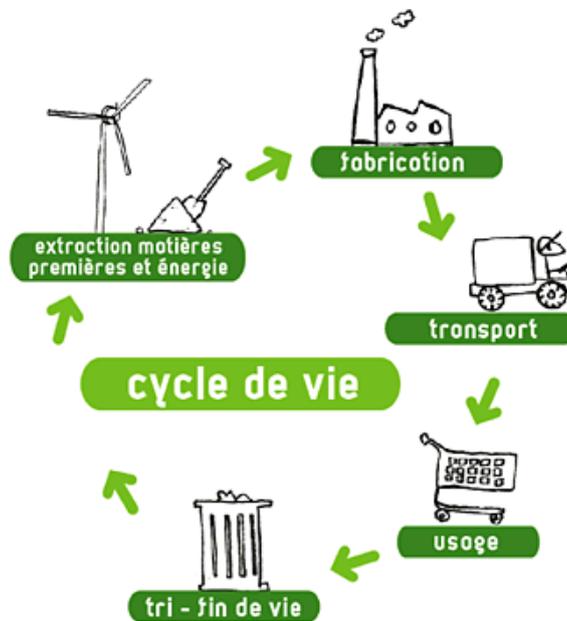


Figure 1. 4 Cycle de vie d'un produit / procédé / service.

Les règlements comme REACH incitent les industries à minimiser leurs impacts sur l'homme et l'environnement. Pour cela, les entreprises sont parfois obligées de remplacer certaines substances chimiques présentes dans leurs produits par des alternatives moins nocives. Cela représente un coût pour les producteurs (recherche et développement, modification des procédés de fabrication), qui prennent conscience de l'intérêt d'anticiper de telles contraintes, en concevant des produits les moins impactants possibles tout au long de leur cycle de vie. La phase de conception joue alors un rôle important dans les futurs impacts environnementaux d'un produit.

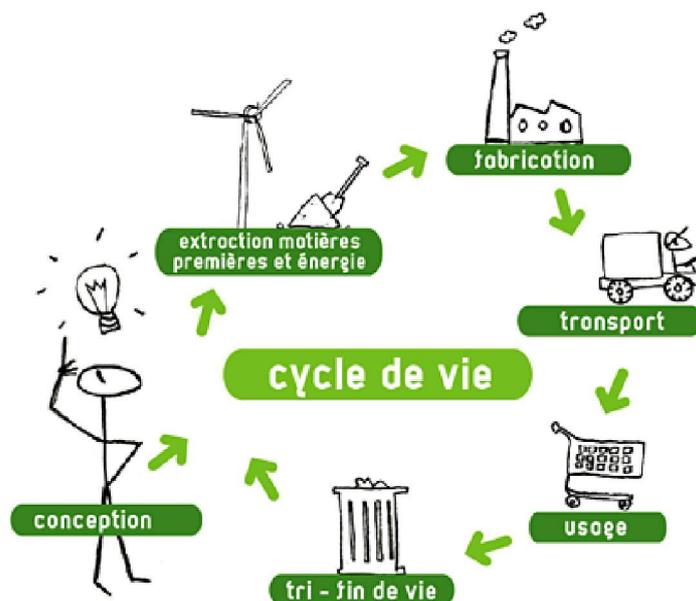


Figure 1. 5 Cycle de vie d'un produit / procédé / service en intégrant la phase de conception.

Depuis les années 1990, les sites industriels anticipent donc les éventuelles pollutions en considérant tout le cycle de vie des produits : sélection de matériaux moins polluants, optimisation des systèmes de production, prise en compte du futur déchet que constituera le produit... Afin de rendre les actions visant à améliorer les performances environnementales les plus efficaces possible, de plus en plus d'entreprises font le choix d'éco-concevoir leurs produits. L'éco-conception, conséquence logique du principe d'amélioration continue sur lequel reposent les SME, consiste à intégrer des caractéristiques environnementales dans la conception d'un produit, procédé ou service en vue d'améliorer la performance environnementale du produit tout au long de son cycle de vie (figure 1.5) [Commission Européenne, 2009]. D'après la norme ISO 14062 [ISO, 2002] sur l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits, tenir compte de critères environnementaux le plus en amont possible du processus de conception permet de plus grandes marges d'action pour améliorer les produits (lorsque les décisions techniques sont validées, il est plus difficile et plus coûteux d'effectuer des modifications).

Sous la pression des gouvernements, les industries ont donc mis en place de nombreuses actions, souvent coûteuses, afin de réduire leurs impacts sur l'homme et sur l'environnement. Pour une entreprise, avoir de bonnes performances environnementales représente cependant des avantages concurrentiels : la conscience environnementale se généralise, les acheteurs sont de plus en plus soucieux d'acheter des produits plus respectueux de l'environnement. D'après une enquête CREDOC [Credoc, 2010] réalisée pour l'ADEME en 2010, 86 % des consommateurs interrogés se disent assez sensibles ou très sensibles aux problèmes d'environnement et auront donc tendance à acheter des produits moins impactants pour l'environnement, 44 % associent la notion de développement durable à la consommation de produits plus respectueux de l'environnement, et 54 % souhaiteraient un choix plus large de produits « verts ».

Chapitre 1 – Introduction générale

De plus, les industriels sont aujourd'hui évalués sur leurs performances environnementales par les agences de notation, en particulier en termes d'éco-conception. Des aspects économiques poussent donc également les industriels à s'investir dans ce domaine : amélioration de l'image des entreprises, adéquation avec les exigences des clients, réponse aux critères établis par les agences de notation, etc.

1.3 Comment l'industrie des semiconducteurs s'implique-t-elle pour préserver l'environnement ?

1.3.1 Principales actions menées par l'industrie des semiconducteurs pour préserver l'environnement

La première action des industries et laboratoires des semiconducteurs pour réduire efficacement leurs impacts environnementaux a consisté à se regrouper afin de trouver ensemble des solutions alliant avancée technologique et amélioration des performances environnementales.

Le SITELESC (Syndicat des Industries de Tubes Electroniques et Semiconducteurs) regroupe de nombreux acteurs de l'industrie de la micro et nanoélectronique (centres de conception, laboratoires de recherche et développement, équipementiers et fabricants de composants électroniques). Ce syndicat dispose d'une commission Environnement qui suit les mesures entreprises pour réduire les impacts environnementaux des activités de l'industrie des semiconducteurs. Il accompagne ainsi les entreprises dans la mise en place d'actions permettant de répondre aux réglementations européennes comme REACH ou CLP (classification des substances), il suit les émissions de PFC...

Le SITELESC travaille également avec le syndicat européen des semiconducteurs, l'EECA-ESIA (European Electronic Component Manufacturers Association – European Semiconductor Industry Association), qui incite les industriels à être proactifs concernant la protection de l'homme et de l'environnement. Voici quelques exemples d'actions :

- Concernant l'émission de PFC, les process les plus émetteurs de gaz à effet de serre ont été optimisés, des produits chimiques ont été remplacés par des substances moins nocives, des systèmes d'abattement de la pollution ont été mis en place,... dans le but de répondre aux objectifs d'émissions de gaz à effet de serre que les industries se sont fixées.

- Afin de maîtriser les impacts environnementaux liés à l'utilisation de produits chimiques, les industries des semiconducteurs analysent précisément les risques pouvant découler de l'intégration de nouvelles substances dans les process de fabrication. Des systèmes de ségrégation des produits chimiques ont été installés afin d'optimiser l'abattement des pollutions dans les stations de traitement des effluents liquides, il en est de même pour les rejets atmosphériques.

L'EECA-ESIA est également membre du service ESH (Environment Safety and Health) du WSC (World Semiconductor Council), un regroupement d'associations du secteur des semiconducteurs d'Asie, d'Europe et des Etats-Unis. Le WSC s'investit dans des projets à long-terme pour rendre les industries micro et nanoélectroniques plus respectueuses de l'environnement (sites de production plus

« propres », meilleures performances énergétiques des produits, conception de produits permettant de diminuer les impacts environnementaux de nos sociétés...).

Pour conclure cette partie, voici quelques exemples d'actions mises en place sur le site de STMicroelectronics Crolles, site avec lequel nous avons mené ce projet de recherche [STMicroelectronics Crolles, 2011] :

- Traitement et réutilisation des eaux de rinçage des ateliers de fabrication
- Programme de réduction de la consommation d'électricité
- Optimisation de la quantité de produits chimiques présents sur site
- Systèmes de traitement des PFC directement en sortie de certains équipements de production
- Intégration de contraintes environnementales dans les critères de choix des équipements

1.3.2 L'éco-conception dans l'industrie des semiconducteurs

Il est admis que les produits liés à l'énergie représentent une large part de la consommation de ressources naturelles et d'énergie (Directive ErP sur l'éco-conception pour les produits liés à l'énergie [Commission Européenne, 2009]). Or on a vu que les industriels ont longtemps investi dans des mesures curatives pour limiter leurs impacts environnementaux. Les actions étaient plutôt situées en aval du processus de production, et il s'agissait donc principalement de « réparer ou limiter les impacts sur l'environnement, plutôt que de préserver le patrimoine existant » [Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2011 - D]. Encore en 2009, les actions curatives de traitement et de recyclage représentaient 67 % des investissements spécifiques des industries. 24 % des investissements étaient alloués à la prévention, et 8,4 % pour les mesures de contrôle [Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2011 - D].

Selon la directive ErP, il apparaît en effet que « de nombreux produits liés à l'énergie présentent un potentiel significatif d'amélioration dans le but de réduire les impacts environnementaux et de réaliser des économies d'énergie au moyen d'une amélioration de la conception ». De plus, d'après la directive ErP, « il convient d'agir au cours de la phase de conception du produit lié à l'énergie, puisqu'il s'avère que la pollution causée durant le cycle de vie d'un produit est déterminée à ce stade, et que la plupart des coûts associés sont engagés pendant cette phase ».

Ainsi les leaders mondiaux de l'industrie des semiconducteurs identifient les difficultés à surmonter pour assurer le bon développement de ce secteur tout en améliorant leurs performances environnementales. Le plan d'actions ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) [ITRS, 2011] propose donc des solutions adaptées aux besoins de l'industrie de la micro et nanoélectronique. Selon ces études, il apparaît notamment important d'éco-concevoir les process et les produits, par exemple en développant des process ayant moins d'impacts sur l'homme et l'environnement, tout en répondant aux besoins technologiques : diminution de la consommation de produits chimiques, utilisation de produits moins dangereux, réduction des émissions de gaz à effet de serre, développement de process moins consommateurs d'énergie et d'eau, analyse des risques des

nouveaux produits chimiques... Cela pourrait permettre d'inverser la tendance actuelle qui, avec l'augmentation de la taille des tranches de Silicium (ou « wafers ») sur lesquels sont fabriqués les produits microélectroniques, l'augmentation du nombre d'étapes de process, et les exigences plus importantes de pureté des produits chimiques et de l'eau, semble aller vers une augmentation de ressources par wafer.

1.4 Question de recherche

Il apparaît donc indispensable de connaître le plus précisément possible les impacts environnementaux des produits microélectroniques à chaque phase de leur cycle de vie. La fabrication de semiconducteurs fait partie des étapes les plus impactantes, et les associations d'industriels de ce secteur ont identifié les besoins les plus urgents pour réduire ces impacts. Les nombreuses mesures de réduction des impacts environnementaux mises en place sur les sites de production se sont révélées efficaces ; le prochain levier d'amélioration se situe au niveau des produits, qui doivent être conçus de façon à avoir les meilleures performances environnementales sur tout leur cycle de vie. Eco-concevoir les process de fabrication apparaît comme l'un des points clefs des actions à mettre en place : intégrer des paramètres environnementaux dans les étapes de conception d'une nouvelle technologie est le meilleur moyen de minimiser ses futurs impacts.

Les démarches d'éco-conception de process doivent donc impliquer la R&D (= Recherche et Développement), afin, non seulement de leur fournir les moyens de tenir compte de l'environnement dès les premières étapes du développement d'une nouvelle technologie, mais aussi pour permettre aux équipes ESH de connaître précisément les impacts des technologies sur l'environnement. Il s'agit alors de définir la nature des informations à maîtriser pour caractériser les technologies microélectroniques, ainsi que le type d'outils nécessaires à la R&D et aux équipes ESH, afin que la prise en compte de critères environnementaux lors de la conception des nouvelles technologies permette réellement d'améliorer leurs performances environnementales.

Cette thèse, financée par la région Rhône-Alpes dans le cadre du projet Nano 2012, a pour but de répondre aux besoins d'un site de R&D / Production de semiconducteurs pour améliorer ses performances environnementales. La compagnie STMicroelectronics, investie depuis longtemps dans la protection de l'environnement, et après avoir mené de nombreuses actions visant à réduire ses impacts environnementaux, souhaite logiquement aller plus loin en éco-concevant ses produits et procédés. Ce projet porte sur l'éco-conception des procédés de fabrication de l'industrie des semi-conducteurs. Il s'agit de caractériser les performances environnementales de ces procédés pour développer les outils d'aide aux éco-concepteurs de technologies. Ce travail s'appuie sur l'organisation et les données du centre de Crolles de STMicroelectronics. Dans les paragraphes suivants, nous présentons les différentes entités du site de Crolles.

1.5 Le cas industriel de support à l'étude : le site de Crolles de STMicroelectronics

1.5.1 Qu'est-ce qu'une technologie microélectronique ?

Une technologie microélectronique permet de produire des circuits intégrés, ou puces électroniques, à l'échelle micro- ou nanométrique c'est-à-dire respectivement 10^{-6} ou 10^{-9} mètres. Un circuit intégré est un ensemble de composants (transistors, résistances, diodes, condensateurs) placés sur une même puce, et permettant de réaliser différentes fonctions électroniques. Ces composants sont connectés entre eux et sur un matériau semi-conducteur, dans notre cas une plaque de Silicium, appelée « wafer » dans le monde de la microélectronique (figure 1.6).

Un semi-conducteur est un matériau dont les propriétés électriques sont entre celles des conducteurs et celles des isolants : il conduit le courant uniquement sous certaines conditions. Sa conductivité augmente notamment avec la température, et grâce au dopage du matériau semi-conducteur par des atomes spécifiques.

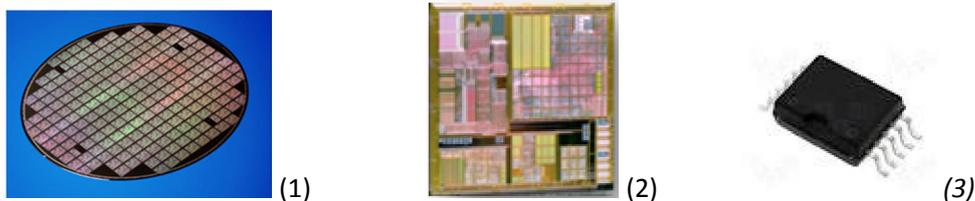


Figure 1. 6 Wafer traité (1), Circuit intégré (2) et Circuit intégré encapsulé (3).

Une technologie est caractérisée par la largeur de grille qui correspond à la plus petite dimension réalisée dans une puce. Pour la technologie 45 nm, les grilles les plus petites sont larges de 45 nm. Nous pouvons illustrer la notion de grille par l'exemple d'un transistor : il s'agit d'un appareil semiconducteur actif avec trois électrodes, qui peut être soit un amplificateur, soit un interrupteur. Le principe de fonctionnement d'un transistor MOS (représenté sur la figure 1.7 ci-dessous) est le suivant : un canal d'électrons se forme sous l'isolant de grille (ou oxyde de grille), et, sous l'effet d'une différence de potentiel entre la source et le drain, les électrons circulent entre ces deux points, créant ainsi un courant électrique.

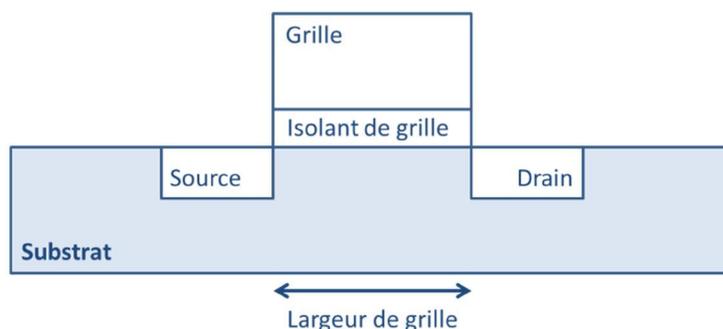


Figure 1. 7 Transistor MOS (Métal Oxyde Semiconducteur).

Chapitre 1 – Introduction générale

Le nombre de produits par wafer augmente avec les avancées technologiques. La figure 1.8 montre l'évolution du nombre de grilles par mm² de wafer avec la diminution de leurs dimensions :

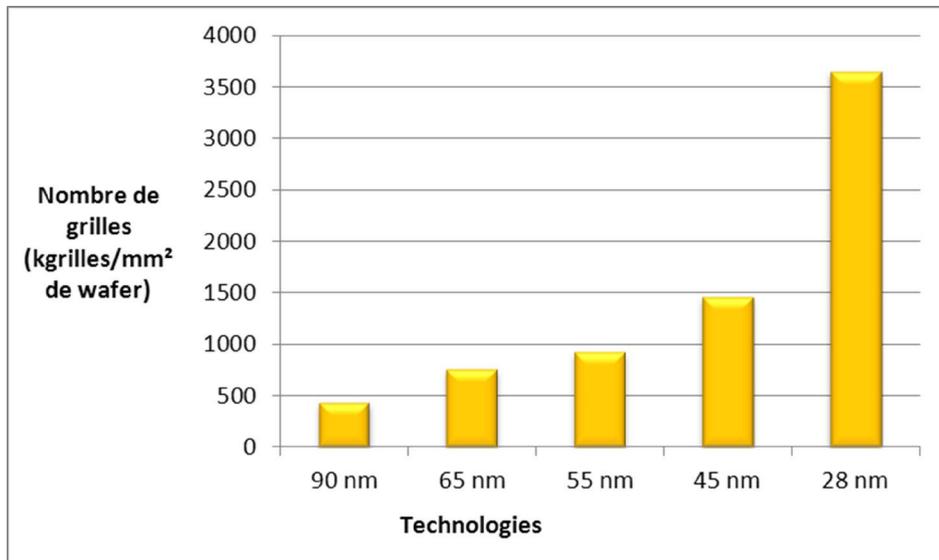


Figure 1. 8 Evolution du nombre de grilles par wafer avec la réduction de la dimension des technologies.

Aujourd'hui, il peut y avoir plus d'un milliard de transistors sur un circuit intégré. Les produits semiconducteurs sont utilisés dans de nombreux secteurs : automobile, électroménager, communication, informatique... Nous pouvons ainsi utiliser chaque jour jusqu'à deux-cent cinquante circuits électroniques.

1.5.2 Présentation du site

Le site de Crolles (Isère) est un site de Recherche et Développement (R&D) et de fabrication de produits microélectroniques semi-conducteurs. On y conçoit les nouvelles technologies et les nouveaux produits, que l'on fabrique sur des plaquettes de Silicium (ou wafers) de 200 et 300 mm de diamètre. Plus de quatre mille employés travaillent sur le site de Crolles, ainsi que plus de mille sous-traitants.

Le site de Crolles est un site de « Front-End », c'est-à-dire une usine dans laquelle on fabrique des circuits sur les wafers de silicium. Dans l'industrie du semi-conducteur, le Front-End correspond aux premières phases du cycle de production. Après la réalisation de tests électriques des puces (afin de distinguer les puces fonctionnelles des autres), les wafers partent vers des sites de « Back-End », où ont lieu le découpage des puces, leur encapsulation (mise en boîtier), et les tests finaux (figure 1.9).



Figure 1. 9 Phases de production de produits microélectroniques.

Chapitre 1 – Introduction générale

Le site de STMicroelectronics de Crolles est constitué de deux entités, visibles sur la figure 1.10 ci-dessous : Crolles 200 (depuis 1992) et Crolles 300 (depuis 2003).

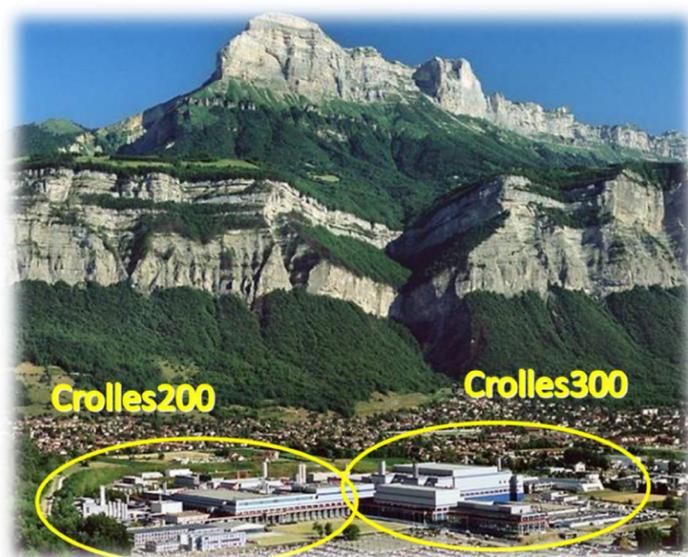


Figure 1. 10 Photographie du site STMicroelectronics de Crolles (Isère, France).

Les deux entités du site de Crolles, Crolles 200 et Crolles 300, se distinguent en premier lieu par le diamètre des wafers qui y sont produites. Les principales différences entre Crolles 200 et Crolles 300 sont résumées dans le tableau 1.1 suivant :

	Crolles 200	Crolles 300
Taille du wafer sur lequel sont réalisés les produits microélectroniques	200 mm de diamètre (ou 8’')	300 mm de diamètre (ou 12’')
Technologies produites	350 à 120 nm	120 à 14 nm
Capacité de production	7200 wafers par semaine	Actuelle : 3500 wafers par semaine Future : 4500 wafers par semaine
Nombre d’équipements	450	300

Tableau 1. 1 Différences entre Crolles 200 et Crolles 300.

Des wafers de diamètre 200 mm sont processés sur le site de Crolles 200, où sont réalisées les technologies les plus anciennes (de 350 à 120 nm). Les technologies les plus récentes (90 à 22 nm) sont fabriquées sur des wafers de diamètre 300 mm sur le site de Crolles 300.

1.5.2.1 Les salles blanches



Figure 1. 11 Photographie d'une partie de la salle blanche Crolles 300.

Les produits microélectroniques doivent être fabriqués dans des conditions particulières afin d'éviter toute dégradation des wafers par contamination, et donc tout dysfonctionnement des circuits qui y sont réalisés, de plus en plus sensibles en raison de la diminution de leur taille. Les process de fabrication nécessitent un environnement ultra-propre et sont donc réalisés dans des infrastructures adaptées : les salles blanches (figure 1.11).

Le site de Crolles dispose de deux salles blanches : une pour Crolles 200, et une pour Crolles 300. Ces deux salles sont différentes, mais nous nous focaliserons, tout au long de ce travail, sur Crolles 300. La salle blanche Crolles 300, de 10 000 m² de surface, est régulée en température et en hygrométrie. De plus, le flux d'air est contrôlé afin de s'assurer que la concentration particulaire n'excède pas une valeur fixée.

La salle blanche est composée de trois niveaux, de haut en bas :

- Le plénum
- La salle blanche
- Le basement

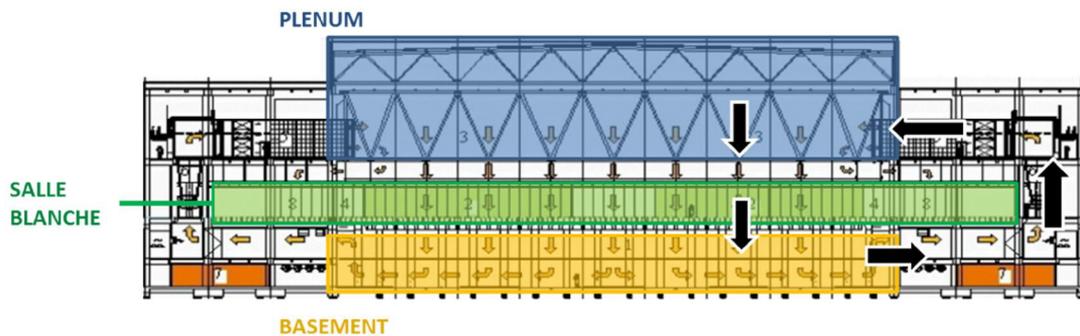


Figure 1. 12 Différents niveaux de la salle blanche Crolles 300 et circulation du flux d'air.

Une salle blanche consiste en un volume dans lequel l'air est injecté en flux laminaire vertical, du haut vers le bas. Les particules présentes dans l'air sont donc poussées vers le bas, dans le basement, où l'air est récupéré, filtré, recyclé et réinjecté par le plenum. Le flux d'air dans la salle blanche est représenté par les flèches noires sur la figure 1.12 ci-dessus.

Chapitre 1 – Introduction générale

1.5.2.2 Les ateliers de production

Dans les salles blanches, les différents process sont regroupés en ateliers. Les zones géographiques correspondant aux ateliers ne sont pas physiquement délimitées dans la salle blanche Crolles 300, mais les équipements dédiés à chaque atelier y sont regroupés entre eux.

Le découpage en atelier permet donc de rassembler les process de même nature ou de même fonction. Les principaux ateliers sont les suivants :

Atelier	Fonction	Procédé
CMP = Chemical Mechanical Polishing (Polissage Mécano-Chimique)	- Aplanir et polir des couches d'isolant déposées sur le wafer - Enlever un surplus de métal déposé sur le wafer	Abrasion de la surface du wafer par une action chimique (ramollissement de la surface) et mécanique (frottements de billes de Silice)
Traitement Thermique (Thermal Treatment)	- Fabrication de couches d'isolants ou de semi-conducteurs - Recuits	Oxydation, dépôt CVD (Chemical Vapor Deposition), recuit sous atmosphère contrôlée
Photolithographie (Lithography, Photolithography)	- Impression de motifs sur le wafer	Insolation d'une résine photosensible à travers un masque, puis élimination de la résine excédentaire
Métal (Metallization)	- Déposer des couches conductrices	Principalement PVD (Physical Vapor Deposition) : bombardement d'une cible métallique, décrochage d'atomes, dépôt de ces atomes sur le wafer.
Diel (Dielectric, CVD = Chemical Vapor Deposition)	- Déposer des couches isolantes	CVD assistée d'un plasma
Etch (Etching : gravure sèche)	- Enlever de la matière	Gravure sèche physique et chimique : bombardement de la surface du wafer par des ions (plasma), réaction chimique et formation de composés volatiles
Dry Stripping (Retrait résine à sec)	- Enlever le surplus de résine - Préparation de surface	Gravure sèche chimique : formation de composés volatiles
Wet (Wet Etching : gravure humide)	- Préparation de surface - Enlever de la matière	- Décontamination à l'eau sous pression, ou avec de la chimie - Gravure humide chimique
Implantation Ionique (Ion Implantation)	- Doper le Silicium en implantant des atomes dans le wafer - S'assurer du bon déroulement du process	Balayage du wafer par un faisceau d'ions
Métrie	- S'assurer du bon fonctionnement des équipements	- Mesures et contrôles sur wafers témoins ou lots
Défectivité	- Gestion des défauts sur les wafers	- Mesures et contrôles sur wafers témoins ou lots
Test Paramétrique	- Mesures électriques en fin de process	- Mesures
EWS = Electrical Wafer Sorting (Tri électrique des wafers)	- Tri des wafers selon la fonctionnalité électronique de chaque circuit intégré	- Mesures des rendements

Tableau 1. 2 Fonctions et procédés des différents ateliers de production.

Chapitre 1 – Introduction générale

Les étapes de process permettant la fabrication des circuits intégrés sur les wafers sont réalisées dans les neuf premiers ateliers présentés dans le tableau 1.2. Les quatre derniers ateliers sont destinés à des contrôles et des mesures vérifiant que le process s'est bien déroulé.

Précisons que les ateliers Métrologie, Défectivité et Test Paramétrique existent sur les sites de Crolles, cependant le tri électrique des wafers ne s'y fait plus.

Dans ce travail, nous ne tiendrons compte que des ateliers liés à la fabrication des circuits intégrés, soit : CMP, Traitement Thermique, Photolithographie, Métal, Diel, Etch, Dry Stripping, Wet et Implantation Ionique.

1.5.2.3 La station de traitement des effluents aqueux industriels

Le site dispose d'une station de traitement des effluents aqueux industriels (que nous appellerons « station de traitement ») dédiée à STMicroelectronics Crolles, qui traite les effluents liquides dilués issus de Crolles 200 et de Crolles 300 avant de les rejeter dans le milieu naturel.

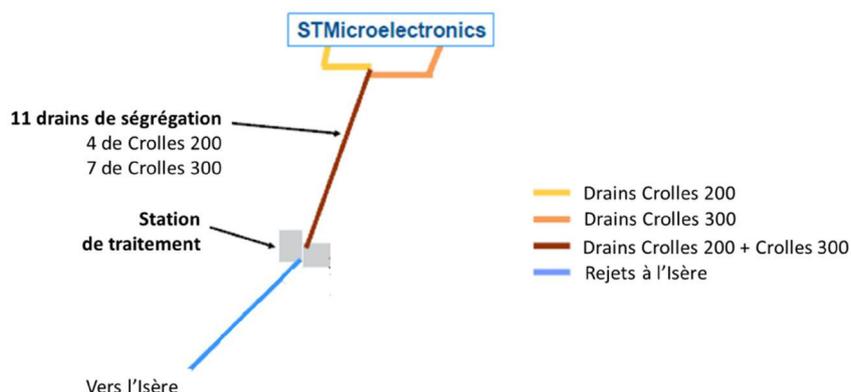


Figure 1. 13 Acheminement des effluents liquides dilués à la station de traitement (source : Ondéo Industrial Solutions).

Les effluents liquides sont ségrégués en onze drains en fonction de leur nature chimique (quatre provenant de Crolles 200 et sept provenant de Crolles 300), et acheminés vers la station de traitement (figure 1.13). Cette ségrégation permet d'améliorer le traitement, avant le rejet en un point unique vers le milieu naturel (la rivière Isère).

En sortie d'équipement, les effluents liquides sont donc ségrégués dans différents drains en fonction de leur composition chimique. Les liquides concentrés sont soit collectés dans des cuves avant d'être réutilisés sur le site (c'est notamment le cas de l'acide sulfurique qui est utilisé comme réactif dans les installations de traitement des gaz et à la station de traitement des effluents aqueux industriels), soit confiés en tant que déchets à des sociétés extérieures spécialisées.

Chapitre 1 – Introduction générale

Les effluents liquides dilués sont quant à eux amenés, via les différents drains, vers la station de traitement des effluents aqueux industriels dédiée au site de STMicroelectronics de Crolles, qui abat la pollution des effluents liquides rejetés par Crolles 200 et Crolles 300 avant de rejeter ces effluents dans le milieu naturel. La ségrégation des effluents liquides permet de séparer les liquides en fonction de leur nature chimique, et d'orienter les effluents vers les traitements adaptés dans la station de traitement. Les différents drains du site de Crolles 300 sont présentés dans le tableau 1.3 suivant :

Drains	Effluents	Ateliers concernés
ESCMPOX	Effluents Ségrégués CMP Oxyde	CMP
ESCMPW	Effluents Ségrégués CMP Tungstène	CMP
ESCU	Effluents Ségrégués Cuivre Dilué	CMP, Métal
ESAD	Effluents Ségrégués d'Acides Dilués	Wet, Photolithographie
ESAFPD	Effluents Ségrégués d'Acides Fluorés et Phosphorés Dilués	Dry Stripping, Métal, Photolithographie, Wet
ESAM	Effluents Ségrégués d'AMmoniac	CMP, Wet
ESOD	Effluents Ségrégués Organiques Dilués	CMP, Wet
ESDEV	Effluents Ségrégués de Développeurs	Photolithographie

Tableau 1. 3 Drains Crolles 300 des effluents ségrégués dilués (donc traités à la station de traitement).

Une fois arrivés dans la station de traitement, les effluents aqueux industriels sont dirigés vers différentes zones de traitement, présentées sur la figure 1.14.

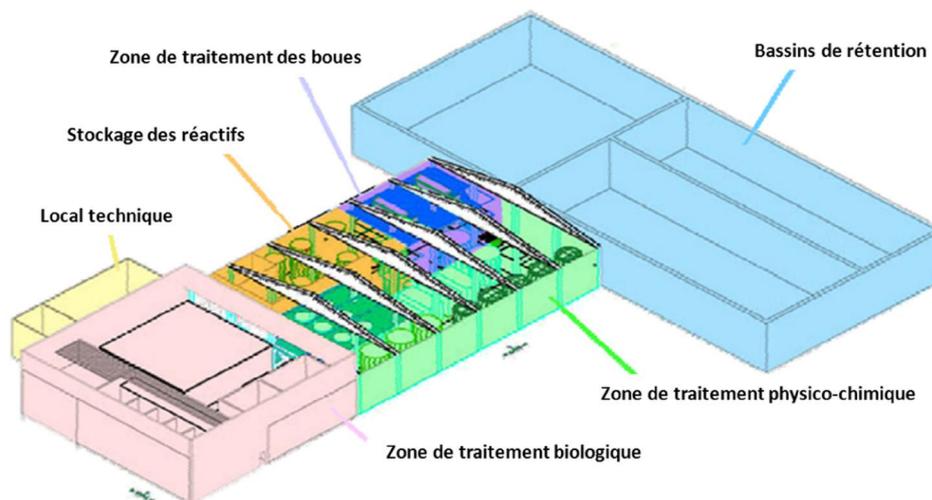


Figure 1. 14 Différentes zones de la station de traitement des effluents aqueux industriels (source : Ondéo Industrial Solutions).

Les effluents passent d'abord par un traitement physico-chimique afin d'abattre les Fluorures, les Phosphates et les Matières en Suspension, puis peuvent ensuite subir un traitement biologique pour traiter les pollutions organiques, les Nitrates et l'Ammoniaque. Les boues, déchets issus des traitements physico-chimiques et biologiques, sont déshydratées puis évacuées pour revalorisation.

Chapitre 1 – Introduction générale

Dans la suite de ce document, nous considérerons que la moitié des consommations et des rejets de la station de traitement est liée à l'activité de Crolles 300, et l'autre moitié à l'activité de Crolles 200.

1.5.2.4 Le traitement des effluents gazeux

Le site de Crolles est également équipé de systèmes de traitement des effluents gazeux, afin d'abattre les substances polluantes présentes dans les gaz avant rejet dans l'atmosphère. Les équipements de production sont connectés à un réseau d'extraction (ou « exhausts ») permettant la ségrégation des gaz en fonction de leur nature chimique.

Certains équipements sont également munis de systèmes d'abattement au point d'utilisation, appelés Point Of Use (POU), qui traitent les effluents gazeux directement en sortie d'équipement : cela concerne les PFC et les gaz toxiques. Ces POU peuvent être soit simplement des brûleurs (dans ce cas, il n'y aura que des rejets gazeux), soit des systèmes brûleurs – laveurs (on aura alors également des rejets liquides).

Les différents types d'exhaust du site de Crolles 300 sont présentés dans le tableau 1.4 suivant :

Exhausts	Effluents	Ateliers majoritairement concernés
EXC	Exhaust Chaleur	Tous
EXS	Exhaust Solvant	CMP, Photolithographie, Wet
EXA	Exhaust Acide	Tous
EXNH	Exhaust Ammoniac	CMP, Photolithographie, Wet

Tableau 1. 4 Exhausts de Crolles 300.

Tous les équipements sont connectés à un exhaust Chaleur, et quasiment tous les équipements sont connectés à un exhaust Acide. Les exhausts Solvant sont principalement utilisés dans les ateliers CMP, Photolithographie et Wet, ce qui est également le cas des exhausts Ammoniac.

Les effluents gazeux, ségrégués grâce aux différents exhausts, sont ensuite dirigés vers différents traitements, présentés dans le tableau 1.5 ci-dessous.

Exhausts	Traitement en sortie d'exhaust
EXC	Pas de traitement
EXS	Incinérateur Solvant
EXA	Laveur de gaz Acide
EXNH	Laveur de gaz Ammoniac

Tableau 1. 5 Traitement des effluents gazeux en sortie d'exhaust.

Les effluents gazeux en sortie d'exhaust chaleur, n'étant pas des gaz de process, sont directement rejetés à l'atmosphère. Les gaz en sortie d'exhaust solvant sont traités par un incinérateur de solvants. Enfin les autres gaz en sortie des POU, ainsi que les gaz en sortie des équipements non munis de POU, sont traités dans les laveurs de gaz centralisés du site de Crolles 300, avant leur rejet dans l'atmosphère. Ces systèmes de traitement des gaz consistent en un transfert des substances polluantes d'une phase

Chapitre 1 – Introduction générale

gazeuse à une phase liquide : les liquides issus du traitement des pollutions présentes dans les rejets gazeux sont alors dirigés vers la station de traitement. Il existe différents types de laveurs de gaz : les laveurs Acide traitent les gaz issus de l'exhaust acide par de l'eau et de la soude, alors que les laveurs Ammoniac traitent les gaz en sortie d'exhaust Ammoniac par de l'eau et de l'acide sulfurique.

1.5.2.5 La gestion des déchets

Le site de Crolles génère des déchets liés à son activité. Il peut s'agir de Déchets non Dangereux (DnD), ou de Déchets Dangereux (DD). Des exemples de DD et de DnD sont présentés dans le tableau 1.6 ci-dessous :

DnD	DD
Boues de la station de traitement	Acides
Emballages vides	Solvants
Ordures Ménagères	Batteries
Cartons	Solides souillés
Métaux	Déchets d'Équipements Electriques et Electroniques (DEEE)

Tableau 1. 6 Exemples de DnD et de DD (listes non exhaustives).

Le site dispose d'un éco-point permettant, après la collecte, de réaliser un tri sélectif des DnD, et donc d'améliorer les conditions de stockage et d'envoi vers différentes filières (élimination, réutilisation, revalorisation, etc.).

Par ailleurs, les liquides concentrés sont ségrégués en sortie d'équipement dans des drains spécifiques, et sont ensuite traités en tant que déchets.

Les déchets issus de l'activité du site de Crolles sont donc très variés, et une bonne ségrégation permet de les orienter vers les filières adaptées, afin d'augmenter la part de déchets réutilisés ou recyclés.

1.5.3 La R&D sur le site STMicroelectronics de Crolles 300

Le site de Crolles 300 est un centre de R&D de procédés microélectroniques et de fabrication de puces électroniques. Une partie de son activité est donc de développer de nouvelles technologies microélectroniques. Les différentes étapes du développement d'une nouvelle technologies sont présentées sur la figure 1.15 :

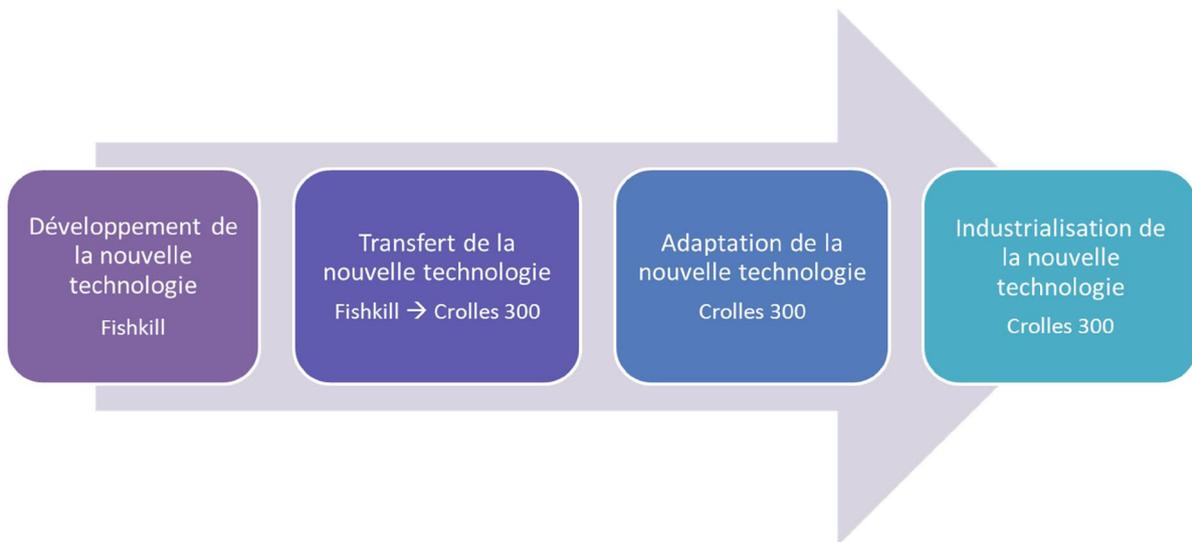


Figure 1. 15 Développement d'une nouvelle technologie microélectronique sur le site de STMicroelectronics de Crolles.

Les nouvelles technologies microélectroniques sont développées sur le site de Fishkill (New-York, Etats-Unis) par l'alliance ISDA (International Semiconductor Alliance) accompagnée de différents partenaires (des industriels et des fonderies). Des ingénieurs R&D du site de Crolles 300 participent à ce travail. Avant le transfert de la technologie sur le site de Crolles 300, une analyse approfondie est réalisée afin de s'assurer que la technologie pourra être adaptée au site, et sous quelles conditions : anticipation d'investissement d'équipements, capacités du site pour la future industrialisation de la technologie, etc.

La route, c'est-à-dire la succession d'étapes de process élémentaire, correspondant à un produit de la technologie est alors transférée sur le site de Crolles 300, où elle doit être adaptée en fonction des contraintes du site : équipements disponibles, contraintes réglementaires locales (qui peuvent être différentes des législations américaines), etc. Le travail des équipes R&D de Crolles 300 est de créer une nouvelle route pour cette technologie, à partir des paramètres techniques définis à Fishkill.

Chapitre 1 – Introduction générale

Le développement d'une nouvelle technologie prend environ deux ans. Tout au long de sa conception, cette technologie passera par différents degrés d'avancement : les Maturités. Ces maturités sont appelées Mat. et sont les suivantes : mat.5, mat. 10, mat. 20 et mat. 30. A chaque changement de maturité, une réunion entre les différents acteurs du développement de la nouvelle technologie a lieu, et un rapport est écrit. L'avancement du développement d'une nouvelle technologie microélectronique est décrit par la figure 1.16 ci-dessous :

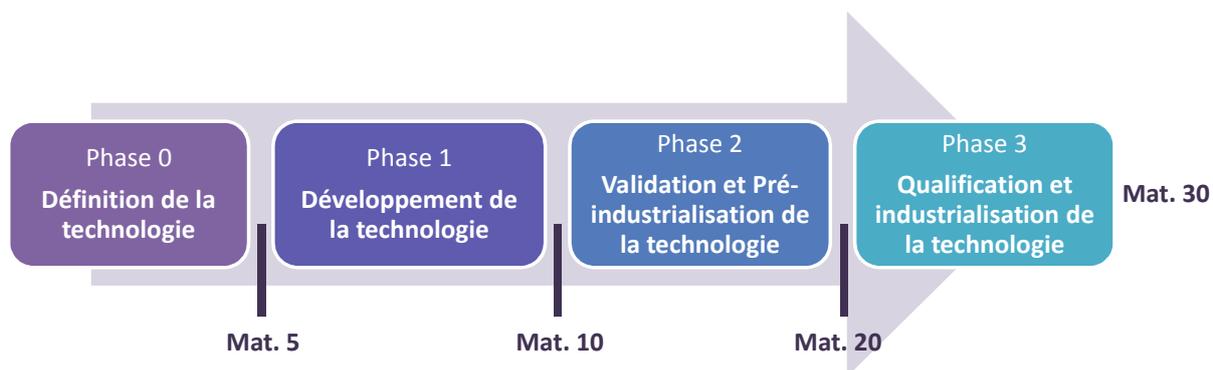


Figure 1. 16 Avancement du développement d'une nouvelle technologie microélectronique.

Les quatre phases de ce schéma correspondent aux phases de la figure 1.15.

Une technologie est à Mat. 5 à l'issue de la phase 0 du développement, qui consiste notamment à créer une première route et à évaluer les performances électriques des composants. En phase 1, la technologie est développée, et une route plus robuste est élaborée ; la technologie est alors Mat. 10. La phase 2 permet la validation et la pré-industrialisation de la technologie. Il s'agit, entre autres, de s'assurer que la route est reproductible et industrialisable, et de démontrer la fiabilité de la technologie. Les étapes de process sont améliorées et tous les changements de process sont suivis afin de vérifier qu'ils ne diminuent pas les performances de la technologie. Une route finale est ainsi définie : la technologie est à Mat. 20. La dernière phase du développement d'une nouvelle technologie, la phase 3, consiste en sa qualification et son industrialisation. On s'assure que la technologie est fiable et robuste, qu'elle est maîtrisée et que ses paramètres sont stables. Elle est alors transférée de la R&D à la Production, et est Mat. 30 (source interne STMicroelectronics : *Silicon Technology Development phases and associated « Process Maturity » levels procedure*).

Il est important de noter que même lorsqu'une technologie est industrialisée, des changements de process peuvent survenir. On considère que cela peut se produire généralement jusqu'à six mois après le transfert d'une technologie en production. Le fait que les technologies peuvent encore évoluer après les étapes de développement devra être pris en compte lors de la définition d'indicateurs environnementaux.

Lors de toutes ces étapes, les procédures environnementales du site de Crolles sont respectées. Avant de transférer une technologie sur un site STMicroelectronics, la compatibilité entre les matières

premières proposées et les procédures ESH du site est vérifiée. Par ailleurs, les procédures locales pour l'introduction d'un nouveau matériau (ou produit chimique) sur un site sont suivies : sur le site de Crolles par exemple, l'entrée de tout nouveau matériau doit suivre la procédure « Achat / entrée de nouveaux produits chimiques ». Enfin, la procédure STMicroelectronics « Installation of new technology transferred during development phases » incite également à s'intéresser aux choix de matériaux le plus tôt possible pendant le développement des technologies, afin de prévenir l'utilisation de substances interdites dans la route, ce qui nécessiterait un redéveloppement coûteux pour trouver des matériaux de remplacement conformes aux réglementations locales [Source interne : *Installation of new technology transferred during development phases*].

1.5.4 Conclusion

Nous avons réalisé ce travail en partenariat avec le centre de Crolles 300 de la compagnie STMicroelectronics. Cependant, son organisation est proche de celle des autres sites de Front-End de fabrication de produits microélectroniques. Nos résultats nécessitent donc peu de modifications pour être adaptés à d'autres contextes industriels.

1.6 Annnonce du plan de la thèse

Le **chapitre 2** consiste en un état de l'art sur les impacts environnementaux de la phase de fabrication des produits microélectroniques, et sur l'intégration de caractéristiques environnementales dans les processus de conception, plus particulièrement dans l'industrie des semi-conducteurs. Depuis les premières démarches d'éco-conception des procédés de l'industrie microélectronique, les difficultés liées à l'intégration de l'environnement en conception ont été identifiées, et le manque de données précises sur les technologies apparaît comme l'un des points bloquants. Ce chapitre nous amènera à préciser notre question de recherche : quelles sont les caractéristiques environnementales des procédés de fabrication microélectronique, et comment les intégrer dans le processus de conception des technologies ?

Dans le **chapitre 3**, nous proposons un modèle d'une technologie microélectronique. Pour cela, nous analysons les flux entrants et sortants nécessaires à la fabrication de produits semi-conducteurs par une technologie microélectronique.

Afin de caractériser précisément le modèle défini dans le chapitre 3, nous réalisons dans le **chapitre 4** une estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique, en nous appuyant sur la technologie 45 nm. Après une présentation des caractéristiques techniques de cette technologie, nous avons identifié les données à collecter afin d'analyser les impacts environnementaux de cette technologie. Deux méthodes de collecte de données sont ensuite testées et comparées, dans le but d'optimiser la phase de recherche d'informations. Nous obtenons finalement la contribution des étapes de procédé de la technologie 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet du site.

Le **chapitre 5** permettra de proposer des indicateurs et des outils d'aide à l'éco-conception. Ces outils seront destinés à différents utilisateurs, afin d'impliquer les équipes de R&D du site dans les démarches de protection de l'environnement, mais aussi de renforcer les interactions entre le service ESH et la R&D. Ils permettront de suivre l'évolution des impacts environnementaux avec l'avancée technologique, notamment en ce qui concerne les consommations de produits chimiques et d'énergie, et les émissions de polluants. De plus, le risque lié à l'utilisation de nouvelles substances pourra être connu plus tôt par les différents acteurs du processus de développement des nouvelles technologies.

Nous concluons cette dissertation dans le **chapitre 6**, dans lequel nous proposerons notamment des perspectives d'amélioration des outils proposés dans le chapitre précédent, dans le but de favoriser leur industrialisation. Le site de ST Microelectronics de Crolles dispose en effet de systèmes de gestion des données techniques qui pourraient être intégrés aux outils d'aide à l'éco-conception afin de les pérenniser.

2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

L'éco-conception des technologies microélectroniques requiert une bonne maîtrise de ses impacts sur l'environnement : l'évaluation environnementale des procédés est une étape nécessaire à l'identification des facteurs les plus significatifs sur lesquels il faudra agir en priorité lors de la conception des technologies suivantes. Ainsi, d'après Bonvoisin [Bonvoisin, 2012], l'évaluation environnementale peut être utilisée dans une perspective d'éco-conception, afin de déterminer les paramètres de conception qui ont le plus d'influence.

Ce chapitre débutera par la présentation des impacts environnementaux des produits microélectroniques sur tout leur cycle de vie. Nous verrons que la littérature fournit des conclusions différentes sur les phases les plus impactantes, mais que la phase de fabrication de ces produits fait partie des étapes ayant les impacts les plus significatifs sur l'environnement. Nous expliquerons alors en quoi consiste une technologie microélectronique afin de définir les paramètres qui la caractérisent et que nous pourrons utiliser pour évaluer et anticiper ses impacts sur l'environnement.

Nous aborderons ensuite la notion d'éco-conception, et nous discuterons notamment de l'intérêt d'entreprendre une telle démarche dans l'industrie microélectronique. Les principales méthodes d'évaluation des impacts environnementaux seront alors présentées, ainsi que leurs limites pour l'estimation des performances environnementales des procédés de fabrication de semi-conducteurs. Nous aborderons ensuite la question de l'accès aux données, qui constitue l'une des difficultés majeures de l'analyse des impacts environnementaux d'une technologie microélectronique.

La dernière partie de ce chapitre consistera en une analyse de la littérature sur les moyens nécessaires à la mise en œuvre d'outils d'éco-conception des technologies microélectroniques efficaces.

Tout au long de la revue bibliographique, nous formulerons nos principales questions de recherche qui nous amèneront à notre problématique de thèse.

2.1 Les impacts environnementaux de la microélectronique

D'après la norme ISO 14062 sur l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit, un impact environnemental est une modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des activités, produits ou services d'un organisme [ISO, 2002]. Lorsque nous parlerons d'impacts environnementaux, nous sous-entendrons cependant « impacts négatifs ».

2.1.1 Les produits microélectroniques

Nous nous intéressons aux circuits intégrés fabriqués grâce aux technologies microélectroniques. Ces produits ne sont pas utilisables seuls : ils sont intégrés dans d'autres équipements afin de réaliser une fonction spécifique. Les puces microélectroniques se trouvent dans de plus en plus de produits de notre quotidien, dans lesquels elles jouent un rôle toujours plus important. C'est le cas par exemple des téléphones portables, des ordinateurs ou des voitures [Williams, 2002].

2.1.2 Cycle de vie d'un produit microélectronique

Nous présentons dans cette partie le cycle de vie d'un produit microélectronique tel qu'il est pour un semiconducteur fabriqué sur le site de Crolles de la compagnie STMicroelectronics, où nous avons réalisé cette étude (figure 2.1). Les circuits intégrés sont fabriqués dans des salles blanches sur des substrats de Silicium de haute pureté, que l'on appelle des wafers, en utilisant des produits chimiques et des matériaux ultra-purs. Chaque wafer produit se compose de centaines de circuits intégrés : en fin de fabrication, les wafers sont découpés afin de séparer ces circuits, qui sont alors encapsulés pour former des puces électroniques [Krishnan, 2008]. La phase de fabrication des circuits intégrés sur les wafers est appelée Front-End, et la mise en boîtier est appelée Back-End. Le site de Crolles est un site de Front-End. Les circuits intégrés qui y sont fabriqués sont acheminés vers d'autres sites pour les étapes de Back-End [STMicroelectronics Crolles, 2011].

Les principales étapes du cycle de vie d'un produit microélectronique sont les suivantes :

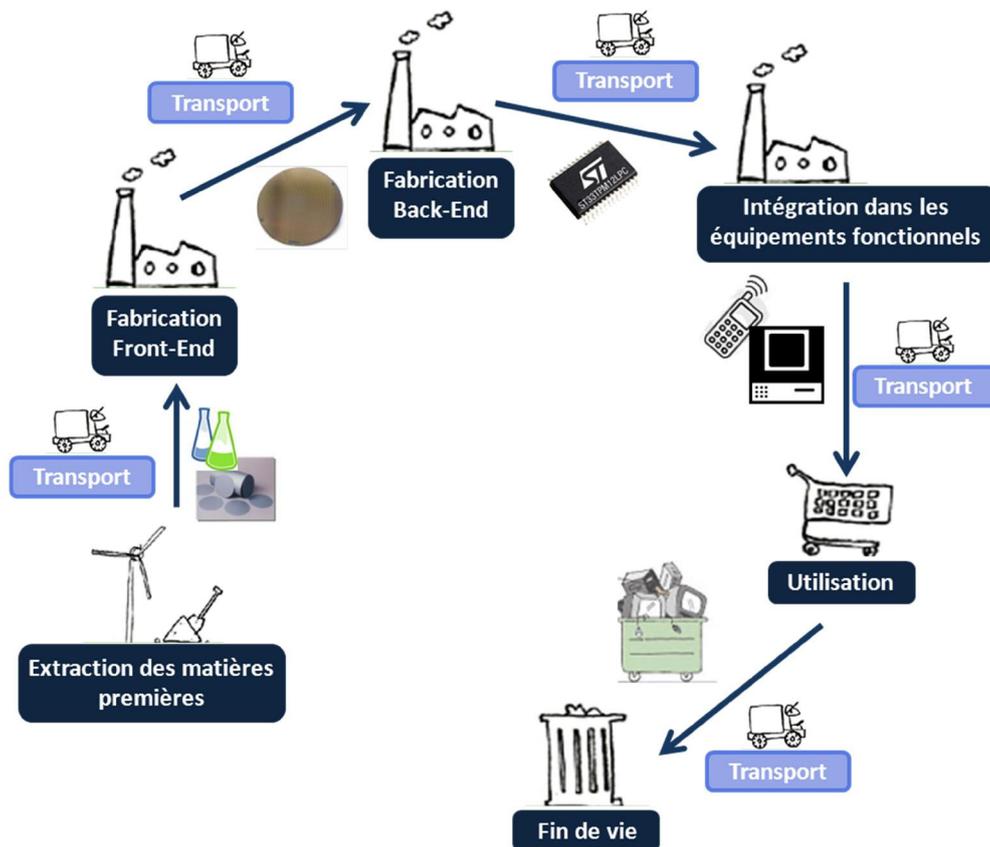


Figure 2. 1 Cycle de vie d'un produit microélectronique.

Le cycle de vie d'un produit microélectronique peut se décomposer en six phases, entre lesquelles des étapes de transport interviennent.

La première phase du cycle de vie d'un produit microélectronique est l'extraction des matières premières qui le composent ou qui sont nécessaires à sa fabrication : extraction du dioxyde de Silicium pour les plaquettes sur lesquelles sont fabriqués les circuits intégrés, extraction des matières nécessaires à la production des produits chimiques et de l'énergie consommés lors du process des plaquettes, etc. Nous incluons dans cette étape la transformation des matières premières pour la préparation des matériaux et des auxiliaires de fabrication¹, par exemple la fabrication des plaquettes de Silicium ou des produits chimiques ultra-purs nécessaires à la réalisation des circuits intégrés. Les matériaux et les auxiliaires de fabrication sont alors transportés depuis leur lieu de production vers le site où sont réalisés les circuits intégrés.

La fabrication des circuits intégrés est séparée en deux phases distinctes dans le cycle de vie d'un produit microélectronique : la phase de fabrication Front-End, et la phase de fabrication Back-End. Le Front-End consiste à réaliser les circuits intégrés sur les plaquettes de Silicium, et le Back-End est l'étape de test, de découpage et d'encapsulation des circuits dans leurs boîtiers. Ces deux phases sont en général effectuées sur des sites différents, ce qui implique le transport des plaquettes du site de Front-End vers le site de Back-End. Les puces microélectroniques sont alors distribuées aux fabricants d'équipements fonctionnels [STMicroelectronics Crolles, 2011].

Un produit microélectronique étant un composant d'un autre produit, la quatrième phase de son cycle de vie est son intégration dans des équipements électriques et électroniques, ce qui leur permettra de réaliser une fonction. Ces produits seront alors transportés vers les utilisateurs des équipements électriques, *via* des centres de distribution.

Intervient alors la cinquième phase : l'utilisation des équipements contenant des produits microélectroniques.

A la fin de la phase d'utilisation, ces produits peuvent être orientés, en tant que déchets, vers différentes filières de traitement : il s'agit de la phase de fin de vie des produits microélectroniques.

Il existe par ailleurs des activités de conception de produits et de procédés microélectroniques. Nous ne les incluons pas dans le cycle de vie des produits, mais elles influencent les futurs impacts des produits, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie.

2.1.3 Impacts environnementaux de la microélectronique par phase du cycle de vie

Les impacts environnementaux des produits microélectroniques font l'objet de nombreuses études. Cette partie présentera les principaux résultats trouvés dans la littérature, pour chaque phase de leur cycle de vie.

¹ On distingue les matériaux des auxiliaires de fabrication en fonction de leur présence, ou non, dans le produit final : les matériaux se retrouveront dans les circuits intégrés alors que les auxiliaires de production sont uniquement utilisés pour leur réalisation.

2.1.3.1 Extraction des matières premières et préparation des matériaux et des auxiliaires de fabrication

Les circuits intégrés microélectroniques sont fabriqués sur des substrats de Silicium, à l'aide de nombreux produits chimiques ultra-purs, ce qui implique l'extraction et la transformation de matières premières.

Wafers Silicium

Les circuits intégrés microélectroniques sont réalisés sur des disques polis de Silicium ultra-purs, que l'on appelle des wafers. Ils peuvent être de différents diamètres, ceux-ci ayant tendance à augmenter (afin d'y fabriquer davantage de puces, et de limiter les pertes sur les bords des wafers) et sont très fins (moins d'un millimètre d'épaisseur, pour un poids d'environ 125 grammes).

Les wafers sont produits à partir de sable, qui contient de la silice sous forme de dioxyde de Silicium (SiO_2). La fabrication de wafers ultra-purs pour l'industrie microélectronique implique de nombreuses étapes de process consommatrices de ressources, notamment d'énergie : extraction des sables, séparation de la Silice du sable, purification du Silicium, réalisation d'un cristal (lingot), découpage du lingot en disques fins, polissage des wafers [Plepys, 2004].

Les impacts environnementaux de la production des wafers sont relativement bien connus : d'après Plepys [Plepys, 2004], produire un kilogramme de wafer nécessite jusqu'à 20 kg de dioxyde de Silicium brut (SiO_2) et au moins 2 MWh d'énergie (en incluant les opérations de polissage des wafers). Cette consommation d'énergie coïncide avec les résultats de Williams qui estime que 2130 kWh d'électricité par kilogramme sont utilisés tout au long de la chaîne de production des wafers de Silicium [Williams, 2002].

La fabrication de wafers pour l'industrie des semiconducteurs consomme donc beaucoup d'énergie, principalement du fait des hauts niveaux de puretés exigés par les procédés microélectroniques.

Produits chimiques

La fabrication de circuits intégrés nécessite la consommation de nombreux produits chimiques, liquides et gazeux, souvent toxiques, et utilisés en grandes quantités. Parmi ces produits, on retrouve des résines et des développeurs (pour les étapes de photolithographie¹), des acides (acide sulfurique, acide phosphorique, peroxyde d'hydrogène, etc.), des solvants, des slurries (pour les étapes de CMP¹), des dopants, des Perfluorocarbures (PFC : trifluorure d'azote, tétrafluorométhane, etc...), des gaz neutres (dioxygène, diazote, dihydrogène, etc.) [Krishnan, 2008].

L'industrie chimique est un secteur particulièrement consommateur de ressources, notamment d'énergie : d'après Plepys [Plepys, 2004], cette industrie est responsable de 20 % de l'énergie totale utilisée et des émissions de gaz à effet de serre aux Etats-Unis. De plus, les produits chimiques destinés à l'industrie microélectronique doivent être très purs, or les technologies de purification des chimies liquides et des gaz demandent beaucoup d'énergie : toujours selon Plepys [Plepys, 2004], la fabrication de produits chimiques ultra-purs consomme jusqu'à trois fois plus d'énergie que celle de produits

¹ Les procédés de fabrication seront présentés dans le paragraphe 2.2.1

traditionnels de moins haute qualité, mais ces consommations d'énergie sont beaucoup moins explorées que celles liées à la fabrication des wafers en Silicium.

2.1.3.2 Fabrication des produits microélectroniques

La phase de production de semiconducteurs a des impacts sur l'environnement : consommation d'énergie et d'eau, consommation de gaz à effet de serre (GES), émissions atmosphériques, rejets dans l'eau, génération de déchets, etc. [Berkhout, 2001]. Pour certains produits microélectroniques, la phase de fabrication semble particulièrement consommatrice de ressources [Plepys, 2004]. Produire des circuits intégrés implique en effet de nombreuses étapes de process : Plepys parle, en 2004, de deux-cents étapes ; sur les technologies microélectroniques plus récentes, ce nombre peut s'élever à plus de 350 [Baudry, 2012].

Le tableau 2.1 ci-dessous présente les quantités de différentes ressources consommées par les process de fabrication d'une puce microélectronique sur un wafer :

Ressource	Quantité nécessaire
Wafer Silicium	0,25 g.
Produits chimiques liquides	72 g.
Gaz élémentaires (N ₂ , O ₂ , H ₂ , He, Ar)	700 g.
Energie	2,9 kWh
Eau	32 L.

Tableau 2. 1 Ressources nécessaires au process des wafers pour la fabrication d'une puce de 2 grammes (1,6 cm² de wafer entrant dans le process), d'après [Williams, 2004].

D'après ce tableau, nous constatons que le rapport entre le poids des matières premières et des auxiliaires de fabrication pour la production d'un produit microélectronique, et le poids final du produit est très important. Pour obtenir une puce de 2 grammes, il faut en effet consommer au moins 72 grammes de produits chimiques liquides, 700 grammes de gaz élémentaires, 32 litres d'eau et près de 3 kWh d'énergie.

L'industrie microélectronique utilise des gaz à effet de serre (GES) contribuant au réchauffement climatique, dont des PFC (comme CF₄ et C₂F₆), et des composés organiques volatils (COV) qui participent également à la formation d'ozone troposphérique (nocif pour la santé), ainsi que d'autres gaz favorisant la diminution de la couche d'ozone [Krishnan, 2008], [Williams, 2004]. La consommation de ces gaz par l'industrie du semiconducteur implique la présence de systèmes d'abattement performants pour réduire les émissions atmosphériques de substances polluantes.

Par ailleurs, la consommation d'énergie est une problématique environnementale importante liée à la fabrication de produits microélectroniques [Griese, 2004]. D'après Williams, la consommation d'électricité représente la plus grande partie de la consommation d'énergie de la phase de fabrication : 50 % de la consommation d'électricité d'un site de production microélectronique sont liés au

fonctionnement des salles blanches (chauffage, ventilation, traitement de l'air) [Williams, 2002]. Les équipements dans lesquels sont réalisés les circuits intégrés sur les wafers sont responsables de 30 à 40 % de la consommation d'électricité des sites de production. Cette consommation d'électricité représente, d'après Schmidt, la majorité des impacts environnementaux potentiels de la fabrication des semi-conducteurs [Schmidt, 2011].

Une fois que la fabrication des circuits intégrés sur les wafers est terminée, ils doivent être testés, découpés et encapsulés dans des boîtiers. On connaît encore mal les entrants et sortants de cette étape d'assemblage, mais on estime qu'elle consomme 0,34 kWh d'énergie et 30 grammes de matériaux d'encapsulation par cm² de Silicium [Williams, 2002].

2.1.3.3 Transport

De nombreux trajets ont lieu tout au long du cycle de vie des produits microélectroniques :

- Entre les sites d'extraction des matières premières et les sites de fabrication des consommables et produits chimiques nécessaires à la fabrication des circuits intégrés
- De ces sites de production vers les sites de fabrication des produits microélectroniques
- Des sites de fabrication des produits microélectroniques vers les sites d'encapsulation (Back-End)
- Des sites de Back-End vers les sites de fabrication des équipements fonctionnels
- De ces sites vers les distributeurs
- Des distributeurs vers les clients finaux
- Des clients finaux vers les lieux de fin de vie

Différents modes de transport sont utilisés selon la localisation des sites sur lesquels ont lieu les étapes du cycle de vie des produits microélectroniques. La phase de transport est cependant peu explorée dans la littérature sur les impacts environnementaux de l'industrie microélectronique.

2.1.3.4 Usage

Les circuits intégrés microélectroniques font partie des équipements électriques et électroniques (EEE), qui fonctionnent avec une source d'énergie. De plus en plus de produits ont des fonctionnalités électroniques, devenant ainsi des EEE, ce qui implique une augmentation de la consommation d'électricité liée à leur utilisation.

Il apparaît par ailleurs que sur la phase d'usage des EEE domestiques, les périodes de veille sont particulièrement consommatrices d'électricité [Berkhout, 2001]. La consommation d'énergie semble constituer l'impact environnemental majeur des produits microélectroniques sur la phase d'usage [Sharnhorst, 2008].

2.1.3.5 Fin de vie

Comme le prédisait la loi de Moore [Moore, 1965], les cycles d'innovation dans le secteur de la microélectronique sont très rapides. Cela implique notamment un taux de renouvellement du matériel informatique très élevé, et donc une forte augmentation de la quantité de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) : aux Etats-Unis, 4 % des déchets municipaux sont des DEEE, et ce pourcentage tend à augmenter. D'après un rapport écrit de l'Université des Nations Unies et l'initiative StEP, quarante millions de tonnes de DEEE sont générées chaque année dans le monde, dont plus d'un quart dans l'UE27 [Gossart, 2011]. La présence de métaux dans les DEEE rend leur traitement plus complexe : des étapes de séparation des matières sont nécessaires afin de permettre leur recyclage [Berkhout, 2001].

2.1.3.6 Bilan des impacts environnementaux de la microélectronique sur tout le cycle de vie des produits

Les conclusions des articles étudiés sur les impacts environnementaux de différents produits microélectroniques sont présentées dans le tableau 2.2 :

Source	Produit microélectronique évalué	Conclusion sur les impacts environnementaux des différentes phases du cycle de vie
Williams, 2002	Puce DRAM 32MB	Consommation d'énergie : phases de production (27 MJ / puce) et d'utilisation (15 MJ / puce) dominant
Sharnhorst, 2008	Communication mobile et internet	Phase de production > autres phases du cycle de vie des produits
Sharnhorst, 2008	Service de téléphonie fixe	Phase d'utilisation > autres phases du cycle de vie des produits (phase de production négligeable)
Krishnan, 2008	Circuit logique (CMOS)	Consommation d'énergie : phase d'usage très supérieure à phase de fabrication

Tableau 2. 2 Impacts environnementaux par phase du cycle de vie des produits microélectroniques.

La répartition des impacts environnementaux des produits microélectroniques sur leur cycle de vie dépend *a priori* des types de produits. Pour Sharnhorst [Sharnhorst, 2008], la phase de fabrication a des impacts très supérieurs à la phase d'usage pour les systèmes de communication mobile et de navigation sur internet, alors que les impacts environnementaux de la phase d'utilisation dominent ceux de toutes les autres phases pour un téléphone fixe.

Par ailleurs, Krishnan [Krishnan, 2008] établit que la consommation énergétique d'un circuit logique sera majoritaire pour sa phase d'utilisation, alors que celle de la puce DRAM 32 MB étudiée par Williams est plus importante pendant la fabrication du produit [Williams, 2002]. Cela s'explique par le fait qu'un

circuit logique nécessitera beaucoup plus de puissance en fonctionnement qu'une puce DRAM. Il semble que pour les produits passifs et à mémoire, la consommation d'énergie pendant la fabrication des semiconducteurs soit relativement plus importante que pour les autres phases de leur cycle de vie.

Enfin, selon Krishnan, d'autres paramètres peuvent influencer les évaluations des impacts environnementaux des produits et procédés microélectroniques et expliquer les différences observées entre les études, qui deviennent alors difficilement comparables : méthodes d'évaluation des impacts environnementaux utilisées, évolutions technologiques, présence ou non de systèmes d'abattement des pollutions sur le site,... [Krishnan, 2008].

En comparant les analyses environnementales de plusieurs produits microélectroniques, nous constatons que les conclusions sur les phases du cycle de vie ayant le plus d'impacts sur l'environnement diffèrent. Le type de produit, le contexte industriel et les méthodologies utilisées influencent fortement les résultats de ces études, ce qui empêche toute généralisation.

2.1.4 Evolution des impacts environnementaux de l'industrie microélectronique

Les évolutions des procédés industriels, notamment leur miniaturisation, impliquent des modifications des impacts environnementaux associés. Ainsi, pour Gutowski [Gutowski, 2007], la tendance historique est à l'augmentation des consommations d'énergie des procédés de fabrication. L'auteur explique en effet que le fait de travailler à des échelles plus petites et à des dimensions plus fines entraîne une réduction de la vitesse de transformation des matériaux par les procédés mis en œuvre, et donc des besoins en énergie électrique très élevés. Cela coïncide avec les observations de Krishnan [Krishnan, 2008], à savoir que la consommation d'énergie pour la fabrication a tendance à augmenter avec l'augmentation de la précision des procédés. Cela concerne particulièrement l'industrie micro- et nanoélectronique, pour laquelle les matériaux transformés sont à des niveaux de pureté de plus en plus importants, qui sont réalisés par des procédés de fabrication très énergivores. Gutowski illustre ce constat par l'évolution du rapport entre la masse de matériaux entrants dans l'industrie sur la masse de produit sortant : ce ratio est d'environ 10000 pour un procédé de CVD (Chemical Vapor Deposition = dépôt de matière dans la fabrication de circuits micro- et nanoélectroniques), alors qu'il n'est que de 1,03 pour une fonderie.

De plus, les produits et les technologies micro- et nanoélectroniques évoluent très rapidement [Krishnan, 2008]. La première observation que nous pouvons faire est que la complexité des produits microélectroniques augmente avec les nouvelles générations technologiques. Cela se traduit par une augmentation du nombre d'étapes de procédé. Nous nous attendons donc à ce que l'impact environnemental de ces produits soit de plus en plus important dans le futur, à moins que les processus des technologies continuent à s'adapter afin de respecter les objectifs d'émission [Boyd, 2010]. Boyd a

ainsi étudié une catégorie de produits microélectroniques sur chaque nœud technologique¹, du 350 nm en 1995 au 45 nm en 2010, et a conclu que le potentiel de réchauffement climatique par puce avait augmenté à chaque nœud, la phase d'utilisation étant la plus contributrice. Il a en revanche constaté que les émissions de la phase de fabrication avaient diminué, notamment grâce à des modifications des procédés de production. Les résultats de Yao [Yao, 2004] montrent par ailleurs une réduction globale des entrants et sortants liés à la fabrication de deux microprocesseurs, entre les technologies 600 nm et 130 nm réalisées sur des wafers de 200 mm de diamètre : diminution de la consommation d'électricité et d'eau ultra-pure, diminution des rejets d'eaux usées et des émissions atmosphériques de COV et de PFC. Seule la quantité de déchets chimiques augmente, *a priori* en raison de l'ajout d'étapes de procédés supplémentaires.

Les évolutions des impacts environnementaux avec les nouvelles technologies microélectroniques diffèrent donc selon les sources, les produits et les technologies étudiés. La rapidité des changements techniques et les impacts environnementaux importants qui en découlent sont autant de raisons de chercher à maîtriser davantage les performances environnementales des produits et de leurs procédés de fabrication.

2.1.5 Conclusion

Nous avons vu que les produits microélectroniques ont des impacts environnementaux sur tout leur cycle de vie. D'après certaines sources, la fabrication de semiconducteurs est l'une des phases les plus contributrices aux impacts environnementaux du cycle de vie de ces produits : grande consommation d'énergie, utilisation de nombreux produits chimiques, émissions de gaz à effet de serre, etc.

Par ailleurs, les procédés de fabrication évoluent très rapidement et deviennent de plus en plus complexes, ce qui peut mener à une augmentation de leurs impacts environnementaux. Cela impose d'améliorer l'efficacité environnementale des technologies de fabrication [Griese, 2004].

Nous nous focaliserons donc dans cette étude sur les impacts environnementaux des technologies microélectroniques, et plus particulièrement sur les procédés de Front-End, puisque nous menons ce projet en collaboration avec un site de Front-End. Dans ce but, nous chercherons donc à décrire une technologie microélectronique de Front-End.

¹ Le terme « nœud technologique » caractérise une technologie et fait référence à une dimension des produits microélectroniques

2.2 Description d'une technologie microélectronique

2.2.1 Enchaînement d'étapes de procédé

Les circuits intégrés microélectroniques sont fabriqués sur des substrats de Silicium à haut degré de pureté (les wafers), à l'aide de produits chimiques et de matériaux ultra-purs, dans des infrastructures adaptées (salles blanches). La réalisation de produits microélectroniques par les technologies actuelles implique l'enchaînement de différentes étapes de process. Les principaux procédés mis en œuvre sont présentés dans le tableau 2.3 suivant :

Procédés de fabrication	Détails	Atelier de production STMicroelectronics Crolles
Oxydation et recuit	<ul style="list-style-type: none"> - Procédés à hautes températures - Oxydation : fabrication de couches isolantes sur le wafer - Recuit : contrôle de la concentration des dopants¹, réduction des défauts 	- Atelier Traitement Thermique
Dépôt	<ul style="list-style-type: none"> - Dépôt de couches fines de matière sur le wafer - Procédé chimique = CVD (Chemical Vapor Deposition = dépôt chimique en phase vapeur) - Procédé physique = PVD (Physical Vapor Deposition = dépôt physique en phase vapeur) 	<ul style="list-style-type: none"> - CVD : atelier Dépôts – CVD - PVD : atelier Métal
Photolithographie	<ul style="list-style-type: none"> - Recouvrement du wafer avec un matériau photosensible, afin d'y transférer un motif à travers un masque 	- Atelier Photolithographie
Gravure	<ul style="list-style-type: none"> - Procédé humide ou sec permettant d'enlever de la matière - Gravure humide : gravure isotrope (sur toute la surface du wafer), surtout pour les étapes de nettoyage du wafer - Gravure sèche : gravure anisotrope de la surface du wafer 	<ul style="list-style-type: none"> - Atelier Etch - Atelier Wet
Implantation ionique	<ul style="list-style-type: none"> - Implantation de dopants dans le substrat pour réaliser des zones actives 	- Atelier Implantation Ionique
ECP = Electro-Chemical Plating (Plaquage électrochimique)	<ul style="list-style-type: none"> - Dépôt de matériau conducteur (métal) afin de réaliser les interconnexions 	- Atelier Métal
CMP = Chemical Mechanical Planarization (Aplanissement mécano-chimique)	<ul style="list-style-type: none"> - Polissage des excès de matière déposée - Aplanissement de la surface du wafer après les étapes de dépôt 	- Atelier CMP
Nettoyage du wafer	<ul style="list-style-type: none"> - Etapes de nettoyage fréquentes afin de réduire la contamination 	- Atelier Wet

Tableau 2. 3 Principaux procédés de fabrication microélectronique [Krishnan, 2008] mis en relation avec les ateliers de production du site de Crolles de STMicroelectronics [STMicroelectronics Crolles, 2011].

¹ Substance dont l'addition en faible quantité modifie ou renforce les propriétés d'un matériau, d'un corps [Le Petit Robert, 2013]

Chapitre 2 – Revue bibliographique

Dans ce tableau, nous avons mis en relation les procédés de fabrication microélectroniques tels qu'ils sont décrits dans la littérature avec le découpage en ateliers de production du site de Crolles de STMicroelectronics : un atelier correspond à un type de procédé, ou regroupe plusieurs procédés similaires soit dans leur fonctionnement, soit dans leur rôle.

Plusieurs types de procédés interviennent dans la fabrication de circuits intégrés sur des wafers : oxydation à haute température, dépôt chimique ou physique de matière, gravure sèche ou humide, etc. Une technologie microélectronique est une somme d'étapes de procédé (ou « steps »). L'une des caractéristiques de la production de semiconducteurs est le nombre très important d'étapes de procédé nécessaires à leur réalisation, les produits récents pouvant impliquer plusieurs centaines de steps différents [Krishnan, 2008]. L'ordre et le nombre des étapes de procédé réalisées pour fabriquer un produit microélectronique apparaissent dans la route de production d'un produit ou d'une technologie [Boyd, 2010].

2.2.2 Entrants et sortants pour la fabrication de produits microélectroniques

Les étapes de process impliquent des flux entrants (produits chimiques liquides, gazeux, solides, matériaux) et des flux sortants (rejets liquides, atmosphériques et déchets solides). Le tableau 2.4 ci-dessous présente la nature de ces flux par procédé :

Procédés de fabrication	Entrants	Sortants
Oxydation et recuit	- Electricité - O ₂ , N ₂ O, HCl	-N ₂ , H ₂ , N ₂ O, SiH ₄
Dépôt	Pour LPCVD : - SiH ₄ , PH ₃ , O ₂ , N ₂ , NF ₃ - Electricité	- PH ₃ , SiH ₄ , F ₂ , HF, NF ₃ , N ₂
Photolithographie	- Produits chimiques spécifiques : résines photosensibles, promoteurs d'adhésion, anti-réfectifs, développeurs - Solvants - N ₂ , CF ₄ , O ₂	- Rejets aqueux - Gaz toxiques
Gravure	Pour la gravure humide : - Acides Pour la gravure sèche : - PFC : CF ₄ , CHF ₃ , C ₂ F ₆ , C ₄ F ₈ , SF ₆ , NF ₃ - Cl ₂ - Electricité	- Gaz à effet de serre
Implantation ionique	- Dopants : AsH ₃ , BH ₃ , PH ₃ ,... - N ₂ - Electricité	- Gaz toxiques
ECP = Electro-Chemical Plating (Plaquage électrochimique)	- CuSO ₄ - Eau ultra-pure - Electricité	- Rejets aqueux
CMP = Chemical Mechanical Polishing (Polissage mécano-chimique)	- Slurries ¹ - Eau ultra-pure	- Rejets aqueux
Nettoyage du wafer	- Acides : H ₂ O ₂ , HCl, NH ₄ OH,... - Eau ultra-pure - Autres produits chimiques	- Rejets aqueux

Tableau 2. 4 Entrants et sortants des procédés de fabrication microélectronique [Krishnan, 2008], [Liu, 2010] et [Yao, 2004].

L'industrie du semiconducteur implique la consommation de nombreuses ressources (énergie, produits chimiques liquides et gazeux), et est responsable de rejets aqueux et atmosphériques. La nature de ces entrants et sortants diffère selon les procédés de fabrication, ainsi que les problématiques environnementales qui en découlent : citons par exemple les PFC, gaz à effet de serre, qui sont essentiellement consommés pour les étapes de gravure sèche, et les acides, qui participent à

¹ Slurries : produits chimiques contenant notamment des particules abrasives d'Al₂O₃ ou de SiO₂, des acides ou des bases.

l'acidification atmosphérique et sont utilisés pour la gravure humide et le nettoyage des wafers. D'après Murphy, ces étapes de nettoyage comptent pour une part significative de l'utilisation de produits chimiques, et sont responsables de la majorité de l'eau consommée dans la fabrication des circuits intégrés microélectroniques [Murphy, 2003 - A].

Concernant les flux entrants, une spécificité de l'industrie microélectronique est le rapport très important de la masse de matières premières et d'auxiliaires de production sur la masse du produit final, ce rapport étant très inférieur pour les biens « traditionnels », comme les automobiles (où il est d'environ 2 pour les combustibles fossiles consommés lors de leur production) ou de nombreux appareils domestiques : pour une micro-puce, la masse des matériaux secondaires représente 630 fois la masse du produit final [Williams, 2002]. Rappelons par ailleurs qu'en raison de l'augmentation de la complexité des circuits intégrés et de la densité des composants semi-conducteurs, les rendements de fabrication des wafers deviennent de plus en plus sensibles à la contamination par particules : la réalisation de produits microélectroniques nécessite des produits chimiques extrêmement purs [Plepy, 2004], dont la fabrication est très énergivore, comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2.1.3.1.

2.2.3 Conclusion

Les technologies microélectroniques consistent en un enchaînement de nombreuses étapes de procédés, nécessitant la consommation d'importantes quantités de produits chimiques ultra-purs, ce qui implique des rejets liquides et gazeux. Du fait de la complexité des procédés de fabrication, et des besoins en matières premières et auxiliaires de production, les technologies microélectroniques ont des impacts importants sur l'environnement. Il est indispensable de comprendre ces impacts et de mettre en évidence les contributeurs qui peuvent permettre de les maîtriser.

D'après Griese, comme c'est le cas pour les produits, les impacts environnementaux des procédés de fabrication sont fixés dès les premières phases de leur développement, notamment par le choix des matériaux, et l'élaboration de la route de production [Griese, 2004]. Afin d'améliorer les performances environnementales des futures technologies microélectroniques, il semble donc important de tenir compte de l'environnement dès la phase de conception des technologies.

L'une de nos questions de recherche consiste donc à identifier les paramètres techniques et environnementaux pertinents des technologies dans le but de réduire les impacts des futures technologies sur l'environnement en les concevant mieux.

2.3 Eco-conception des technologies microélectroniques

2.3.1 Qu'est-ce que l'éco-conception ?

L'éco-conception est l'intégration des aspects environnementaux¹ dans la conception et le développement de produit. Elle peut également être appelée, entre autres termes, « conception pour l'environnement » [ISO, 2002].

L'éco-conception fait appel à différents principes, dont la prise en compte de paramètres environnementaux dès la conception, la notion de cycle de vie de produit et l'approche multicritère, c'est-à-dire la prise en compte de tous les aspects et impacts environnementaux pertinents. Intégrer des paramètres environnementaux le plus tôt possible dans le processus de conception permet de concevoir directement les produits les plus pertinents. En effet, une fois les grandes décisions techniques prises, il est plus compliqué d'améliorer les performances en changeant les paramètres du produit. L'approche cycle de vie permet quant à elle d'identifier les aspects et impacts environnementaux pertinents pendant tout le cycle de vie des produits ; il est important de tenir compte de toutes les étapes du cycle de vie des produits, et de voir comment les produits peuvent affecter l'environnement à chacune de ces étapes. Enfin l'approche multicritère a pour but d'éviter les transferts d'impacts en s'assurant que la réduction d'un impact environnemental n'aura pas pour conséquence d'en augmenter un autre [ISO, 2002].

2.3.2 Pourquoi éco-concevoir ?

L'éco-conception des produits ou des procédés, c'est-à-dire l'intégration d'aspects environnementaux dans leur processus de conception, a pour but d'anticiper d'éventuels impacts environnementaux négatifs sur tout leur cycle de vie, et de les éviter en proposant des solutions le plus tôt possible [ISO, 2002].

D'après Wenzel [Wenzel, 2000], les décisions prises pendant la conception sont responsables de 80 % des impacts d'un produit sur son cycle de vie. C'est également le cas pour les procédés de fabrication : selon Griese [Griese, 2004], les impacts environnementaux des procédés sont déterminés dès les premières phases de leur développement, notamment par le choix des matériaux et la définition des étapes de process. De plus, une fois qu'un produit ou un procédé passe en production, ses paramètres environnementaux sont en grande partie fixés, et il sera alors difficile et coûteux de les modifier [Baumann, 2002].

Le besoin d'éco-concevoir les produits et les procédés, notamment dans le secteur de l'électronique, est par ailleurs renforcé par des aspects réglementaires : l'Union Européenne engage les industriels à éco-concevoir les produits électroniques, ainsi que les procédés impliqués dans leur réalisation [Commission

¹ Un aspect environnemental est un élément des activités, produits ou services d'un organisme susceptible d'interactions avec l'environnement [ISO, 2002]

Européenne, 2009]. En effet, l'amélioration des procédés de fabrication entraîne des bénéfices multiples, aussi bien environnementaux qu'économiques. Alors que le plus souvent, les procédés sont améliorés en continu pendant de nombreuses années avant d'atteindre leur optimum, il apparaît important d'augmenter leur efficacité le plus tôt possible dans la phase de développement des technologies [Griese, 2004]. Dans ce but, il est nécessaire de supporter la phase de conception avec des outils et méthodes permettant l'évaluation des impacts environnementaux des produits sur tout leur cycle de vie, qui comprend l'évaluation des impacts des technologies de fabrication [Baumann, 2002].

Il apparaît donc nécessaire de connaître les impacts environnementaux des produits et des procédés dès la conception afin d'éco-concevoir les produits. Le paragraphe suivant traite des différentes méthodes d'évaluation des impacts environnementaux, et de leur applicabilité dans le domaine de la microélectronique.

2.4 Méthodes d'évaluation des impacts environnementaux

Il est nécessaire d'évaluer les performances environnementales d'un produit et des procédés mis en œuvre pour sa fabrication au cours de leur développement, afin de maîtriser et d'anticiper les impacts environnementaux associés au produit sur son cycle de vie [ISO, 2002].

Plusieurs méthodes d'évaluation environnementale peuvent être utilisées, dont l'analyse de cycle de vie du produit, ou d'autres approches basées sur ce concept.

2.4.1 L'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

L'ACV est la méthode la plus couramment utilisée pour estimer les impacts environnementaux d'un produit. Il s'agit d'une analyse des aspects environnementaux et des éventuels impacts environnementaux qui en découlent, sur tout le cycle de vie du produit [ISO, 2006].

L'ACV se compose de quatre phases, comme nous le voyons sur la figure 2.2 :

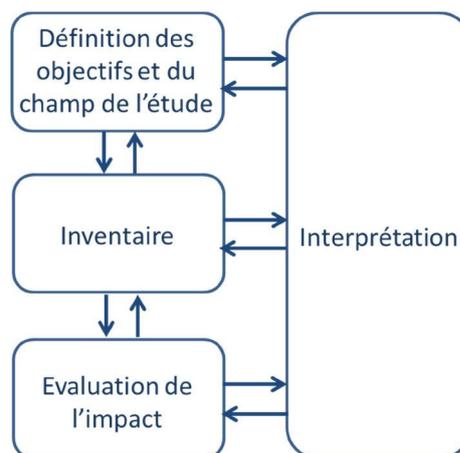


Figure 2. 2 Les quatre phases d'une étude d'ACV [ISO, 2006].

La première phase consiste à définir les objectifs de l'ACV, ainsi que le système étudié. Lors de l'inventaire, on collecte les données d'entrées et de sortie du système permettant d'atteindre les objectifs fixés : les flux entrants et sortants sont quantifiés. Ces données sont alors traduites en impacts environnementaux lors de la phase d'évaluation de l'impact. Enfin, l'interprétation des résultats a lieu : il s'agit de réaliser un bilan de ces résultats et d'établir des recommandations répondant aux objectifs de l'étude.

La méthode ACV permet une analyse très fine des impacts environnementaux des produits et procédés. Elle est cependant difficile à utiliser dans le secteur des procédés de fabrication de produits microélectroniques. Selon Krishnan [Krishnan, 2004], un outil d'ACV générique pour les procédés de fabrication des semiconducteurs est compliqué à développer car la fréquence des changements technologiques est élevée, et les informations disponibles ne sont pas suffisamment précises [Krishnan, 2004]. Cela est dû à la complexité de ces procédés, impliquant des centaines d'étapes variant d'un produit à un autre et d'un site de production à un autre, et évoluant très rapidement [Murphy, 2003 - A].

De plus, l'utilisation de l'ACV reste très limitée dans les premières phases du développement d'un produit ou d'un procédé : cela demande beaucoup de données difficiles à obtenir à ce stade du cycle de vie du produit, sans oublier que le produit évolue pendant son développement (ses paramètres sont constamment adaptés). Il est donc nécessaire de disposer d'une méthode plus simple et plus rapide d'évaluation des impacts environnementaux [Poudelet, 2012].

Des simplifications ou des adaptations de l'ACV ont donc été proposées afin d'améliorer notre maîtrise des impacts environnementaux des procédés de fabrication de semiconducteurs.

2.4.2 Evaluation des impacts environnementaux de la microélectronique : quelques méthodes

2.4.2.1 ACV sur les entrants et sortants économiques

La méthode d'ACV sur les entrants et sortants économiques (economic input-output LCA) est une alternative à la phase d'inventaire de l'ACV traditionnelle. Elle permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un procédé sur tout son cycle de vie, à partir d'informations sur les échanges monétaires entre les industries. On considère que le produit sortant d'une entreprise constitue un produit entrant pour une autre (par exemple, l'achat de circuits intégrés par une compagnie fabriquant des téléphones portables). Des informations sur les émissions des industries sont incluses dans le modèle.

L'avantage de cette méthode est qu'elle utilise des données publiques, et qu'elle est donc facilement reproductible. En revanche, elle ne permet pas une analyse très fine des impacts environnementaux d'un produit ou d'un procédé : ce modèle étant basé sur des informations financières, il n'y a pas assez de données disponibles sur les effets environnementaux. De plus, des incertitudes viennent fragiliser les résultats [Carnegie Mellon University].

2.4.2.2 ACV hybride

Plusieurs études ont été menées en combinant des données liées aux procédés de fabrication avec des données économiques : on parle alors d'ACV hybride, puisque l'inventaire du cycle de vie est basé sur deux types d'informations différentes. Les ACV hybrides sont souvent entreprises pour combler un manque d'informations sur les procédés de fabrication microélectroniques : c'est le cas de Boyd [Boyd, 2010], qui a utilisé des données économiques lorsque les données procédé n'étaient pas disponibles.

Krishnan a quant à lui proposé une approche hybride pour évaluer les besoins énergétiques de la fabrication des produits chimiques ultra-purs et des équipements nécessaires à la production de circuits intégrés, après avoir identifié des manques significatifs de données sur ces sujets [Krishnan, 2008]. Le prix par masse unitaire de produit chimique spécifique peut être jusqu'à deux ou trois ordres de grandeur supérieurs au prix des produits chimiques traditionnels [Krishnan, 2008].

Mais cette méthode est source d'incertitudes car :

- Il est compliqué d'être sûr d'avoir inclus tous les procédés en amont de l'utilisation de ces produits chimiques
- Elle exclut partiellement l'énergie consommée par les procédés de purification des produits chimiques (or celle-ci n'est pas négligeable : la fabrication de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) nécessite 6,7 MJ/kg pour le grade industriel, et jusqu'à 1,5 MJ/kg supplémentaires pour les produits les plus purs) [Krishnan, 2008].

Il apparaît donc que réaliser une analyse de cycle de vie d'un produit ou d'un procédé est une démarche très longue et compliquée : cela implique la collecte de nombreuses données, pas toujours disponibles ou difficilement accessibles. De plus, selon le niveau de précision souhaité sur les résultats, les incertitudes peuvent être trop importantes pour permettre d'utiliser ces analyses afin de prendre des décisions pendant la conception. D'autres méthodes ont ainsi été proposées, notamment des approches simplifiées d'analyse environnementale de produits ou de procédés.

2.4.2.3 Analyse d'inventaire de cycle de vie

La première étape de l'évaluation des impacts environnementaux consiste à réaliser un inventaire des données nécessaires. Cette phase est souvent longue et complexe, notamment dans le domaine de la microélectronique où les étapes de procédé sont nombreuses, ainsi que les données sur les flux entrants et sortants à collecter [Bhamra, 1999].

Schischke [Schischke, 2001] a proposé une méthodologie d'analyse d'inventaire de cycle de vie utilisée sur un site de production de circuits intégrés de la compagnie Motorola. Le résultat de cet inventaire est une modélisation du site sous forme de « boîte noire » avec les flux massiques et énergétiques entrants et sortants quantifiés pour un wafer moyen réalisé. Par ailleurs, les procédés de fabrication des circuits intégrés et les procédés des infrastructures ont été regroupés en différents modules, auxquels les flux ont été alloués. Les données d'entrées collectées concernent l'ensemble du site pour une année ; peu de données étant connues précisément sur les procédés de fabrication et les autres procédés présents

Chapitre 2 – Revue bibliographique

dans les infrastructures, les informations manquantes ont été obtenues grâce aux estimations d'experts, notamment pour l'allocation des flux « site » aux modules définis dans l'étude. L'estimation des impacts environnementaux des flux a été réalisée par les méthodes ProTox (présentée à la suite de ce paragraphe) et d'Analyse des impacts du Cycle de vie.

Cette méthode est intéressante pour maîtriser les impacts environnementaux d'un site de production. Cependant, les données d'inventaire étant liées au site et pas aux technologies microélectroniques, les résultats obtenus ne semblent pas suffisamment précis pour aider à la prise de décision lors de la conception de procédés de fabrication. L'allocation des flux entrants et sortants du site de production sur les modules peut en effet être source d'imprécision ou d'erreur. De plus, cette étude réalise l'évaluation environnementale des procédés, mais ne permet pas la distinction entre les différentes technologies qui les utilisent.

2.4.2.4 ProTox [Griese, 2004]

La méthode ProTox évalue la toxicité des auxiliaires de fabrication utilisés par les technologies microélectroniques. Cet outil d'analyse des procédés agrège les données sur la toxicité des flux entrants en un indicateur unique, le TPI (Toxic Potential Indicator), tenant compte du potentiel de toxicité des produits chimiques, et de la consommation d'eau et d'énergie. Il permet d'accéder à des informations plus utiles qu'en se limitant à un inventaire des entrants et sortants, tout en étant moins complexe qu'une ACV. Cet indicateur peut être utilisé pour éco-concevoir les technologies : en diminuant le TPI par produit, les risques environnementaux liés à la toxicité d'une nouvelle technologie seront réduits. Toutefois, éco-concevoir les procédés de fabrication ne se limite pas à réduire leur potentiel de toxicité, même si cela peut faire partie des objectifs d'une telle démarche. D'autres outils et indicateurs seront nécessaires pour compléter cette analyse en intégrant différents paramètres techniques environnementaux.

2.4.3 Conclusion

D'après la littérature, l'ACV permet une évaluation très précise et complète des impacts environnementaux d'un produit ou d'un procédé. Cependant, réaliser un tel travail est très long et complexe [Murphy, 2003 - B], et nécessite de très nombreuses informations, en particulier dans le cas de l'analyse des procédés de fabrication microélectronique.

Des solutions alternatives ont été proposées, en travaillant notamment sur la collecte des informations nécessaires à l'évaluation environnementale de la phase de fabrication des semiconducteurs. Certaines de ces solutions se sont avérées concluantes dans un contexte précis, mais selon les objectifs de l'évaluation, des difficultés importantes persistent, en premier lieu sur l'accès aux données. Les paragraphes suivants sont consacrés à cette problématique.

2.5 Accès aux données pour l'évaluation environnementale des procédés de fabrication microélectronique lors de leur phase de conception

« Le management des informations et des données est un élément essentiel de l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit. La prise de décision est aidée et améliorée par la collecte, l'échange et le management des informations et des données provenant d'organismes et de sources internes [...] et externes » [ISO, 2002].

Nous nous intéresserons dans ce paragraphe à la disponibilité des données nécessaires à l'éco-conception des procédés de fabrication de produits microélectroniques, à leur nature et à leur collecte.

2.5.1 Manque de données

Le manque de données est un constat général dans la littérature concernant l'évaluation environnementale et l'éco-conception des procédés de fabrication microélectronique. En effet, d'après Murphy [Murphy, 2003 - B], très peu d'inventaires de données complets sur la fabrication de semi-conducteurs, voire aucun, sont disponibles. Cela est confirmé par Boyd [Boyd, 2010], qui rapporte que de nombreuses sources ont mis en évidence l'absence d'inventaire de données complet et le manque de données d'ACV pour les produits microélectroniques, ainsi que le besoin d'évaluations environnementales plus exhaustives et transparentes dans ce domaine. Par ailleurs, ces données déjà rares le sont encore plus au moment du développement des produits et technologies microélectroniques [Griese, 2004].

L'une des raisons de ce manque d'informations est la confidentialité des données. Les industries microélectroniques font partie d'un secteur concurrentiel qui évolue très rapidement, et les informations sur les technologies en développement sont très sensibles. Cela limite souvent les données à des technologies relativement anciennes [Liu, 2010].

2.5.2 Différentes méthodes de collecte de données selon leur nature

Les données nécessaires pour évaluer les performances environnementales des procédés microélectroniques sont nombreuses et difficiles à obtenir. Comme le rapporte Murphy [Murphy, 2003 - B], l'espérance de vie d'un tel produit étant relativement courte (moins de deux ans en général), il y a un risque que le temps d'obtenir toutes les informations sur un produit ou une technologie, l'inventaire ne soit plus applicable. Il est donc important de travailler sur le meilleur moyen d'obtenir les informations utiles à l'estimation des impacts environnementaux de la microélectronique. Or dans la littérature, on observe généralement un manque d'explications sur les méthodologies de collecte de données [Boyd, 2010].

Deux stratégies principales de collecte de données apparaissent dans le contexte de l'évaluation environnementale des procédés microélectroniques : l'approche « top-down » et l'approche « bottom-up ». Ces méthodes diffèrent par la nature des données obtenues. Nous nous baserons sur les travaux

de Murphy [Murphy, 2003 - B] pour présenter ces deux approches dans le cadre du développement d'un inventaire de cycle de vie de la fabrication de produits microélectroniques sur un site de production.

2.5.2.1 L'approche « top-down »

L'approche « top-down » consiste à collecter des informations relatives à un site de production, et à les répartir à un niveau plus fin, généralement celui d'une opération unitaire. L'avantage d'un tel mode de collecte de données est qu'il permet de tenir compte de tous les flux entrants et sortants de matériaux et d'énergie d'un site, aussi bien ceux directement liés à la production de produits microélectroniques que ceux liés au fonctionnement des infrastructures.

Cependant, toujours selon Murphy, la répartition de données au niveau site sur des procédés unitaires peut s'avérer difficile. C'est également la conclusion de Liu [Liu, 2010], qui a utilisé cette approche pour réaliser l'ACV d'une puce DRAM dans l'industrie taïwanaise. De plus, cela ne permet souvent pas la distinction entre les différents produits réalisés sur le site (qui n'ont pas tous les mêmes impacts environnementaux), ni entre les wafers de production et les autres (R&D ou qualification des équipements par exemple). Selon les objectifs des études, il peut être intéressant de pouvoir isoler certains flux, notamment ceux associés uniquement aux procédés.

2.5.2.2 L'approche « bottom-up »

L'approche « bottom-up » consiste quant à elle à collecter des informations plus précises, sur les équipements de production, et de les agréger au niveau des opérations unitaires. Les données d'inventaire obtenues par cette méthode sont plus fines que celles de l'approche « top-down » puisqu'elles sont directement liées aux procédés de fabrication. Cela facilite la modélisation des procédés, et augmente la probabilité que les résultats soient utilisés par les concepteurs pour améliorer les performances environnementales des technologies microélectroniques. De plus, les industries de ce domaine d'activité ont rapporté qu'elles avaient davantage besoin de données détaillées sur les procédés de fabrication que de données au niveau de leurs sites [Murphy, 2003 - B]. Pour Murphy, l'analyse des recettes de production, qui sont des modélisations des étapes de procédé reliant notamment leur durée et la demande en ressources des steps, est donc le meilleur moyen pour accéder aux données nécessaires [Murphy, 2003 - B].

2.5.3 Conclusion

D'après la littérature, nous constatons globalement un manque de données sur les performances environnementales des procédés de fabrication microélectronique: il n'existe pas à ce jour d'inventaire de données exhaustif sur les impacts environnementaux des technologies. Cela est dû au nombre important d'informations nécessaires, et aux difficultés liées à leur collecte. Cependant, dans la littérature, nous ne trouvons que peu d'informations sur les méthodes de collecte utilisées et sur leur efficacité.

Il est donc important de définir quelles données sont utiles pour intégrer des paramètres environnementaux en conception, et réfléchir au moyen le plus efficace pour les obtenir le plus rapidement et simplement possible, en proposant une méthodologie de collecte adaptée au contexte et reproductible.

L'identification des informations nécessaires pour éco-concevoir les technologies microélectroniques, ainsi que les méthodes de collecte et d'utilisation de ces données dans notre contexte industriel, constituent notre deuxième question de recherche.

2.6 Comment éco-concevoir les technologies microélectroniques ?

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu que les procédés de fabrication de produits microélectroniques ont des impacts non négligeables sur l'environnement. Il est important de maîtriser ces impacts le plus tôt possible, c'est-à-dire dès le développement des technologies.

Eco-concevoir les technologies microélectroniques implique de bien connaître leurs performances environnementales, afin d'intégrer les bons paramètres dans le processus de conception. Cela s'avère compliqué, notamment en raison du grand nombre de données nécessaires et des difficultés liées à leur disponibilité.

Nous nous intéresserons dans cette partie aux moyens à mettre en œuvre pour éco-concevoir les procédés de fabrication de semiconducteurs : quels sont les acteurs de l'entreprise qu'il faut impliquer dans une telle démarche ? Quels sont leurs besoins et leurs rôles ? Quels outils doivent être mis en place afin de diminuer les impacts environnementaux des futures technologies ?

2.6.1 Acteurs

2.6.1.1 Constat : manques et difficultés

Pour garantir l'efficacité d'une stratégie d'éco-conception des technologies microélectroniques, il est indispensable de tenir compte de toutes les personnes jouant un rôle dans leur développement. Lofthouse [Lofthouse, 2006] a constaté un manque de compréhension du rôle que jouent les concepteurs dans l'éco-conception. Les concepteurs doivent être conscients des impacts de leurs décisions, et en tenir compte [Poudelet, 2012]. Il est en effet important d'impliquer tous les acteurs pouvant influencer l'utilisation des méthodes et outils de conception lorsque l'on souhaite intégrer des problématiques environnementales dans le développement de produit ou de procédé [Lindahl, 2006]. Cet aspect pluridisciplinaire de l'éco-conception est développé dans la norme ISO 14062 [ISO, 2002].

Lofthouse [Lofthouse, 2006] a cherché à définir les difficultés ressenties par les concepteurs à mener des démarches d'éco-conception. Beaucoup d'entre eux mettent tout d'abord en évidence le fait qu'ils ne disposent pas des bons outils. Par ailleurs, ils sont contraints de collecter de nombreuses informations

souvent très dispersées, ce qui leur prend beaucoup de temps. Enfin, les paramètres environnementaux intégrés dans le développement de produit ne sont pas toujours en rapport avec leur travail et les données qu'ils manipulent, ce qui peut les décourager [Lofthouse, 2006].

Il est également nécessaire de tenir compte du fait que les concepteurs de technologies microélectroniques ne sont pas nécessairement experts en environnement : la compréhension d'une information environnementale peut leur être difficile [Baumann, 2002]. La coopération est d'ailleurs *a priori* insuffisante entre les différents acteurs de l'éco-conception : notamment manque de communication et d'échange d'expérience entre ceux qui supportent les méthodes et outils, et ceux qui les exécutent [Pascual, 2003].

Pour permettre l'efficacité d'une démarche d'éco-conception, il est donc important d'impliquer tous les acteurs, notamment les concepteurs et les spécialistes en environnement, et d'assurer des échanges entre eux, afin d'adapter les outils et méthodes développés à ceux qui les utiliseront.

2.6.1.2 Quels sont les besoins des concepteurs ?

Les concepteurs, dans les équipes de Recherche et Développement (R&D), sont les premiers utilisateurs des outils d'éco-conception des technologies microélectroniques. La détermination de paramètres environnementaux pertinents pour améliorer les performances des procédés de fabrication implique une coopération importante entre la R&D et les spécialistes en éco-conception [Griese, 2004].

Selon Lofthouse, les concepteurs ont besoin de conseils simples pour mettre en place des solutions techniques permettant la diminution des impacts environnementaux des futures technologies. Ceux-ci peuvent se présenter sous forme de courtes listes de problématiques qu'ils pourront utiliser comme base à leur travail sur l'éco-conception. Les objectifs fixés doivent être simples et hiérarchisés, afin de réduire la quantité d'informations qu'ils ont à gérer et d'augmenter l'efficacité de leurs actions [Lofthouse, 2006]. De plus, les paramètres environnementaux intégrés dans le développement des procédés de fabrication doivent être adaptés aux concepteurs : Lofthouse constate ainsi que les bases de données environnementales des services ESH (Environment, Safety and Health = Environnement, Sécurité et Santé) des grandes entreprises ne sont souvent pas utilisées par les concepteurs car elles sont trop générales. Ils ont besoin d'informations techniques spécifiques similaires à celles qu'ils manipulent dans leur travail, mais mises en relation avec l'environnement [Lofthouse, 2006].

Il est par ailleurs indispensable que les concepteurs aient facilement et rapidement accès aux données dont ils ont besoin pour éco-concevoir les technologies microélectroniques, et qu'ils disposent d'une plateforme dédiée afin de communiquer sur leurs actions et de maintenir les informations sur l'éco-conception à jour [Lofthouse, 2006].

Après ces observations sur les besoins des concepteurs pour éco-concevoir les procédés de fabrication de produits microélectroniques, nous allons nous intéresser aux types d'outils qu'ils peuvent utiliser pour mener à bien une démarche d'éco-conception.

2.6.2 Outils

2.6.2.1 Informations nécessaires

Pour éco-concevoir les technologies microélectroniques, il est nécessaire de maîtriser leurs impacts environnementaux le plus précisément possible. Pour cela, des informations liées aux procédés doivent être obtenues. Nous avons vu qu'il n'existe pas encore d'inventaire de données environnementales exhaustif sur les procédés des technologies microélectroniques, mais c'est ce vers quoi nous devrions nous orienter, d'après Murphy. En effet, les sites de fabrication de semiconducteurs étant tous structurés de manière très proche, des données liées aux procédés seraient facilement compréhensibles par l'ensemble des industriels de ce secteur [Murphy, 2003 - B].

Selon Murphy [Murphy, 2003 - B], l'analyse des recettes de production, qui consiste donc en une approche « bottom-up », est le meilleur moyen pour collecter des données d'inventaire. D'après ces recettes, on peut accéder, pour chaque étape de procédé, aux volumes de produits chimiques liquides et gazeux consommés [Murphy, 2003 - B].

Cependant, les recettes ne comportent en général pas ou peu d'informations sur la consommation d'énergie des étapes de procédé. Celle-ci peut s'obtenir par des calculs, mais en se basant sur beaucoup d'estimations. Des mesures directes peuvent également être effectuées, mais cela implique d'installer des équipements de mesure sur les équipements de fabrication, ce qui est souvent difficile à réaliser sur un site de production : la remise en fonction des équipements après une interruption nécessite en effet de nombreuses étapes de qualification [Murphy, 2003 - B].

Les informations nécessaires aux concepteurs de technologies microélectroniques pour faire de l'éco-conception sont donc de différentes natures, et leur disponibilité n'est pas la même, en fonction des données et des sites de production. La détermination d'une méthode de collecte de données fait partie des objectifs de ce travail, comme nous l'avons vu au paragraphe 2.5.3.

2.6.2.2 Les outils et méthodes d'éco-conception

- **Discussion sur les outils et méthodes d'éco-conception**

Baumann définit les outils d'éco-conception de la façon suivante : tout moyen systématique pour tenir compte de problématiques environnementales pendant le processus de développement de produit [Baumann, 2002]. Dans cette partie, nous nous intéressons aux analyses des méthodes et outils d'éco-conception qui ont fait l'objet de publications.

Le premier constat que l'on peut faire est le manque d'adaptation des moyens mis en œuvre pour l'éco-conception à leurs utilisateurs. D'après Lindahl, la plupart des outils et des méthodes d'intégration de l'environnement en conception ont été développés par des spécialistes de l'environnement, en se focalisant majoritairement sur les problématiques environnementales, sans tenir compte de critères techniques liés aux produits et procédés, et sans réel contact avec les utilisateurs de ces outils. Lindahl note par ailleurs que l'objectif de tels outils est de faciliter la démarche d'éco-conception pour les concepteurs : ils acceptent difficilement l'idée que manipuler des données et obtenir des résultats présentés dans un langage qui leur est inconnu sera bénéfique à leur travail [Lindahl, 2006].

Ce qui ressort ensuite le plus souvent de la littérature est que, bien que de nombreuses publications décrivent des outils et méthodes d'éco-conception, très peu d'entre elles traitent des utilisateurs et de la diffusion de ces outils. En outre, relativement peu d'articles font référence à l'efficacité des outils par l'analyse de retours d'expérience, et nous ne savons généralement pas si les méthodes présentées ont contribué à diminuer les impacts environnementaux des produits ou procédés grâce à l'intégration de paramètres environnementaux dans leur processus de développement [Baumann, 2002]. Cette absence de contexte industriel dans la littérature sur les outils d'éco-conception est d'ailleurs l'un des constats réalisés par Pascual, qui déplore le fait que le plus souvent, aucune attention n'est portée sur les processus sous-jacents et sur ce que l'on pourrait en tirer. De plus, des exemples de succès de mise en œuvre de stratégies d'éco-conception pourraient stimuler une application plus large dans l'industrie, en particulier dans l'industrie microélectronique [Pascual, 2003].

- **Caractéristiques nécessaires des outils et méthodes d'éco-conception**

Certains auteurs proposent des solutions pour augmenter les chances de mettre en place des stratégies d'éco-conception efficaces. Lofthouse incite par exemple les industries à travailler en premier lieu sur un prototype, orienté initialement sur la collecte des données nécessaires, qui permettra d'encourager les échanges entre les différents acteurs et de définir des outils pertinents. En procédant de cette manière, on pourra s'affranchir des risques liés à la diffusion de méthodes basées sur des informations difficiles à obtenir au moment de la conception d'un produit ou d'un procédé, en adaptant les outils d'éco-conception à la réalité de l'entreprise [Lofthouse, 2006].

Il est également important de créer des méthodes et outils fonctionnels dans le contexte de l'entreprise souhaitant faire de l'éco-conception, en tenant notamment compte de la culture de cette entreprise, et des autres outils qui y sont utilisés [Lindahl, 2006].

Enfin, il ne faut pas négliger la communication et la visualisation des résultats des stratégies d'éco-conception : ce sont des facteurs nécessaires pour rendre les méthodes et outils attractifs, pour mesurer leur efficacité, pour les améliorer, et pour assurer leur diffusion et leur utilisation [Lindahl, 2006].

2.6.3 Conclusion

La réussite d'une démarche d'éco-conception implique tout d'abord d'identifier tous les acteurs pouvant jouer un rôle dans l'amélioration des performances environnementales d'un produit ou d'un procédé dès leur développement. Il est alors important de tous les impliquer dans la démarche, et d'assurer des échanges réguliers entre eux.

Concernant les méthodes et outils d'éco-conception, ils doivent être adaptés aux différents acteurs, notamment en se basant sur des données qu'ils maîtrisent et qu'ils peuvent donc utiliser facilement.

Afin d'évaluer l'efficacité d'une stratégie d'éco-conception et de savoir comment l'améliorer, il est enfin nécessaire de suivre et d'analyser les résultats obtenus grâce aux outils et méthodes mis en place.

La définition d'outils d'aide à l'éco-conception adaptés au site de conception et de production microélectronique sur lequel nous avons réalisé cette étude constitue notre troisième question de recherche : quels sont les moyens à mettre en œuvre pour assurer l'efficacité d'une démarche d'éco-conception des procédés de fabrication microélectronique ?

2.7 Nos questions de recherche

Cette revue de la littérature sur les performances environnementales des technologies microélectroniques nous a permis de mettre en évidence l'état des connaissances actuelles sur ce sujet. Nous avons alors identifié les manques et difficultés qui persistent pour la mise en place d'une stratégie d'éco-conception des procédés de fabrication de semiconducteurs, dans le but de maîtriser et d'anticiper leurs impacts négatifs sur l'environnement.

Tout au long de ce chapitre, nous avons défini nos questions de recherche, qui sont les suivantes :

- Comment caractériser environnementalement une technologie microélectronique, et quels paramètres techniques et environnementaux sont des leviers pour réduire ses futurs impacts sur l'environnement ?
- Quelles sont les informations nécessaires pour éco-concevoir les technologies microélectroniques, et comment peut-on obtenir et utiliser ces données dans un contexte industriel ?
- Que seraient des méthodes et des outils d'aide à l'éco-conception des procédés de fabrication microélectronique efficaces, et comment doivent-ils être utilisés ?

Le **chapitre 3** propose un modèle de caractérisation d'une technologie microélectronique pour réaliser les analyses environnementales.

Chapitre 2 – Revue bibliographique

Le **chapitre 4** approfondit ce modèle sur un cas d'étude pour mettre en évidence son applicabilité industrielle.

Le **chapitre 5** propose des méthodes et outils d'éco-conception adaptés à notre problématique.

3. MODELISATION D’UNE TECHNOLOGIE MICROELECTRONIQUE

3.1 Modèle du processus de production d’un produit microélectronique

Le but de ce travail est de caractériser des technologies microélectroniques, afin d’évaluer les paramètres liés à l’environnement qui pourront être intégrés dans les processus d’éco-conception des futures technologies.

Un produit issu d’une technologie microélectronique est décrit par une « route » (ou process-flow), sur laquelle figure l’enchaînement des briques nécessaires à sa fabrication, dans un ordre spécifique. Chaque brique assure une fonction et consiste en un ensemble d’étapes de procédé (figure 3.1). Ces étapes sont réalisées dans des équipements de production, et peuvent se répéter plusieurs fois au cours de la fabrication des produits.

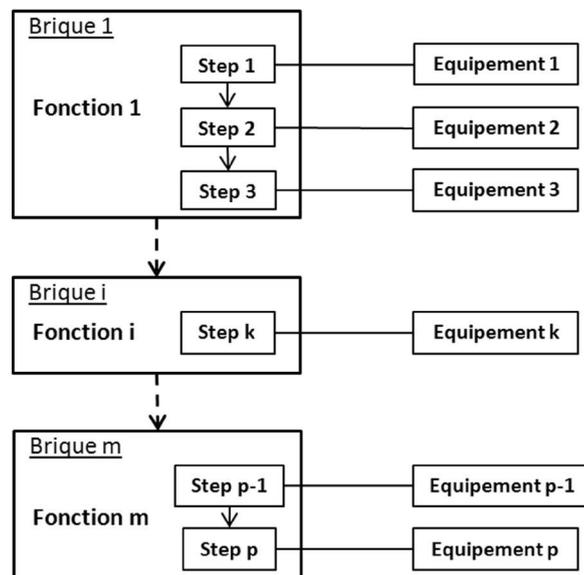


Figure 3. 1 Modèle d’une route pour un produit issu d’une technologie microélectronique

Cette représentation de route est simplifiée : d’autres informations techniques y apparaissent, mais nous ne mentionnons que celles que nous utiliserons dans l’étude. Une brique est constituée d’une ou plusieurs étapes, chaque étape étant associée aux équipements dans lesquels elles peuvent être réalisées. Un équipement est caractérisé par un atelier, et une machine : la première lettre du nom de l’équipement correspond à la première lettre de l’atelier concerné, et le numéro permet d’identifier la machine.

Chapitre 3 – Modélisation d’une technologie microélectronique

Le tableau 3.1 ci-dessous présente un exemple de brique d’une route d’un produit de la technologie 45 nm. La fonction de cette brique, *GATE_STACK*, est de fabriquer une partie de la grille du produit. Elle est constituée de plusieurs étapes de procédé :

Brique	Step	→ Rôle
GATE_STACK	Wet	→ Nettoyage / Préparation de surface
	Traitement Thermique	→ Oxydation
	Traitement Thermique	→ Dépôt
	Défectivité	→ Mesure des défauts sur le wafer

Tableau 3. 1 Exemple de brique pour la route d’un produit de la technologie 45 nm.

Une route est associée à un produit. Pour modéliser la route d’une technologie microélectronique, nous travaillons à partir de la route majoritaire de cette technologie, c’est-à-dire celle correspondant au produit qui sera fabriqué en plus grandes quantités.

Plusieurs routes existent pour une même technologie : la majorité des étapes de procédé seront les mêmes entre deux produits d’une même technologie, mais il y aura quelques modifications dans la route (ajouts ou changements de steps) en fonction des options demandées sur les produits (mémoires DRAM par exemple).

Remarque : en réalité, le procédé est plus compliqué et nécessite des étapes supplémentaires que l’on appelle Rework. Les steps de rework ont lieu lorsqu’une étape de procédé n’a pas suffi à atteindre les objectifs techniques (pas assez de matériau enlevé en CMP par exemple). Ces étapes de rework ne sont pas systématiques, et il est difficile de déterminer une fréquence à laquelle elles ont lieu. Dans cette étude, nous travaillons à partir de la route sans les étapes de Rework.

Les steps sont parfois décomposés en sous-steps. Il s’agit d’étapes qui, réalisées les unes à la suite des autres, formeront l’étape de procédé inscrite dans le process-flow. Le nombre de sous-steps n’est pas le même pour toutes les étapes. Les sous-steps d’un step ont lieu sur un même équipement ; lorsque l’on change d’équipement, on change de step. Ce découpage des étapes de procédé en sous-steps est visible sur la figure ci-dessous.

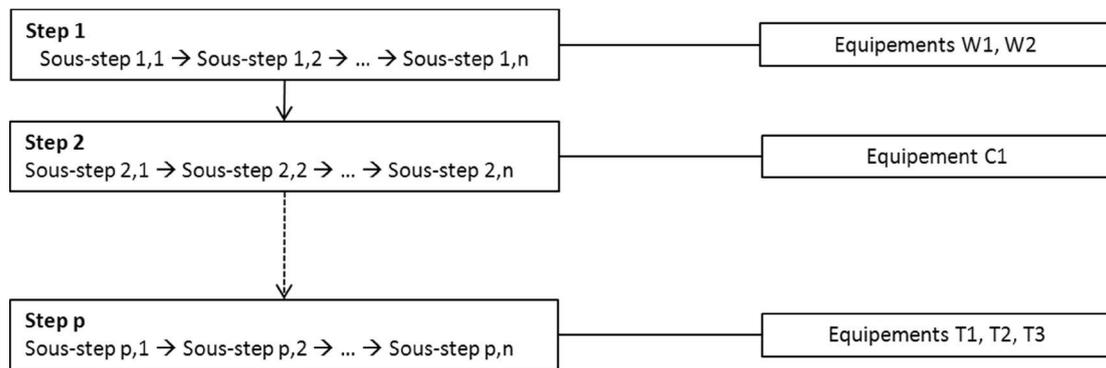


Figure 3. 2 Lien entre step, sous-step et équipement.

Sur la figure 3.2 ci-dessus, les équipements W1 et W2 font partie de la même famille d'équipements, et du même atelier de production. Dans le process-flow, à chaque step sont associés un ou plusieurs équipements capables de réaliser l'étape. Plusieurs équipements sont qualifiés pour réaliser la même étape de procédé : ce sont soit des équipements de la même famille (c'est-à-dire des équipements identiques effectuant le même procédé de la même façon), soit des équipements au fonctionnement différent (aboutissant au même résultat, mais de façon différente).

3.2 Identification des flux

L'étude concerne les procédés de fabrication microélectronique des circuits intégrés sur les wafers, depuis l'arrivée des wafers de Silicium vierges sur le site, jusqu'à leur départ vers les sites réalisant les étapes ultérieures.

Les process permettant la fabrication de circuits intégrés sur les wafers sont réalisés dans des équipements, installés au sein d'infrastructures particulières. Les consommations et les rejets des infrastructures, des équipements et des étapes de procédé sont présentés dans le tableau 3.2.

	Consommations	Rejets
Infrastructures	Eau Produits chimiques Energie Consommables	Liquides Gaz Solides
Equipements	Eau Produits chimiques Energie Consommables	Liquides Gaz Solides
Etapes de procédé	Eau Produits chimiques Energie	Liquides Gaz

Tableau 3. 2 Consommations et rejets des différentes entités du site.

Chapitre 3 – Modélisation d’une technologie microélectronique

Les infrastructures nécessaires au fonctionnement d’un site de fabrication de produits microélectroniques, ainsi que les équipements dans lesquels ont lieu les étapes de procédé, consomment de l’eau, de l’énergie, des produits chimiques et des consommables, et rejettent des liquides, des gaz et des déchets solides. Les étapes de procédé requièrent quant à elles de l’eau, de l’énergie et des produits chimiques, et rejettent des liquides et des gaz.

La fabrication de puces électroniques implique donc des entrants et des sortants, pour les infrastructures et pour la fabrication des circuits intégrés. Ils sont présentés qualitativement dans le schéma suivant (figure 3.3) :

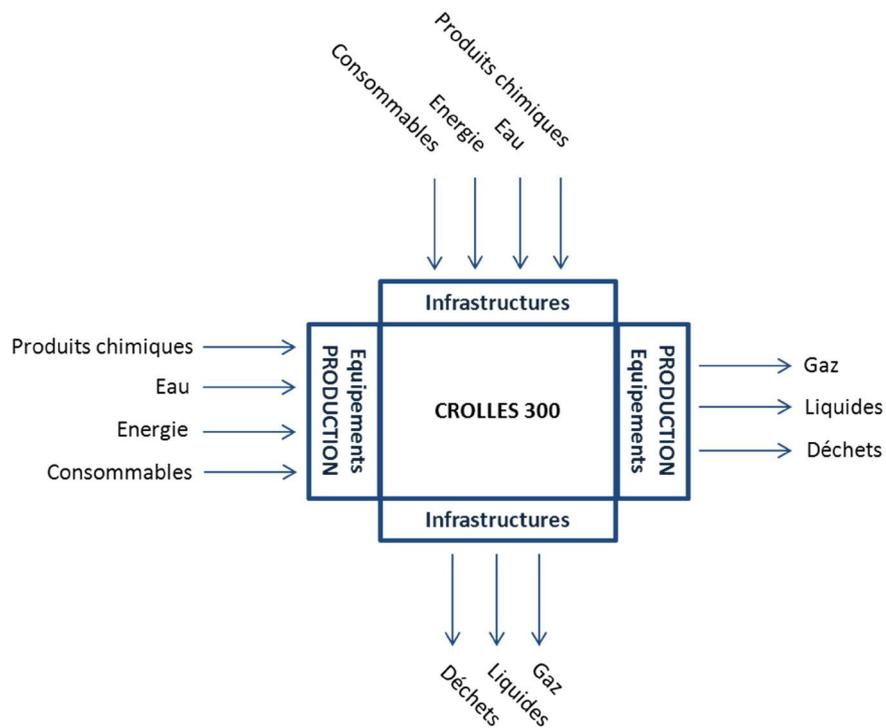


Figure 3. 3 Inventaire des flux d’un site de fabrication de produits microélectroniques.

Nous distinguerons les entrants et sortants associés à la production des circuits intégrés sur les wafers par les équipements, de ceux associés aux infrastructures.

La partie Production correspond :

- Au process des wafers dans les équipements de production
- Au fonctionnement des équipements de production

Chapitre 3 – Modélisation d’une technologie microélectronique

La partie Infrastructures regroupe les entités suivantes :

- Fonctionnement des salles blanches
- Distribution d’électricité
- Réseaux d’eau (distribution + circulation)
- Stockage et distribution des produits chimiques liquides et gazeux
- Traitement des effluents gazeux
- Station de traitement des effluents aqueux industriels
- Gestion des déchets

Afin de caractériser une technologie microélectronique, nous avons décidé de séparer la partie Production en deux entités : les étapes de procédé, et l’équipement dans lequel l’étape est réalisée. Cela nous permettra de nous focaliser sur les consommations et rejets directement liés au process des wafers, en les distinguant de ceux liés au fonctionnement des équipements. Par ailleurs, nous identifierons les flux entrants et sortants en fonctionnement normal.

3.2.1 Identification des flux entrants

3.2.1.1 Consommations liées aux process des wafers

L’ensemble des flux entrants dans les étapes de process des wafers est présenté dans le tableau 3.3 ci-dessous.

Atelier	Entrants	EDI Eau Désionisée	Electricité	Produits chimiques liquides	Produits chimiques gazeux	Gaz réseau
CMP		X	X	X		X
Traitement Thermique			X		X	X
Photolithographie		X	X	X	X	X
Métal		X	X	X	X	X
Diel			X	X	X	X
Etch		X	X		X	X
Dry Stripping			X		X	X
Wet		X	X	X	X	X
Implantation Ionique			X		X	X

Tableau 3. 3 Entrants des ateliers de production.

La réalisation des étapes de procédé implique la consommation d’électricité et de gaz réseau, nécessaires au fonctionnement des équipements de production de tous les ateliers. Les gaz réseau (Azote, Dioxygène, Argon) sont distingués des produits chimiques gazeux car leur utilisation n’est pas directement liée aux étapes de procédé.

Les procédés humides consomment de l’eau désionisée (EDI) et des produits chimiques liquides.

Chapitre 3 – Modélisation d’une technologie microélectronique

Les procédés gazeux sont alimentés en produits chimiques gazeux, et en produits chimiques liquides pour certains process (atelier Diel par exemple).

3.2.1.2 Consommations liées aux infrastructures

Les flux entrants nécessaires au fonctionnement des infrastructures sont recensés dans le tableau 3.4 suivant :

Activité \ Entrants	Eau	Electricité	Gaz naturel	Produits chimiques liquides	Produits chimiques gazeux	Gaz réseau
Fonctionnement des salles blanches	X	X	X	X		X
Réseaux d’eau	X	X		X		X
Distribution d’électricité		X				
Stockage et distribution des produits chimiques liquides et gazeux		X				X
Traitement des effluents gazeux	X	X	X	X		X
Station de traitement des effluents aqueux industriels	X	X		X	X	X
Gestion des déchets		X	X			X

Tableau 3. 4 Entrants des différentes activités des infrastructures.

3.2.1.3 Limites de la méthode

D’autres flux entrants sont nécessaires au fonctionnement du site, et ont une influence sur ses impacts environnementaux, mais nous ne les avons pas inclus dans le périmètre de l’étude. Il s’agit des consommables utilisés par les infrastructures, et des produits chimiques consommés dans les équipements de production pour d’autres tâches que les étapes de procédé.

3.2.2 Identification des flux sortants

La fabrication de circuits intégrés génère des rejets liquides et gazeux, ainsi que des déchets, orientés vers différentes filières de traitement ou d’évacuation.

Chapitre 3 – Modélisation d’une technologie microélectronique

3.2.2.1 Rejets liés aux process des wafers

Les sortants liquides, gazeux, et les déchets issus des étapes de procédé sont répartis par atelier de production dans le tableau 3.5 suivant :

Atelier \ Sortants	Effluents gazeux	Effluents liquides	Déchets Dangereux	Déchets non Dangereux
CMP	X	X	X	X
Traitement Thermique	X	X		X
Photolithographie	X	X	X	X
Métal	X	X	X	X
Diel	X	X	X	X
Etch	X	X		X
Dry Stripping	X		X	X
Wet	X	X	X	X
Implantation Ionique	X		X	X

Tableau 3. 5 Sortants des ateliers de production.

Nous voyons donc que tous les ateliers de production émettent des rejets, sous forme d’effluents gazeux, d’effluents liquides ou de déchets dangereux ou non dangereux en fonction des procédés et des équipements.

3.2.2.2 Rejets des infrastructures

Le fonctionnement des infrastructures implique également des rejets, présentés dans le tableau 3.6 :

Activité \ Sortants	Effluents gazeux	Effluents liquides	Déchets Dangereux	Déchets non Dangereux
Fonctionnement des salles blanches	X	X	X	X
Réseaux d’eau	X	X	X	X
Distribution d’électricité			X	X
Stockage et distribution des produits chimiques liquides et gazeux	X		X	X
Traitement des effluents gazeux	X	X	X	X
Station de traitement des effluents aqueux industriels	X	X	X	X
Gestion des déchets	X		X	X

Tableau 3. 6 Sortants des différentes activités des infrastructures.

Maintenant que nous avons identifié les flux entrants et sortants, nous cherchons à les quantifier. Nous pouvons nous intéresser aux données disponibles concernant les consommations et les rejets liés au fonctionnement d’un site de fabrication de produits microélectroniques.

3.2.3 Identification des données disponibles sur le site

Les consommations et les rejets du site sont suivis, mais les données disponibles ne sont pas de même nature selon les paramètres. Il est important de connaître les informations disponibles afin d’adapter notre étude à la maîtrise qu’ont les employés du site sur les paramètres liés à l’environnement.

3.2.3.1 Consommation de produits chimiques liquides et gazeux

Le détail des consommations de produits chimiques par technologie peut être obtenu à partir des recettes de production, à savoir des tables dans lesquelles sont renseignés tous les paramètres relatifs aux étapes de procédé (température, pression, débit de produit chimique, durée,...). Ces recettes permettent d’obtenir les volumes de produits chimiques liquides et gazeux consommés par les steps, et donc par les technologies. Le lien entre process-flow et recette de production est décrit par la figure 3.4 ci-dessous :

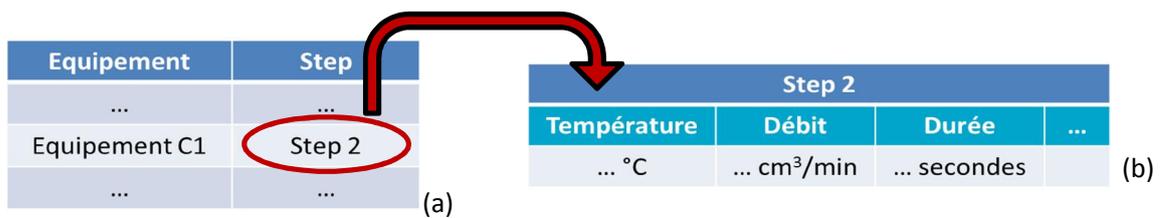


Figure 3. 4 Process-flow (a) et recette de production (b)

Précisons que le détail des recettes de production n’apparaît pas dans la route.

Les consommations du site, ainsi que les quantités de produits chimiques achetés, sont suivies chaque mois de façon globale. Ces données ne sont pas rapportées aux technologies, et concernent toutes les utilisations de produits chimiques sur le site, y compris les consommations liées au fonctionnement des équipements (maintenance, nettoyage...).

Enfin, les quantités de produits chimiques consommés chaque mois par la station de traitement des effluents aqueux industriels rejetés par deux sites sont également connues.

3.2.3.2 Consommation d’eau et d’énergie

Les consommations d’eau et d’énergie sont suivies à l’échelle du site, et pour toutes leurs utilisations. Pour chaque mois, la consommation d’eau de ville est donnée en m³ et la consommation d’électricité en kWh.

Il est cependant possible d’accéder séparément à la consommation d’électricité de la station de traitement des effluents aqueux industriels.

3.2.3.3 Rejets liquides

La station de traitement des effluents aqueux industriels contrôle chaque jour les quantités de liquides rejetées dans le milieu naturel, ainsi que leur composition. La charge (masse par jour) en différents polluants est ainsi connue. Ces données proviennent de la station de traitement des effluents issus des deux sites.

3.2.3.4 Rejets atmosphériques

Les rejets gazeux sont suivis par des mesures trimestrielles : les données correspondent aux concentrations et aux charges massiques des effluents émis en sortie des laveurs de gaz.

3.2.3.5 Déchets

La quantité et la nature des déchets sont suivies chaque mois *via* des documents appelés Bordereaux de Suivi de Déchets.

3.2.3.6 Conclusion

Les données relatives aux paramètres entrants et sortants du site sont de différentes natures. Les consommations de produits chimiques sont suivies globalement et elles peuvent également être connues précisément, pour chaque step des technologies, à partir des recettes de production. En revanche, la consommation d’eau et d’énergie, ainsi que les rejets (liquides, gazeux, déchets), ne sont accessibles directement qu’au niveau des infrastructures. L’exploitation de ces informations ne pourra donc pas se faire de la même façon pour tous les paramètres.

3.3 Modélisation environnementale d’une technologie microélectronique

3.3.1 Modélisation du système de production

Le système de production peut être représenté de la façon suivante (figure 3.5) :

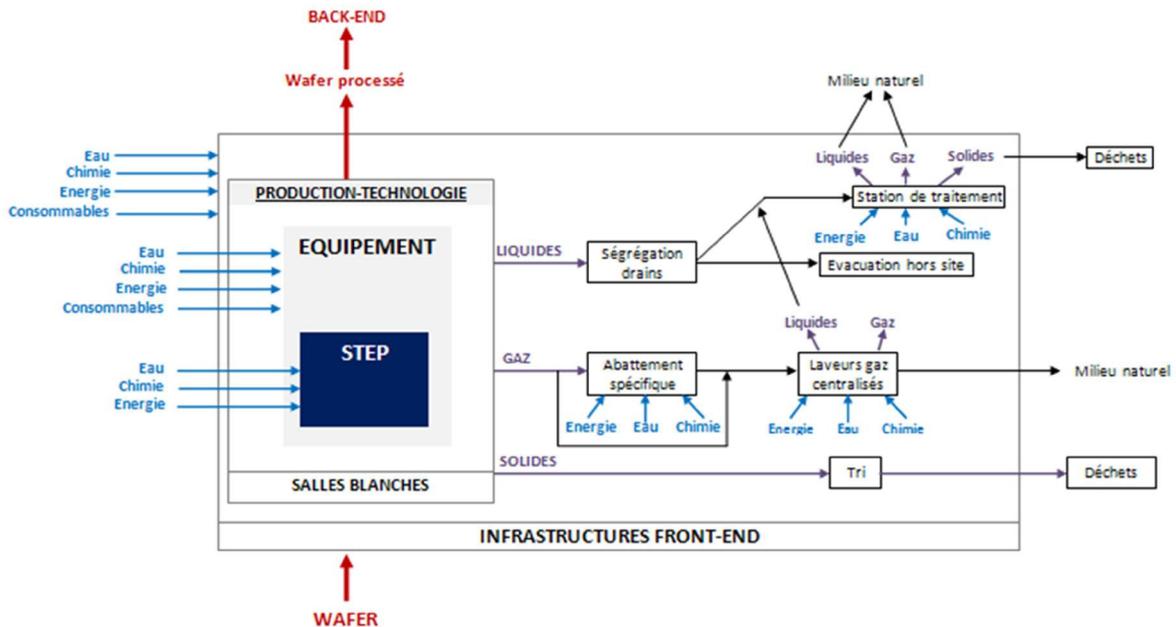


Figure 3. 5 Système de production.

Des wafers de Silicium vierges entrent sur le site, et sont traités en salle blanche. Une technologie consiste en l'enchaînement d'étapes de procédé (« steps ») réalisées grâce à des équipements de production situés en salle blanche. La réalisation des steps, ainsi que le fonctionnement des équipements et des infrastructures nécessitent des entrants et des sortants de différentes natures. Sur cette figure, bien que les flux entrants nécessaires à la réalisation des steps passent par les équipements, les flux entrants dans le step sont distingués des flux entrants dans l'équipement afin de différencier les entrants directement liés à la réalisation des étapes de procédé des entrants assurant le fonctionnement des équipements de production. Précisons que sur cette figure, les produits chimiques liquides et gazeux sont regroupés sous le terme « Chimie ». Les sortants sont ensuite triés : certains sont traités sur le site avant rejet vers le milieu naturel, pour les autres, ils sont évacués du site vers des filières de traitement spécialisées.

Un wafer traité, c'est-à-dire contenant des circuits intégrés, est alors dirigé vers des sites de Back-End pour les dernières étapes de fabrication des puces (tests électriques, découpage et encapsulation).

3.3.1.1 Frontières de l’étude

Nous nous intéresserons dans l’étude au process des wafers de 300 mm de diamètre sur le site de Crolles 300 (que nous appellerons simplement « Site » dans la suite de ce document). Nous chercherons à quantifier les flux entrants et sortants des étapes de procédé réalisées dans les neuf ateliers de production présentés dans le paragraphe 1.5.2.2. Les ateliers de contrôle de la défektivité (défauts) et de métrologie (contrôle de l’épaisseur) ne seront pas pris en compte dans l’étude.

Par ailleurs, les consommables utilisés ainsi que les déchets produits ne sont pas étudiés, principalement parce qu’il est très difficile d’attribuer précisément ces paramètres à une technologie microélectronique.

Nous pouvons donc finalement représenter le système de production de la façon suivante (figure 3.6) :

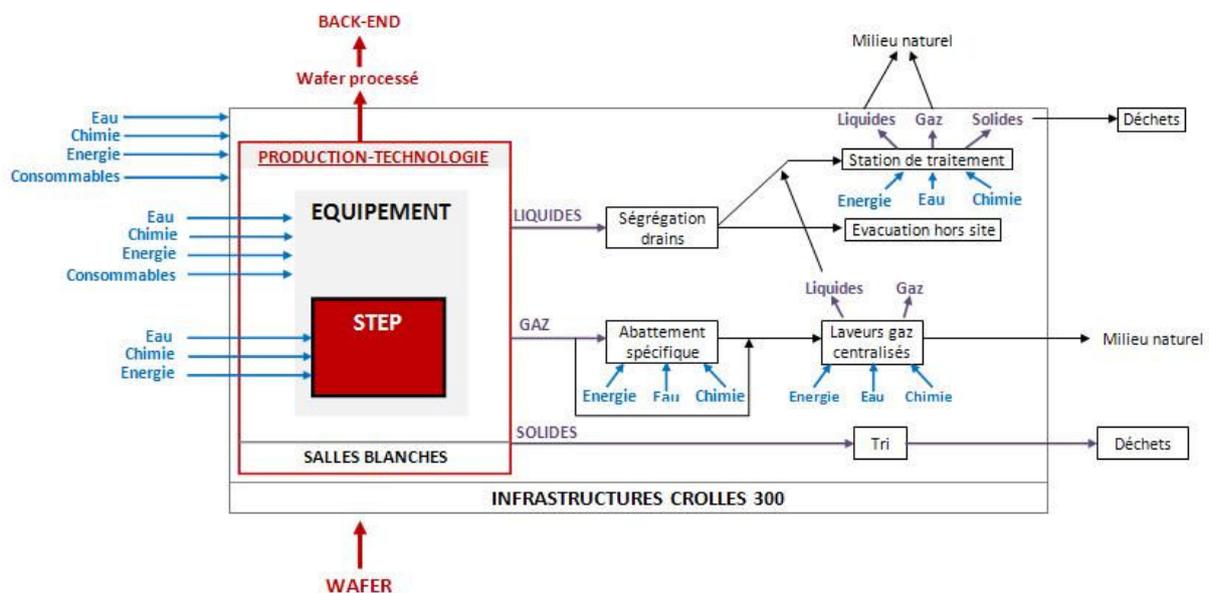


Figure 3. 6 Frontières de l’étude sur le système de production.

Nous nous intéressons en premier lieu aux flux directement liés aux étapes de procédé nécessaires à la réalisation de produits microélectroniques par les technologies. Il s’agit de la case « STEP » de la modélisation du système de production. Les données sur la consommation de produits chimiques liquides et gazeux seront directement accessibles au niveau d’une étape de procédé, mais pour les autres paramètres de consommation et de rejets, nous devons trouver une fonction permettant d’attribuer à une technologie microélectronique des flux liés à tout le site.

Nous pouvons maintenant passer à la définition et à la modélisation d’une technologie microélectronique.

3.3.2 Modélisation d’une technologie microélectronique

Une technologie microélectronique peut donc être considérée comme une somme d’étapes de procédé, réalisées dans des équipements, et associées à des flux entrants et sortants (figure 3.7). Les flux entrants et sortants représentent toutes les consommations et tous les rejets nécessaires à la fabrication de circuits intégrés sur des wafers du site. Les consommables, tels que les pièces détachées d’équipements, ne sont pas considérés ici et ne seront pas pris en compte dans l’étude. Il y a en effet de nombreux types de consommables, utilisés pour des activités différentes : ils ne sont pas représentatifs d’une technologie. De plus, l’analyse des technologies microélectroniques a pour but d’aider les concepteurs de technologies à tenir compte de l’environnement dès les premières phases de développement, et il est apparu, lors de notre étude de cas, que les consommables ne faisaient pas partie des premiers paramètres sur lesquels les équipes de R&D agissent. Enfin les déchets n’entreront pas non plus dans le cadre de l’étude : comme pour les consommables, il est difficile de répercuter de façon fiable l’impact lié à ces déchets sur les technologies.

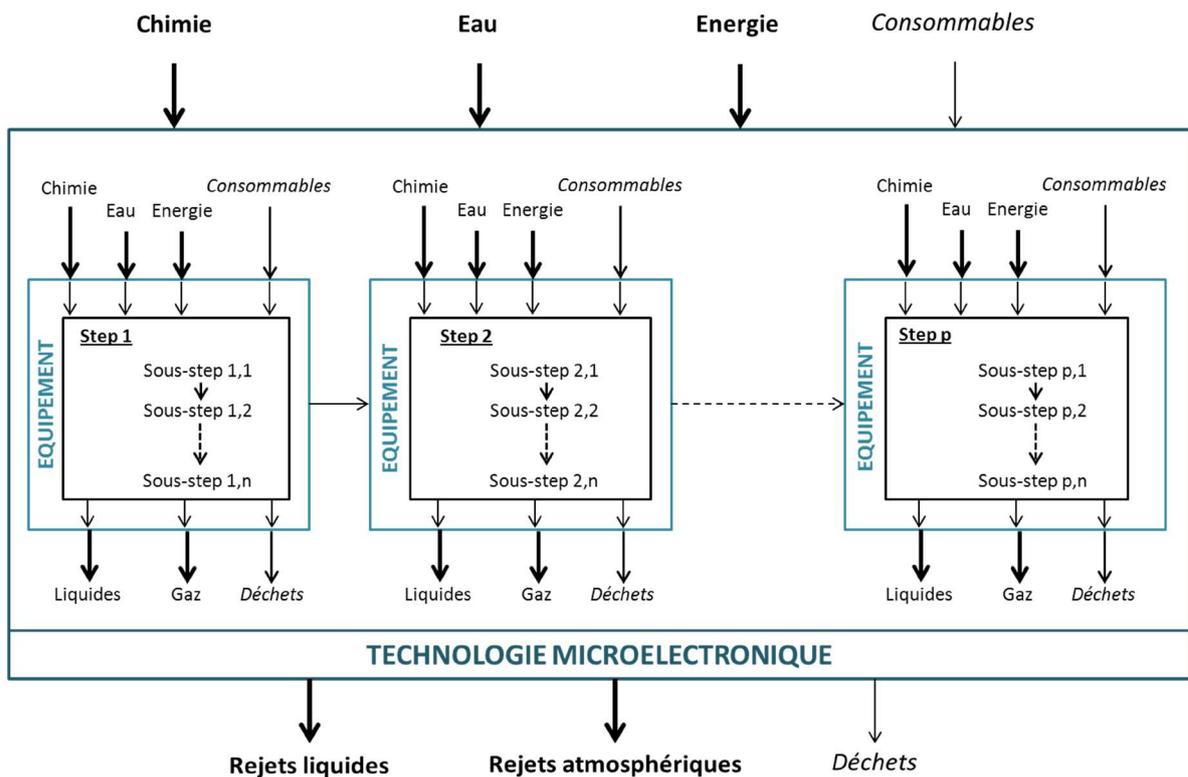


Figure 3. 7 Modélisation d’une technologie microélectronique.

Nous cherchons dans ce travail à quantifier les flux entrants et sortants, afin de connaître les impacts d’une technologie (et donc de chaque étape de procédé qui la compose). Tous les flux ne seront pas caractérisés de la même manière, principalement en raison de différences sur l’origine des données :

Chapitre 3 – Modélisation d'une technologie microélectronique

des règles d'attribution des impacts à chaque étape de procédé sont par exemple proposées pour les paramètres suivis de façon globale sur tout le site.

4. ESTIMATION DES FLUX ENTRANTS ET SORTANTS POUR UNE TECHNOLOGIE MICROELECTRONIQUE : l'exemple de la technologie 45 nm

Nous avons choisi d'analyser la technologie 45 nm pour notre étude de cas. Cette technologie a été développée par les équipes R&D sur le site, puis a été transférée en Production en Janvier 2010. Son développement est donc récent, ce qui nous assure que l'on étudie une technologie relativement proche de celles qui sont développées actuellement. L'autre intérêt d'étudier la technologie 45 nm est lié à la réalisation de ce travail : les équipes de R&D qui ont participé à son développement la maîtrise encore, et les équipes de Support à la Production en ont la charge : nos interlocuteurs peuvent donc être les équipes de R&D et les équipes de Production.

De plus, la montée en volume de la technologie 45 nm se fera tout au long de ce projet : nous aurons finalement des informations sur l'impact environnemental d'une technologie majoritaire sur le site.

Plusieurs produits sont fabriqués à partir d'une même technologie microélectronique. Or les recettes de production, qui sont les seules données disponibles directement liées aux technologies, sont en réalité associées à un produit. Afin d'étudier la technologie 45 nm, nous avons donc dû choisir un produit comme base de notre analyse. Nous avons sélectionné le produit majoritaire de cette technologie, c'est-à-dire celui qui sera fabriqué en plus grandes quantités : il s'agit du produit NovaThor, destiné à être intégré dans des téléphones portables.

Pour ce produit, nous cherchons à déterminer les quantités de produits chimiques liquides et gazeux, d'eau et d'énergie consommées par les étapes de procédé, ainsi que les quantités d'effluents liquides et gazeux rejetés.

L'objectif du chapitre 4 est de déterminer les méthodes d'estimation de chaque entrant et sortant à partir des données industrielles.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

4.1 Nombre d'étapes de procédé de la technologie 45 nm (pour le produit majoritaire)

La route décrivant le produit majoritaire de la technologie 45 nm comporte 356 étapes de procédé dans les neuf ateliers de production que nous étudions, dont 198 étapes différentes. Ces étapes sont réparties dans les ateliers de la façon suivante (tableau 4.1) :

Ateliers	Nombre total d'étapes	Nombre d'étapes différentes
Wet	107	48
Diel	53	31
Photolithographie	50	17
Implantation Ionique	45	34
Etch	27	19
Métal	24	12
Traitement Thermique	20	20
Dry Stripping	20	11
CMP	10	6
TOTAL	356	198

Tableau 4. 1 Répartition des étapes de procédé de la technologie 45 nm dans les ateliers de production.

Le nombre total d'étapes correspond au nombre de steps mentionnés dans la route. Or nous avons vu que certains steps avaient lieu plusieurs fois au cours du process d'un wafer : le nombre d'étapes différentes nous permet de savoir combien nous aurons réellement de steps à analyser.

Nous voyons dans ce tableau que les étapes de procédé ne sont pas réparties également dans les différents ateliers de production. L'atelier comportant le plus grand nombre d'étapes est l'atelier Wet, avec 30 % du nombre total de steps de la route de la technologie 45 nm. Les étapes des ateliers Diel, Photolithographie et Implantation Ionique comptent chacun pour environ 15 % des steps de la technologie 45 nm. Les étapes d'Etch, de Métal, de Traitement Thermique et de Dry Stripping représentent entre 6 et 7 % de la route de la technologie 45 nm. Enfin 10 étapes sont réalisées dans l'atelier CMP, soit 3 % de l'ensemble des steps de cette technologie.

4.2 Méthode d'estimation de la consommation de produits chimiques liquides et gazeux de la technologie 45 nm

Afin d'évaluer les impacts de la technologie 45 nm dus à l'utilisation de produits chimiques, nous nous intéressons uniquement aux consommations directement liées à la réalisation des étapes de procédé dans les équipements de production (les équipements consomment en effet des produits chimiques même quand ils ne sont pas en train de réaliser un step sur un wafer).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Pour évaluer les consommations de produits chimiques liquides et gazeux pendant les étapes de procédé de la technologie 45 nm, nous présentons deux approches basées sur des données de différentes natures :

- Première méthode : à partir des recettes de production
- Seconde méthode : à partir des quantités mensuelles de produits chimiques achetées sur le site

4.2.1 Première méthode : à partir des recettes de production

4.2.1.1 Modèle d'une recette de production

Une recette contenant uniquement les informations nécessaires à la détermination des quantités de produits chimiques liquides et gazeux consommés pendant le process des wafers est présentée dans le tableau 4.2 ci-dessous :

Atelier	Process	Sous-step	Produit chimique	Débit (cm ³ /min)	Temps (s)
CMP	CMP-Métal	Sous-step 1	Chimie x	20	10
CMP	CMP-Métal	Sous-step i
CMP	CMP-Métal	Sous-step n	Chimie y	50	25

Tableau 4. 2 Modélisation d'une recette pour un step j.

Nous utiliserons les débits et les durées des sous-steps qui figurent dans les recettes de production pour déterminer le volume des produits chimiques consommés pendant les étapes de procédé.

4.2.1.2 Collecte des recettes de production : méthodologie

Les recettes de production décrivent des procédés industriels complexes, et sont donc des données confidentielles, difficiles à obtenir pour une personne extérieure à l'entreprise. Elles sont disponibles sur des logiciels en ligne accessibles, sous réserve d'autorisation, sur le réseau de l'entreprise.

Dans les premiers temps de mon projet, je n'ai pu obtenir les recettes de production qu'en contactant les personnes autorisées à y accéder, et à me les transmettre. Les premiers contacts ont été pris dans les équipes de Production puisque la technologie 45 nm n'était déjà plus en R&D lors de la collecte des données. Cependant, il nous a semblé pertinent de travailler avec les équipes de R&D qui avaient encore une bonne maîtrise de cette technologie récemment développée, et qui sont les destinataires des outils proposés dans ce travail.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

L'organisation des équipes de R&D est la même pour chaque atelier : un Section Manager dirige une équipe. Certains ateliers sont regroupés au sein de la même équipe ; c'est le cas pour le CMP et le Métal, pour l'Etch et le Dry Stripping, et pour le Traitement Thermique et l'Implantation Ionique.

Le premier contact avec le Section Manager R&D de chaque équipe a permis de présenter notre projet, et de définir les données dont nous avons besoin ainsi que le moyen le plus efficace de les collecter.

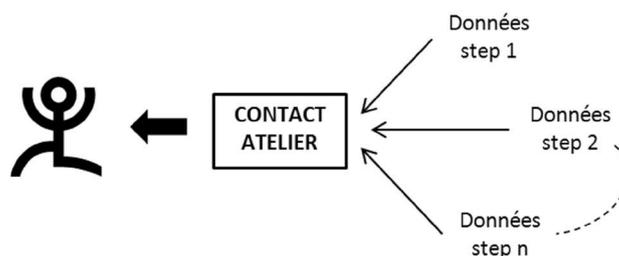


Figure 4. 1 Mode initial de collecte de données.

Notre objectif était que dans chaque équipe, une seule personne collecte toutes les recettes de l'atelier et me les transmette (Figure 4.1).

Le nombre d'interlocuteurs finalement nécessaires à la collecte des recettes de production de chaque atelier est présenté dans le tableau 4.3 suivant :

Atelier	Nombre d'interlocuteurs principaux	Nombre d'interlocuteurs supplémentaires
CMP	4	6
Traitement Thermique	2	2
Photolithographie	1	3
Métal¹	4	2
Diel	1	2
Etch	1	-
Dry Stripping	1	-
Wet	1	2
Implantation Ionique	1	1

Tableau 4. 3 Nombre d'interlocuteurs par atelier nécessaires à la collecte et l'étude des recettes de production.

Les interlocuteurs principaux sont distingués des interlocuteurs supplémentaires, uniquement sollicités ponctuellement pour obtenir une information complémentaire.

¹ Contacts en Production, contrairement à ceux des autres ateliers qui sont en R&D.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Le nombre d'interlocuteurs varie d'un atelier à l'autre : nous pouvons avoir jusqu'à dix interlocuteurs au total pour l'atelier CMP, et seulement un pour les ateliers Etch et Dry Stripping. Cela dépend de l'organisation des différentes équipes de R&D, mais aussi du comportement des Section Managers : certains préfèrent centraliser toutes les données nécessaires pour nous les transmettre, alors que d'autres choisissent de répartir la collecte des informations entre différents membres de leur équipe. De plus, il y a différents procédés au sein de chaque atelier : les étapes y sont alors regroupées par fonction ou par type de procédé, chaque type de steps étant à la charge d'un membre de l'équipe. Il est donc souvent difficile pour une seule personne de collecter toutes les recettes d'un atelier, et de les maîtriser suffisamment pour nous transmettre les informations dont nous avons besoin.

Par ailleurs, dans certains cas, nous avons dû solliciter d'autres personnes en plus de nos contacts de R&D, par exemple des gens du Support de Production.

4.2.1.3 Résultat de la collecte des recettes de production

Il y a autant de recettes de production à collecter que d'étapes différentes dans la route du produit majoritaire de la technologie 45 nm étudiée. La figure 4.2 suivante présente le nombre de recettes de production collectées (en vert) par rapport au nombre d'étapes différentes (appelé « Nombre de steps » sur la figure, en rouge) dans la technologie 45 nm.

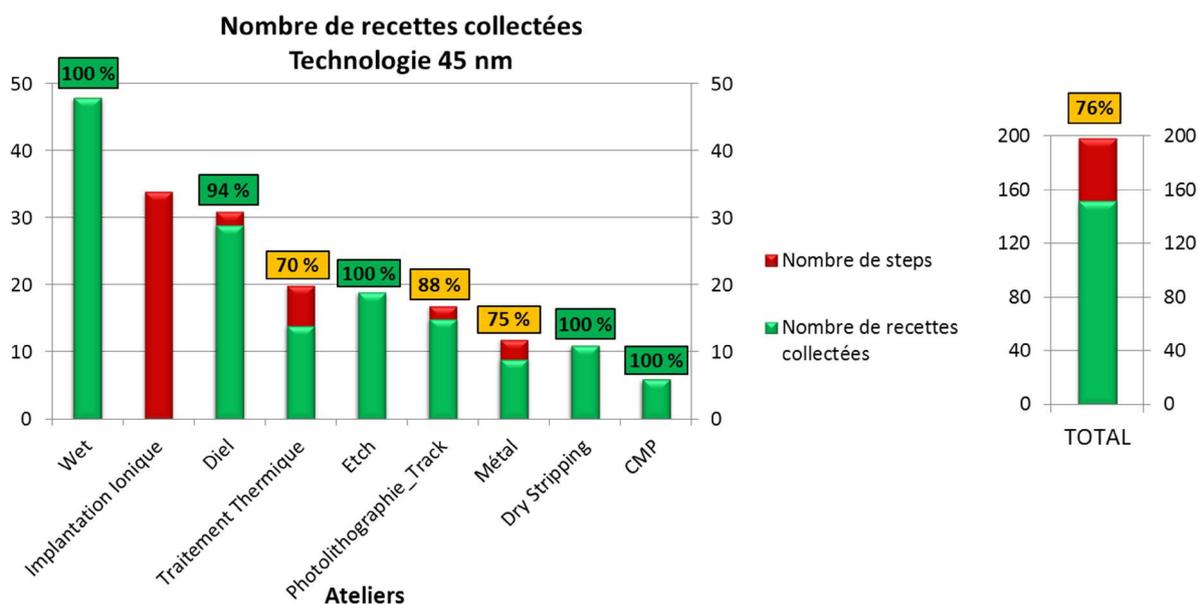


Figure 4. 2 Nombre de recettes collectées par rapport au nombre d'étapes différentes pour les ateliers de production et pour la technologie 45 nm.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Sur cette figure, les pourcentages encadrés correspondent au rapport :

$$\frac{\text{Nombre de recettes collectées}}{\text{Nombre de steps}} \quad (4.1)$$

Le taux de collecte total est de 76 %, et il est supérieur à 90 % pour 6 ateliers sur 9.

Sur la figure 4.2, nous observons d'abord que le nombre d'étapes différentes varie significativement d'un atelier à un autre : de 10 étapes pour le CMP à 48 pour l'atelier Wet. Concernant le taux de collecte, il va de 0 % pour l'atelier Implantation Ionique, à 100 % pour les ateliers Wet, Etch, Dry Stripping et CMP.

Des hypothèses sur les raisons des différents taux de collecte des recettes de production sont formulées dans le tableau 4.4 :

Atelier	Taux de collecte et d'analyse	Nombre de recettes à collecter et analyser	Commentaires
CMP	> 90 %	6	- Bon investissement des contacts - Peu de recettes - Recettes très similaires - Recettes relativement simples à interpréter
Etch	> 90 %	19	- Investissement important du contact - Contact unique : Section Manager - Recettes relativement simples à interpréter
Dry Stripping	> 90 %	11	- Investissement important du contact - Contact unique : Section Manager - Investissement important du contact + Expérience
Wet	> 90 %	48	- Contact principal unique : Section Manager - Plusieurs recettes similaires
Diel	> 90 %	31	- Investissement important du contact - Contact principal unique
Traitement Thermique	Entre 70 et 90 %	20	- Recettes difficiles à exploiter - Recettes différentes
Photolithographie	Entre 70 et 90 %	17	- Recettes peu accessibles - Recettes difficiles à exploiter
Métal	Entre 70 et 90 %	12	- Recettes difficiles à exploiter - Recettes différentes
Implantation Ionique	0 %	34	- Recettes pas accessibles - Fonctionnement de l'équipement

Tableau 4. 4 Principales raisons aux différents taux de collecte et d'analyse des recettes de production.

Les principales raisons pouvant expliquer un taux de collecte très important sont en premier lieu le nombre limité de contacts et leur investissement. La similarité des procédés, et donc des recettes, ainsi

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

que leur relative simplicité, permettent également d'améliorer ce taux (ce fut le cas en CMP : uniquement six étapes différentes, et des procédés très proches).

Concernant les ateliers Etch, Dry Stripping et Wet, les Section Managers ont pu obtenir rapidement toutes les recettes auprès de leurs équipes. La motivation de la hiérarchie dans un tel projet joue un rôle important qu'il ne faut pas négliger. Cela se voit particulièrement en Wet, dans lequel les quarante-huit étapes différentes ont pu être analysées (lorsque les recettes n'étaient pas disponibles, l'expérience du Section Manager a permis d'estimer assez précisément les volumes de produits chimiques consommés). Bien qu'ayant indéniablement un impact sur l'efficacité de la collecte, le nombre d'étapes de procédé n'est donc pas nécessairement une contrainte insurmontable.

Pour l'atelier Diel, malgré un nombre assez important de recettes à étudier, notre unique interlocutrice nous a permis d'atteindre un taux de collecte de 94 %. Cela s'explique notamment par sa sensibilité aux problématiques environnementales. Tous nos interlocuteurs n'ont en effet pas eu les mêmes réactions à notre démarche. En grande majorité, bien que se sentant plus ou moins concernés ou convaincus du rôle qu'ils peuvent jouer sur l'impact environnemental des technologies, ils se sont toutefois beaucoup investis dans ce travail. L'implication des personnes apparaît donc comme une condition nécessaire à la réussite de la collecte et de l'analyse des données.

Comme nous le voyons pour les ateliers Traitement Thermique, Photolithographie et Métal, ce n'est cependant pas une condition suffisante pour assurer un fort taux de collecte. La difficulté pour accéder aux données peut venir du format des recettes, qui ne sont pas compréhensibles ou incomplètes, en raison de spécificité des procédés ou des équipements de production. Certaines recettes peuvent être obtenues directement sur les équipements de production, mais cela implique de faire appel à d'autres équipes peu disponibles.

En Photolithographie, les équipements sont séparés en deux parties : le « Track » (où la résine est étalée sur le wafer) et le scanner (où a lieu l'insolation de la résine). Les produits chimiques sont très majoritairement utilisés dans le « Track », c'est pourquoi nous ne considérons pas les consommations liées au Scanner dans cette étude.

Lorsque les recettes ne sont pas exploitables, des outils de suivi de l'activité des équipements peuvent également être consultés pour remonter aux consommations par step. C'est ce qui a été fait pour l'atelier Photolithographie, mais cela prend beaucoup de temps.

Nous ne disposons enfin d'aucune donnée pour les étapes de l'atelier Implantation Ionique. Les paramètres spécifiques à ces étapes de procédé sont la quantité d'atomes injectés sur le wafer, et l'énergie nécessaire à l'implantation des atomes à la bonne profondeur dans le circuit intégré en cours de fabrication. Les équipements sont réglés pour atteindre les conditions spécifiées, mais on ne suit pas réellement une recette où figurent des débits de produits chimiques gazeux, et des durées de steps. Pour accéder à ces données, il faudrait *a priori* travailler directement sur les équipements de production.

Mais malgré l'implication de plusieurs personnes de cet atelier, nous n'avons pu obtenir ces informations.

4.2.1.4 Exploitation des recettes de production : méthodologie et calculs

L'étude des recettes de production est donc le moyen *a priori* le plus fiable pour connaître les consommations réelles de produits chimiques pendant les étapes de procédé.

Les recettes de production peuvent être écrites sous des formes très différentes, parfois au sein d'un même atelier. Des explications des experts sont nécessaires pour les comprendre et les exploiter correctement.

Afin d'accéder aux volumes de produits chimiques consommés durant le process, les données utilisées dans les recettes de production sont le nom du produit chimique, le débit de chaque produit chimique et la durée de chaque sous-step. Généralement, les débits sont exprimés en cm³/minute et les durées en secondes. Le plus souvent, nous obtenons le volume des produits chimiques utilisés pour une étape de procédé par la relation suivante :

$$(V_a)_j = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{a,i}}{60} \times t_i \quad (4.2)$$

Avec :

- $(V_a)_j$ le volume du produit chimique a utilisé pendant le step j (en cm³/wafer),
- j le step étudié,
- i un sous-step du step j ,
- n le nombre de sous-steps dans le step j ,
- $Q_{a,i}$ le débit du produit chimique a pendant le sous-step i (en cm³/minute),
- t_i la durée du sous-step i (en secondes).

La relation peut être différente en fonction des spécificités des équipements, notamment le nombre de wafers qui y sont processés en même temps : si les débits et temps sont donnés pour 2 wafers (quand 2 wafers sont processés en même temps dans un équipement), on divisera le résultat obtenu par 2 afin d'obtenir un volume par wafer.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Le volume du produit chimique a consommé pendant toutes les étapes de procédé de la technologie étudiée s'obtient finalement à partir de la relation suivante :

$$V_a = \sum_{j=1}^p (V_a)_j \quad (4.3)$$

Avec :

- V_a le volume du produit chimique a consommé pendant tous les steps de la technologie étudiée (en cm^3/wafer),
- p le nombre de steps de la technologie étudiée.

On peut ainsi accéder au volume de produit chimique a consommé pendant tous les steps d'un atelier consommant ce produit chimique par la relation suivante :

$$(V_a)_A = \sum_{j=1}^{p_A} (V_a)_j \quad (4.4)$$

Avec :

- A l'atelier étudié
- $(V_a)_A$ le volume du produit chimique a consommé pendant tous les steps de l'atelier A ,
- p_A le nombre de steps de l'atelier A pour la technologie étudiée.

4.2.1.5 Présentation et analyse des résultats : cas de l'atelier CMP pour toutes les étapes de procédé de la technologie 45 nm

Les consommations de produits chimiques liquides et gazeux pendant les étapes de procédé peuvent être détaillées pour chaque atelier, afin de voir la contribution de chaque step. Nous détaillerons ici le cas de l'atelier CMP (Polissage Mécano-Chimique)

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Il y a deux types de procédé dans l'atelier CMP : le CMP Métal et le CMP Oxyde. Chaque process est composé de deux sous-process, dont les rôles sont présentés dans le tableau 4.5 ci-dessous :

Process	Sous-process	Rôles	Nombre de steps dans la route de la technologie 45 nm
CMP Métal	CMP Cuivre (Cu)	Graver un surplus de métal Polir et planariser une couche de métal	7
	CMP Tungstène (W)		1
CMP Oxyde	CMP STI (Shallow Trench Isolation)	Graver un surplus d'oxyde Polir et planariser une couche d'oxyde	1
	CMP PMD (Pre-Metal Dielectric)		1

Tableau 4. 5 Rôles des différents procédés de l'atelier CMP.

Les produits chimiques liquides caractéristiques des procédés de CMP sont les slurries. Il s'agit de solutions abrasives acides ou basiques contenant des petites billes de silice : l'effet chimique consiste en un ramollissement de la surface du wafer, et l'effet mécanique est obtenu par le frottement des billes sur le wafer.

La figure 4.3 ci-dessous présente les quantités de produits chimiques consommés, avec la contribution de chaque étape de procédé à ces consommations.

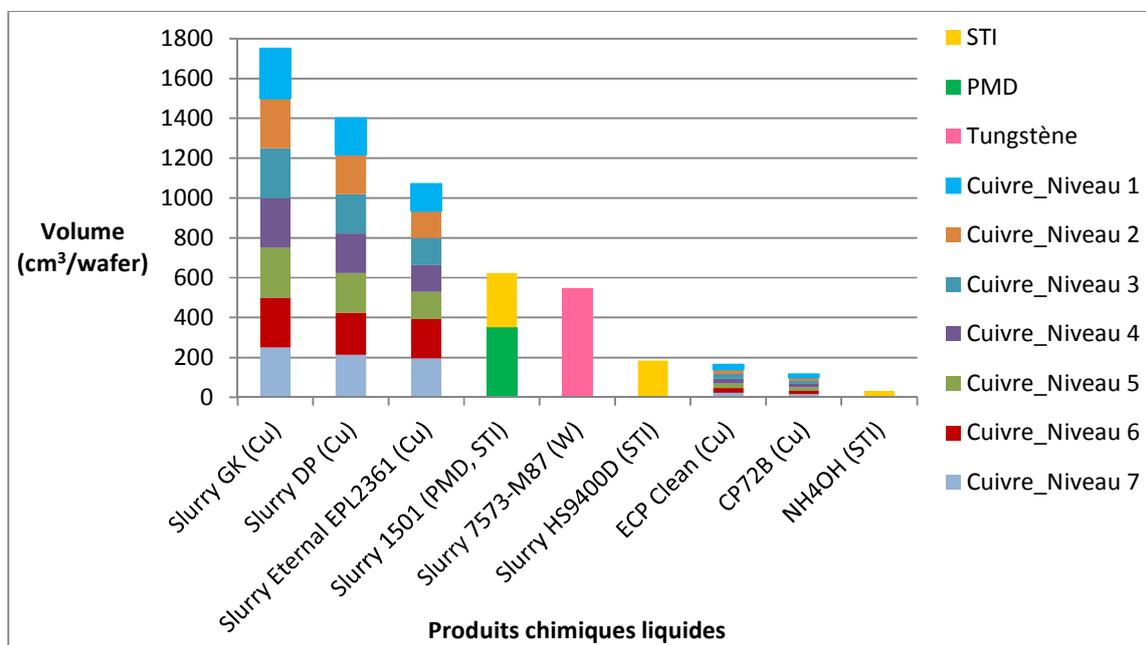


Figure 4. 3 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier CMP en fonction des quantités consommées par toutes les étapes de procédé de la technologie 45 nm.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

En abscisse figurent les produits chimiques liquides consommés en CMP, et en ordonnée les volumes utilisés (en cm³ par wafer) pour le process de la technologie 45 nm. Nous constatons que les trois produits chimiques les plus consommés en CMP pour la technologie étudiée sont des slurries utilisés dans les sept étapes de CMP Cuivre.

Ce graphe permet de connaître les quantités consommées de chaque produit chimique pour chaque atelier de production, et donc d'identifier facilement les produits les plus utilisés, ainsi que les étapes de procédé les plus contributrices à ces consommations. Ces données peuvent être présentées d'une autre manière pour se focaliser sur les steps et les quantités de produits chimiques qu'ils utilisent. C'est ce que montre la figure 4.4 ci-dessous.

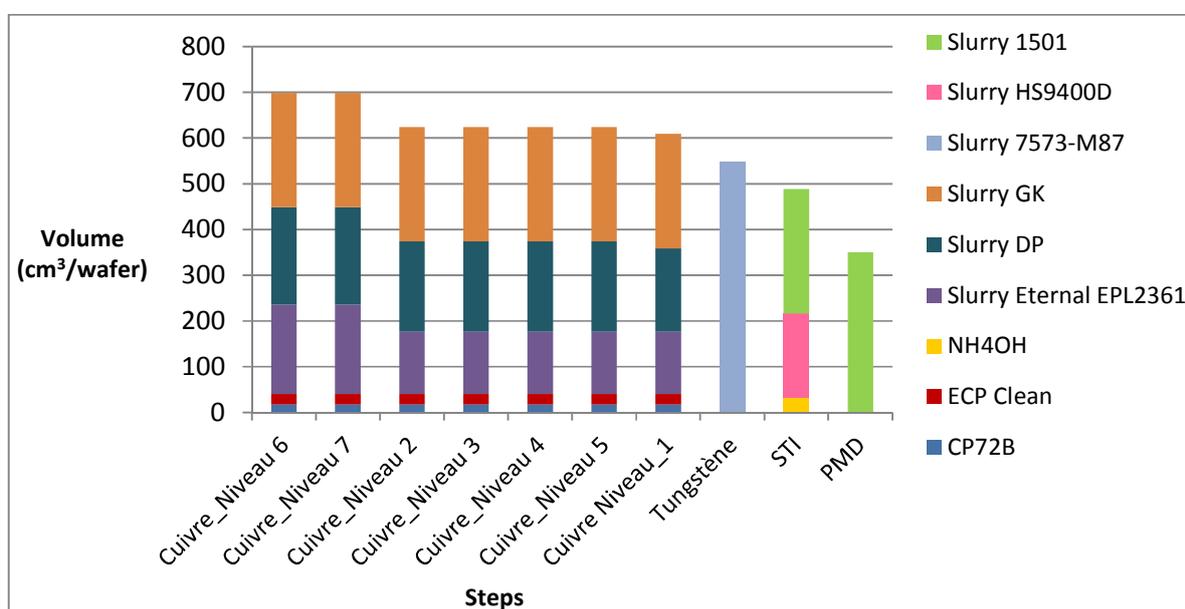


Figure 4. 4 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques liquides dans l'atelier CMP pour la technologie 45 nm.

Sur ce graphe, les steps figurent en abscisse, et les volumes de produits chimiques consommés (en cm³ par wafer) en ordonnée.

Pour chaque étape, on connaît la consommation totale de produits chimiques liquides, mais aussi le détail des différents produits utilisés. Cette vision permet de déterminer rapidement les étapes les plus consommatrices de produits chimiques. De plus, cela permet de comparer les steps entre eux au niveau des consommations de produits chimiques, et ainsi d'orienter d'éventuelles améliorations de procédé sur les steps les plus consommateurs.

C'est également ce graphe qui nous permettra le plus facilement de caractériser chaque étape de procédé nécessaire au process de la technologie 45 nm.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

L'étude des recettes de production nous permet donc de quantifier les flux correspondant à des consommations de produits chimiques liquides et gazeux pour chaque step figurant dans la route du produit 8500 de la technologie 45 nm. Seules les étapes pour lesquelles nous n'avons pas pu accéder aux recettes de production ne seront pas associées à des flux de produits chimiques.

4.2.2 Seconde méthode : à partir des quantités mensuelles de produits chimiques achetées

Nous avons montré que quantifier les volumes de produits chimiques consommés pour le process des wafers à partir des recettes de production prend beaucoup de temps (beaucoup de contacts, analyse des données compliquée par la multiplicité de formats des recettes). Nous avons donc essayé d'obtenir ces consommations par une autre approche : nous avons exploité les informations sur les quantités de produits chimiques achetées par chaque atelier sur une période. Cette méthode constitue une approche « top-down » : les données sont au niveau des ateliers de production, et nous cherchons à les ramener à un wafer de la technologie 45 nm.

4.2.2.1 Description des données utilisées

Dans cette approche, la source d'information est la quantité de chaque produit chimique acheté par atelier de production. Il s'agit de données plus générales que les recettes de production puisqu'elles concernent les ateliers entiers, toutes technologies confondues.

Les quantités achetées sont disponibles mensuellement pour la plupart des produits chimiques, mais les informations peuvent être plus espacées (pour plusieurs mois) pour les produits utilisés en petites quantités.

Les quantités de produits chimiques achetées chaque mois par les ateliers sont regroupées dans un tableau qui a la forme suivante :

Atelier	Produit chimique	Fonction	Codification	Description	Unité	Quantité achetée	
						Septembre 2010	Octobre 2010
<i>Nom de l'atelier</i>	<i>Nom commun</i>	<i>Catégorie</i>	<i>Référence interne</i>	<i>Nom commercial et volume unitaire</i>	<i>En litre, nombre d'unités, kilogrammes,...</i>	<i>Nombre d'unités consommées en septembre 2010</i>	<i>Nombre d'unités consommées en octobre 2010</i>
CMP	Slurry Cu	Slurry	XXXXXXXX	Slurry EPL2361 270gal	GL	xxxx	xxxx

Tableau 4. 6 Forme des données utilisées dans la seconde approche de quantification des consommations de produits chimiques liées au process des wafers.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

La deuxième ligne du tableau 4.6 ci-dessus décrit les données, et la troisième ligne est un exemple pour un produit chimique liquide utilisé dans l'atelier CMP. Ainsi, pour chaque atelier de production, nous connaissons l'ensemble des produits chimiques consommés, leur catégorie (par exemple slurry pour l'atelier CMP, résine pour la photolithographie,...), leur codification interne à l'entreprise, leur volume unitaire, et la quantité achetée chaque mois.

Nous supposons que les produits chimiques achetés sont intégralement consommés sur la période observée : nous considérons donc par exemple que la quantité de slurry achetée au mois de Septembre 2010 est entièrement consommée pendant ce mois.

L'approche par les achats de produits chimiques utilise des informations au niveau d'un atelier de production, et ne permet donc pas directement d'aboutir à des résultats spécifiques d'une technologie. De plus, les produits chimiques achetés ne sont pas dédiés uniquement à la réalisation des étapes de procédé, mais sont également utilisées par exemple pour le conditionnement des équipements ou les maintenances effectuées. Nous nous attendons donc à ce que les résultats issus de l'étude des achats de produits chimiques ramenés à un wafer soient supérieurs à ceux obtenus par l'étude des recettes.

4.2.2.2 Collecte des données : méthodologie

Le principal intérêt de l'exploitation de ces données est lié au fait que nous avons ciblé une personne pouvant avoir accès à tous les achats de produits chimiques de tous les ateliers de production. Il s'agit du « cost-killer » dont le rôle est de contrôler et de réduire les coûts du site.

L'ensemble des données nécessaires a donc pu être obtenu par un seul interlocuteur. De plus, les tableaux contenant les quantités de produits chimiques achetées étant simples à interpréter, la transmission de ces informations par le cost-killer ne demande que peu de temps.

4.2.2.3 Résultat de la collecte des données

Nous avons pu accéder aux quantités achetées de la majorité des produits chimiques consommés sur le site.

4.2.2.4 Exploitation des données : méthodologie et calculs

Avec cette méthode, nous obtenons le volume total de produit chimique a consommé pendant le mois m par la relation suivante :

$$(V_a)_{m,t} = \sum_{w=1}^W (V_a)_{m,w} \quad (4.5)$$

Où :

- $(V_a)_{m,t}$ est le volume total du produit chimique a consommé dans tous les ateliers de production pendant le mois m , obtenu par la seconde approche,
- $(V_a)_{m,w}$ est le volume du produit chimique a consommé dans l'atelier w pendant le mois m ,
- W le nombre total d'ateliers de production.

4.2.2.5 Présentation et analyse des résultats : cas de l'atelier CMP

Afin de pouvoir comparer les deux méthodes, les résultats provenant des achats du site, initialement en unité de volume par mois, doivent être convertis en unité de volume par wafer (cm^3/wafer). Nous devons donc tenir compte d'un paramètre supplémentaire permettant d'intégrer le nombre de wafers sur lesquels des produits ont été réalisés sur la période observée, Août 2010 dans notre cas, toutes technologies confondues.

$$(V_a)'_{m,t} = \frac{(V_a)_{m,t}}{Out_m} \quad (4.6)$$

Avec :

- $(V_a)'_{m,t}$ correspond au volume par wafer 300 mm du produit chimique a consommé dans tous les ateliers de production, obtenu par les achats, pour le mois m ,
- Out_m représente le nombre de wafers produits pendant le mois m

Les valeurs présentées dans le tableau 4.7 ci-dessous correspondent aux quantités de produits chimiques achetées par l'atelier CMP au mois d'Août 2010, au total et par wafer :

Produit chimique	$(V_a)_{m,t}$ (dm3)	$(V_a)'_{m,t}$ (cm^3/wafer)
Slurry EPL2361 (CMP Cuivre)	28728	2478
Slurry GK (CMP Cuivre)	4370	377
Slurry 30N50 (CMP PMD)	6000	518
Slurry 1501 (CMP STI)	6000	518
ECP Clean (CMP Cuivre)	3135	270
Slurry 1508 35 (CMP Tungstène)	3000	259
Slurry HS9400D (CMP STI)	1852	160
Slurry SSW2000 (CMP Tungstène)	2000	173

Tableau 4. 7 Quantités de produits chimiques achetées au mois d'Août 2010 par l'atelier CMP.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Afin de valider cette approche pour l'estimation de la quantité de produits chimiques consommée par le processus de CMP, ces résultats doivent être comparés à ceux que nous avons obtenus par l'étude des recettes de production, qui sont les volumes théoriques les plus proches de la réalité.

4.2.3 Comparaison des deux méthodes : cas de l'atelier CMP

4.2.3.1 Résultats de l'approche recette pour la consommation de produits chimiques de l'atelier CMP pour le mois d'Août 2010

Les recettes analysées pour comparer les deux approches sont différentes de celles étudiées dans la partie 4.2.1.4 ci-dessus : la route du produit majoritaire 45 nm n'était pas la même en Août 2010, période à laquelle nous avons accédé aux achats de produits chimiques.

Produit chimique	$(V_a)_{Août\ 2010,r}$ (cm ³ /wafer)
Slurry EPL2361 (CMP Cuivre)	528
Slurry GK (CMP Cuivre)	1517
Slurry 30N50 (CMP PMD)	540
Slurry 1501 (CMP STI)	257
ECP Clean (CMP Cuivre)	163
Slurry 1508 35 (CMP Tungstène)	63
Slurry HS9400D (CMP STI)	233
Slurry SSW2000 (CMP Tungstène)	108

Tableau 4. 8 Quantités de produits chimiques consommées au mois d'Août 2010 par les procédés de l'atelier CMP, d'après l'étude des recettes de production de la technologie 45 nm.

Dans le tableau 4.8, $(V_a)_{Août\ 2010,r}$ représente le volume par wafer du produit chimique a utilisé dans l'atelier CMP, obtenu par les recettes de production de la technologie 45 nm effectives au mois d'Août 2010.

4.2.3.2 Comparaison des résultats obtenus par l'approche recette avec ceux issus des achats mensuels de produits chimiques pour l'atelier CMP

Il s'agit donc dans ce paragraphe de mesurer les écarts entre les volumes obtenus par l'étude des achats de produits chimiques par rapport aux résultats provenant de l'analyse des recettes de production. Pour cela, nous allons comparer les volumes de produits chimiques obtenus par les deux méthodes.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Nous pouvons ainsi comparer les volumes de produits chimiques consommés obtenus par les deux méthodes pour le mois d'Août 2010. La figure 4.5 permet de visualiser graphiquement la comparaison entre les tableaux 4.7 et 4.8 présentés ci-dessus :

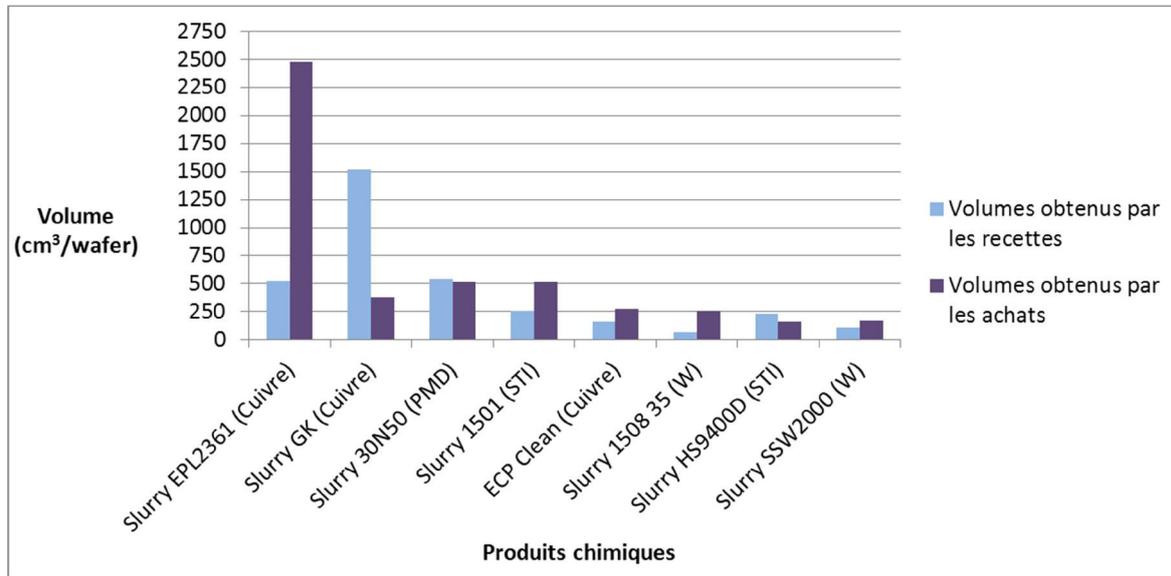


Figure 4. 5 Comparaison des volumes de produits chimiques consommés par l'atelier CMP en Août 2010, obtenus par les recettes de production et par l'approche « top-down ».

Nous pouvons voir que pour certains produits chimiques, les résultats sont très différents d'une méthode à l'autre.

Les écarts entre les résultats obtenus par les deux méthodes peuvent s'exprimer grâce à la relation suivante :

$$E = \left| 1 - \frac{(V_a)'_{m,t}}{(V_a)_A} \right| \quad (4.7)$$

Avec :

- E l'écart entre les volumes obtenus par les deux méthodes,
- $(V_a)_A$ le volume du produit chimique a consommé pendant tous les steps de l'atelier A obtenu par les recettes de production.

Si l'écart est nul, alors les volumes obtenus par les deux méthodes sont les mêmes. Plus la valeur de E est élevée, plus l'écart est important.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les valeurs de E sont présentées dans le tableau 4.9 suivant :

Produit chimique	Ecart
Slurry EPL2361 (CMP Cuivre)	3,7
Slurry GK (CMP Cuivre)	0,8
Slurry 30N50 (CMP PMD)	0,0
Slurry 1501 (CMP STI)	1,0
ECP Clean (CMP Cuivre)	0,7
Slurry 1508 35 (CMP Tungstène)	3,1
Slurry HS9400D (CMP STI)	0,3
Slurry SSW2000 (CMP Tungstène)	0,6

Tableau 4. 9 Ecart entre les volumes de produits chimiques consommés obtenus par les deux méthodes (étude des recettes et approche « top-down »).

Plusieurs raisons peuvent être formulées pour expliquer ces écarts :

- Les volumes de produits chimiques obtenus par l'étude des recettes de production sont uniquement consommés par les étapes de procédé (et parfois quelques étapes de nettoyage), alors que les quantités achetées par les ateliers sont également utilisées pour d'autres tâches : conditionnement, maintenance, etc.

Une liste non exhaustive des emplois de produits chimiques, en-dehors des étapes de procédé, est présentée dans le tableau 4.10 suivant :

Activités	Exemples
Conditionnement des équipements	Mise en conditions d'une chambre de process (inertage, nettoyage, humidification...)
Fonctionnement des équipements	Maintien d'une atmosphère spécifique dans la chambre pendant le process
Nettoyage de l'équipement	Nettoyage d'une chambre de process entre chaque plaque ou chaque lot de plaques traité
Nettoyage des consommables	Nettoyage des pads sur lesquels sont polis les wafers dans l'atelier CMP
Maintenance	Remplacement de pièces dans l'équipement (pads en CMP...) Réglage de l'équipement après détection d'un problème

Tableau 4. 10 Exemples d'utilisations de produits chimiques pour le fonctionnement des équipements, hors steps mais directement liées aux procédés.

L'attribution aux différentes technologies des quantités de produits chimiques consommés pour ces tâches est difficile car :

- Plusieurs technologies sont produites sur chaque équipement,
- Le nettoyage de l'équipement et des consommables, les étapes de maintenance et le conditionnement des équipements ne sont pas des tâches régulières, mais dépendent de la fréquence d'utilisation des équipements ou des procédés qui y sont réalisés : un cycle de

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

reconditionnement d'une chambre de process pourra par exemple avoir lieu si l'équipement est resté inactif pendant une certaine durée.

- Ces résultats sont basés sur l'hypothèse que tous les wafers de toutes les technologies réalisées nécessitent les mêmes quantités de produits chimiques, hypothèse que nous savons inexacte
- Les quantités de produits chimiques achetées par un atelier ne sont pas consommées en totalité : reste de liquide en fond de fût, péremption d'une partie du fût avant son utilisation pour certains produits chimiques consommés en petites quantités

Nous avons présenté ces résultats aux spécialistes des procédés de CMP, qui nous ont donné l'information suivante concernant les étapes de CMP Cuivre : en Août 2010, le slurry GK n'était utilisé que pour les technologies les plus récentes (55 nm, 45 nm, 40 nm et I140), et était remplacé par le slurry EPL2361 pour les process des technologies les plus anciennes (120 nm, 110 nm, 90 nm, 65 nm) pour les sous-steps réalisés sur le plateau 2.

Le tableau 4.11 présente les volumes de slurries EPL2361 et GK obtenus par l'étude des recettes de production suivies par les différentes technologies, ainsi que le nombre de wafers réalisés en Août 2010 :

Produit chimique	Technologies	$(V_a)'_{Août\ 2010,r}$ (cm ³ /wafer)	Nombre de wafers réalisés
Slurry EPL2361	40 nm, 45 nm, 55 nm, I140	528	4033
	65 nm, 90 nm, 110 nm, 120 nm	1701	7559
Slurry GK	40 nm, 45 nm, 55 nm, I140	1517	4033
	65 nm, 90 nm, 110 nm, 120 nm	0	7559

Tableau 4. 11 Volumes des slurries de CMP Cuivre obtenus par les recettes grâce aux modifications apportées par les experts CMP.

Dans ce tableau, $(V_a)'_{Août\ 2010,r}$ représente le volume par wafer du produit chimique a utilisé dans l'atelier CMP, obtenu par les recettes de production de la technologie 45 nm effectives au mois d'Août 2010, après ajustement avec les spécialistes des procédés de CMP.

Nous voyons que le volume de Slurry EPL2361 utilisé pour le procédé de CMP Cuivre d'un wafer des technologies les plus récentes (C040 à C055 nm et I140) est inférieur au volume nécessaire au process d'un wafer des technologies plus anciennes (C065 à C120nm), puisque ces technologies consomment également ce slurry sur le plateau 2, en remplacement du slurry GK par rapport aux technologies plus récentes (C040 à C055 et I140). Par ailleurs, les technologies C065 à C120 nm ne consomment donc pas de slurry GK.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Cette précision nous permet de corriger l'hypothèse que toutes les technologies réalisées suivent les mêmes recettes de production.

Ainsi pour ramener la quantité de slurry GK consommée en Août 2010 à un volume par wafer, il faut remplacer le terme Out_m par le nombre de wafers des technologies les plus récentes produits sur cette période.

Nous pouvons ainsi réduire l'écart entre les résultats obtenus par les deux méthodes pour le slurry GK (figure 4.6) :

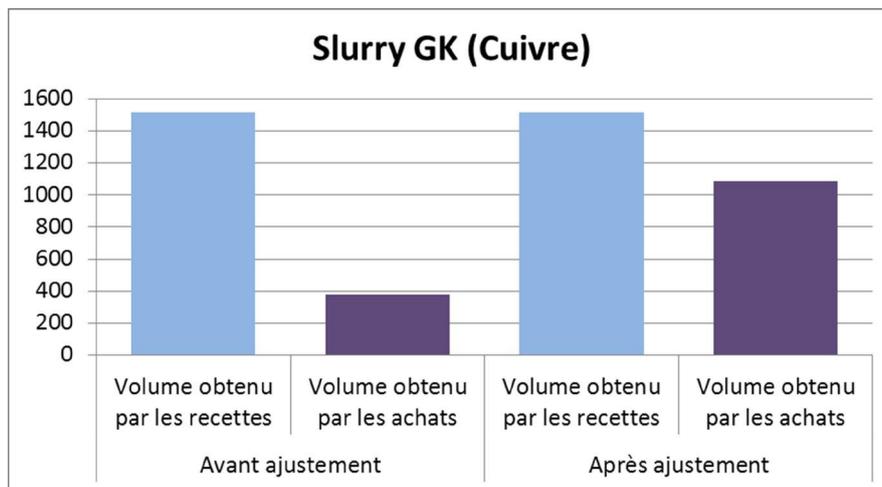


Figure 4. 6 Comparaison des écarts entre les deux méthodes pour le volume de slurry GK consommé par wafer 300 mm.

Pour ce produit chimique, l'écart entre les résultats obtenus par les deux méthodes a donc pu être réduit grâce aux ajustements effectués d'après les informations apportées par les spécialistes des procédés de CMP : l'écart E est passé de 0,8 à 0,4.

Concernant le slurry EPL2361, la consommation moyenne par wafer 300 mm en Août 2010 sera plus importante que celle obtenue par l'analyse des recettes de la technologie 45 nm, puisque pour la majorité des wafers produits sur cette période, le volume d'EPL2361 utilisé est de 1701 cm³ par wafer, alors qu'il n'était que de 528 cm³ par wafer pour le 45 nm.

Pour estimer cette consommation moyenne par wafer 300 mm, nous pouvons effectuer le calcul suivant :

$$(V_{EPL2361})_{moyen\ Août\ 2010,r} = \frac{(528 \times 4033) + (1701 \times 7559)}{11592} \quad (4.8)$$

Soit $(V_{EPL2361})_{moyen\ Août\ 2010,r} = 1293\text{ cm}^3 / \text{wafer}$.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Avec cet ajustement, nous avons réduit l'écart entre les résultats obtenus par les deux méthodes pour le slurry EPL2361 (figure 4.7) :

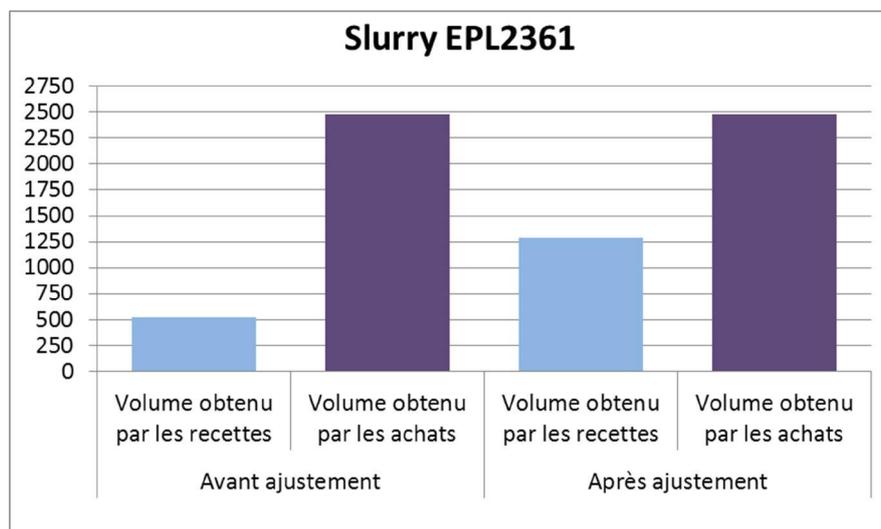


Figure 4. 7 Comparaison des écarts entre les deux méthodes pour le volume de slurry EPL2361 consommé par wafer 300 mm.

Nous pouvons alors comparer les résultats obtenus par l'approche globale avec les résultats provenant des recettes après les ajustements proposés par les experts de l'atelier CMP (figure 4.8).

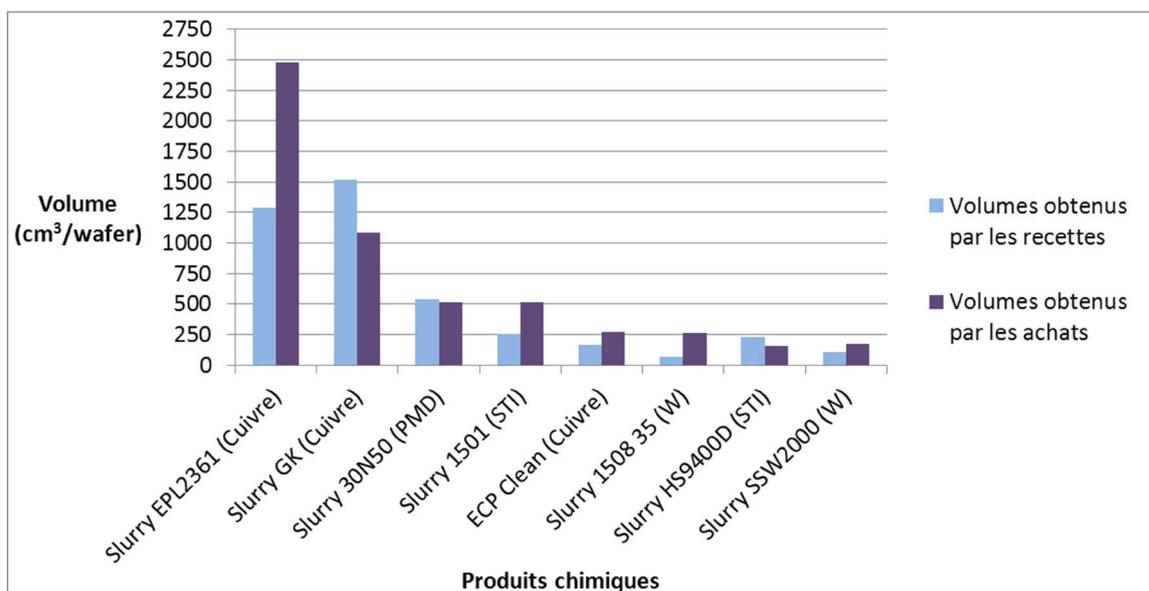


Figure 4. 8 Comparaison des volumes de produits chimiques consommés par l'atelier CMP en Août 2010, obtenus par les recettes de production et par les achats, après discussion avec les experts de l'atelier CMP.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Nous pouvons donc comparer les écarts entre les deux méthodes après les ajustements effectués grâce aux experts des procédés de CMP, aux écarts que nous avons précédemment (tableau 4.12) :

Produit chimique	Ecart avant ajustement	Ecart après ajustement
Slurry EPL2361 (CMP Cuivre)	3,7	0,9
Slurry GK (CMP Cuivre)	0,8	0,3
Slurry 30N50 (CMP PMD)	0,0	0,0
Slurry 1501 (CMP STI)	1,0	1,0
ECP Clean (CMP Cuivre)	0,7	0,7
Slurry 1508 35 (CMP Tungstène)	3,1	3,1
Slurry HS9400D (CMP STI)	0,3	0,3
Slurry SSW2000 (CMP Tungstène)	0,6	0,6

Tableau 4. 12 Ecart entre les volumes de produits chimiques consommés obtenus par les deux méthodes (étude des recettes et approche « top-down »), après discussion avec les experts des procédés de CMP.

Pour les slurries EPL2361 et GK, l'écart entre les volumes obtenus par les deux méthodes a diminué après la correction sur l'hypothèse que toutes les technologies nécessitaient les mêmes volumes de produits chimiques.

Pour le slurry EPL2361, l'écart entre les volumes obtenus par les deux méthodes est passé de 3,7 à 0,9 grâce aux ajustements des spécialistes des procédés de CMP, et l'écart pour le slurry GK est passé de 0,8 à 0,3.

Concernant les autres produits chimiques, toutes les technologies en consommant les mêmes quantités, les écarts n'ont pas été réduits. Ces écarts ne peuvent donc pas être expliqués par une erreur sur l'hypothèse initiale. Selon les spécialistes des process de CMP, lorsque les volumes obtenus par les achats sont supérieurs aux volumes déterminés par l'étude des recettes de production (ce qui est le cas pour les slurries EPL2361, 1501, 1508 35, SSW2000 et pour l'ECP Clean), les écarts peuvent être induits par le fait que les produits chimiques achetés par un atelier sont destinés à d'autres tâches en plus de la réalisation des étapes de procédé (conditionnement, maintenance, etc.). Cependant, les quantités de produits chimiques utilisés pour ces tâches sont difficiles à estimer.

Enfin, concernant les produits chimiques pour lesquels les volumes obtenus par l'étude des recettes sont supérieurs aux volumes obtenus par les achats (slurries GK et HS9400D), nous n'avons pas d'hypothèses à formuler pour expliquer les écarts observés entre les deux méthodes.

4.2.3.3 Conclusion sur la comparaison des deux méthodes

Deux méthodes permettant d'évaluer les quantités de produits chimiques nécessaires à la réalisation des étapes de procédé ont été présentées et comparées à travers l'étude de l'atelier CMP : une méthode « bottom-up » basée sur l'analyse des recettes de production, et une approche « top-down » basée sur les achats de produits chimiques des ateliers.

Les deux méthodes diffèrent en premier lieu sur la nature des données utilisées : l'approche par les recettes est basée sur des données spécifiques d'une technologie qui décrivent les étapes de procédé,

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

alors que l'approche par les achats exploite des informations globales concernant toutes les tâches consommant des produits chimiques, pour toutes les technologies du site.

La collecte des recettes de production demande beaucoup de temps : elles sont très nombreuses, parfois difficiles à interpréter, et pas toujours disponibles (cas de l'atelier Implantation Ionique). C'est pourquoi nous avons testé une approche basée sur les achats, données accessibles par une seule personne et simples à interpréter.

Nous avons cherché la précision des résultats obtenus par l'approche achats en les comparant à ceux issus de l'étude des recettes de production. Pour cela, nous avons eu besoin de l'expertise des spécialistes des procédés, qui nous ont permis d'ajuster nos résultats en corrigeant l'hypothèse d'une égale consommation de toutes les technologies du site (hypothèse sur laquelle repose l'approche achats). Dans le cas de l'atelier CMP, les écarts entre les deux méthodes ont pu être réduits, mais restent toutefois non négligeables pour plusieurs produits chimiques.

Les méthodes et leurs résultats ont été comparés selon plusieurs critères : collecte des données, analyse des données, incertitude sur les résultats. Nous concluons que dans le cas de l'analyse environnementale d'une technologie microélectronique, la méthode retenue est l'étude des recettes de production. En effet, l'approche basée sur les chiffres des achats s'avère finalement assez complexe à mener, en particulier à cause de la phase nécessaire d'ajustement des résultats. De plus, ceux-ci ne sont pas assez précis pour caractériser une technologie microélectronique. Cette méthode, pas satisfaisante dans notre cas, peut cependant être intéressante pour étudier les consommations de produits chimiques du site de production.

4.2.4 Résultats sur les consommations de produits chimiques liquides et gazeux obtenues par les recettes, pour la technologie 45 nm

Nous avons montré que l'étude des recettes de production est la méthode la plus adaptée pour quantifier précisément les quantités de produits chimiques consommés pendant le process des wafers. Nous détaillons dans les paragraphes suivants les résultats obtenus par ce moyen pour les différents ateliers de production, en présentant les volumes de produits chimiques consommés par wafer et les steps contributeurs. Afin d'améliorer la clarté des graphiques, lorsque certains produits chimiques sont consommés en très grande quantité par rapport aux autres produits utilisés dans un atelier, nous présenterons plusieurs figures.

Les graphes sur lesquels figurent les consommations de chaque étape de procédé sont en annexes [\[Annexes A.1\]](#).

Tous les résultats ne sont pas complets, puisque nous n'avons pas pu accéder à toutes les recettes de production : nous rappellerons pour chaque atelier le nombre de recettes manquantes.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Par ailleurs, les données utilisées pour réaliser ce travail datent de 2011, et ont pu évoluer depuis cette période. Ces résultats devront donc être consolidés avec les experts de chaque atelier.

4.2.4.1 Atelier Photolithographie

La route majoritaire de la technologie 45 nm comporte 50 étapes de Photolithographie, dont 17 étapes différentes.

Les recettes manquent pour deux steps, apparaissant chacun deux fois dans la route.

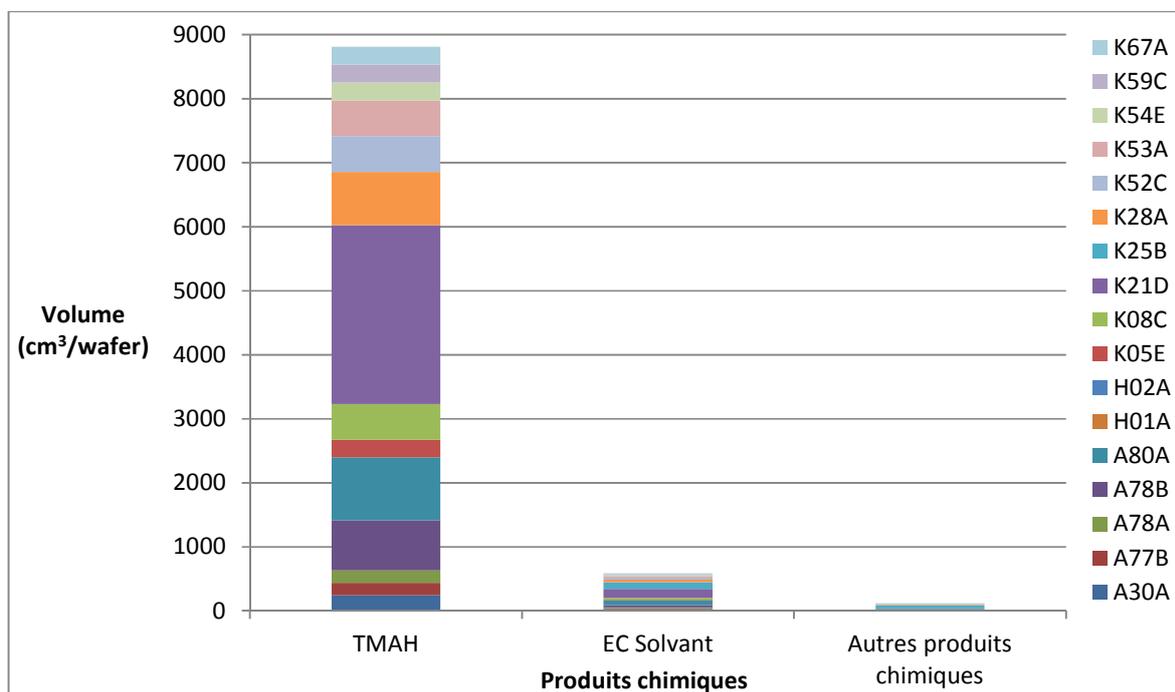


Figure 4.9 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier Photolithographie en fonction des quantités consommées par toutes les étapes de la technologie 45 nm.

Comme nous le voyons sur la figure 4.9, le produit chimique le plus consommé dans les étapes de Photolithographie est le développeur TMAH, utilisé pour enlever la résine insolée. Suivent les solvants et les autres produits, dont le détail est présenté sur la figure 4.10 ci-après.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

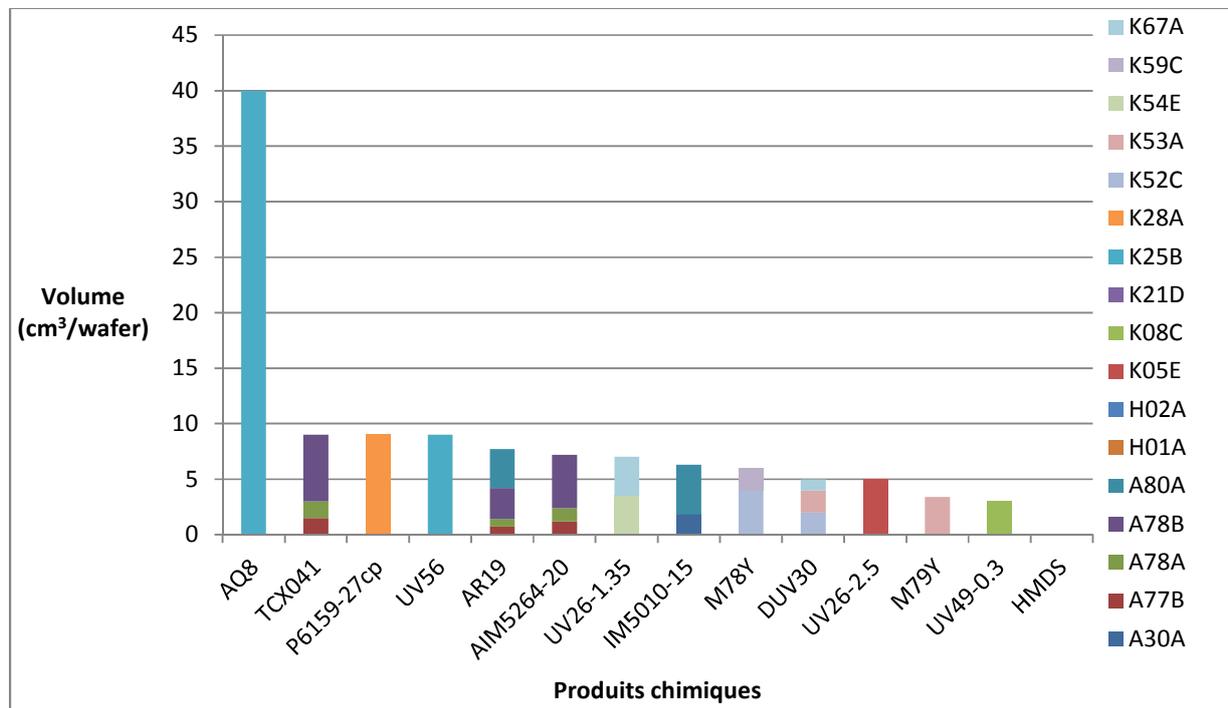


Figure 4. 10 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier Photolithographie en fonction des quantités consommées par toutes les étapes de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.

Entre 3 et 40 cm³ de produits chimiques liquides sont consommés par wafer. En raison de leurs coûts élevés, les volumes de produits chimiques sont suivis précisément par l'atelier Photolithographie.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

4.2.4.2 Atelier Wet

La route majoritaire de la technologie 45 nm comporte 107 étapes de Wet, dont 48 étapes différentes. Tous les steps ont pu être analysés.

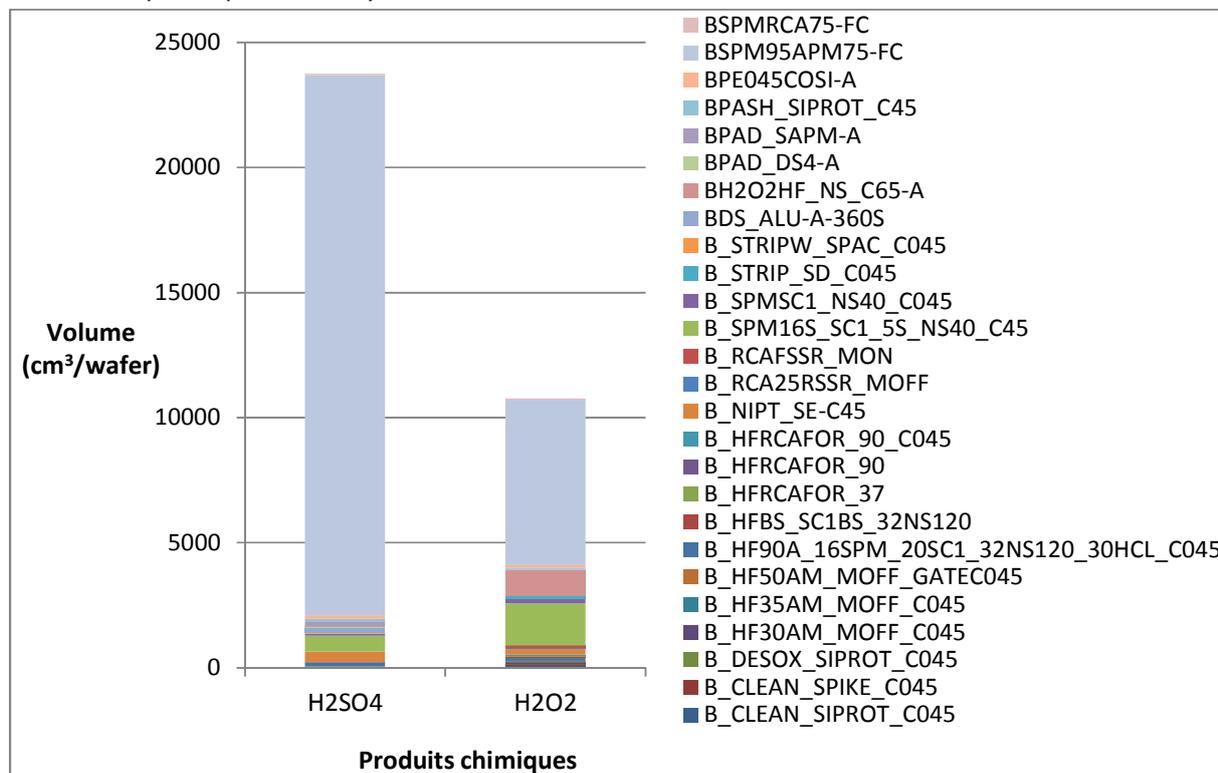


Figure 4. 11 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier Wet, par étape de la technologie 45 nm : détail des deux produits les plus consommés.

Les deux produits chimiques les plus utilisés dans l'atelier Wet sont l'acide sulfurique (H₂SO₄) et le peroxyde d'Hydrogène (H₂O₂) (figure 4.11).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les autres produits chimiques liquides, moins consommés, sont présentés sur la figure 4.12 ci-dessous.

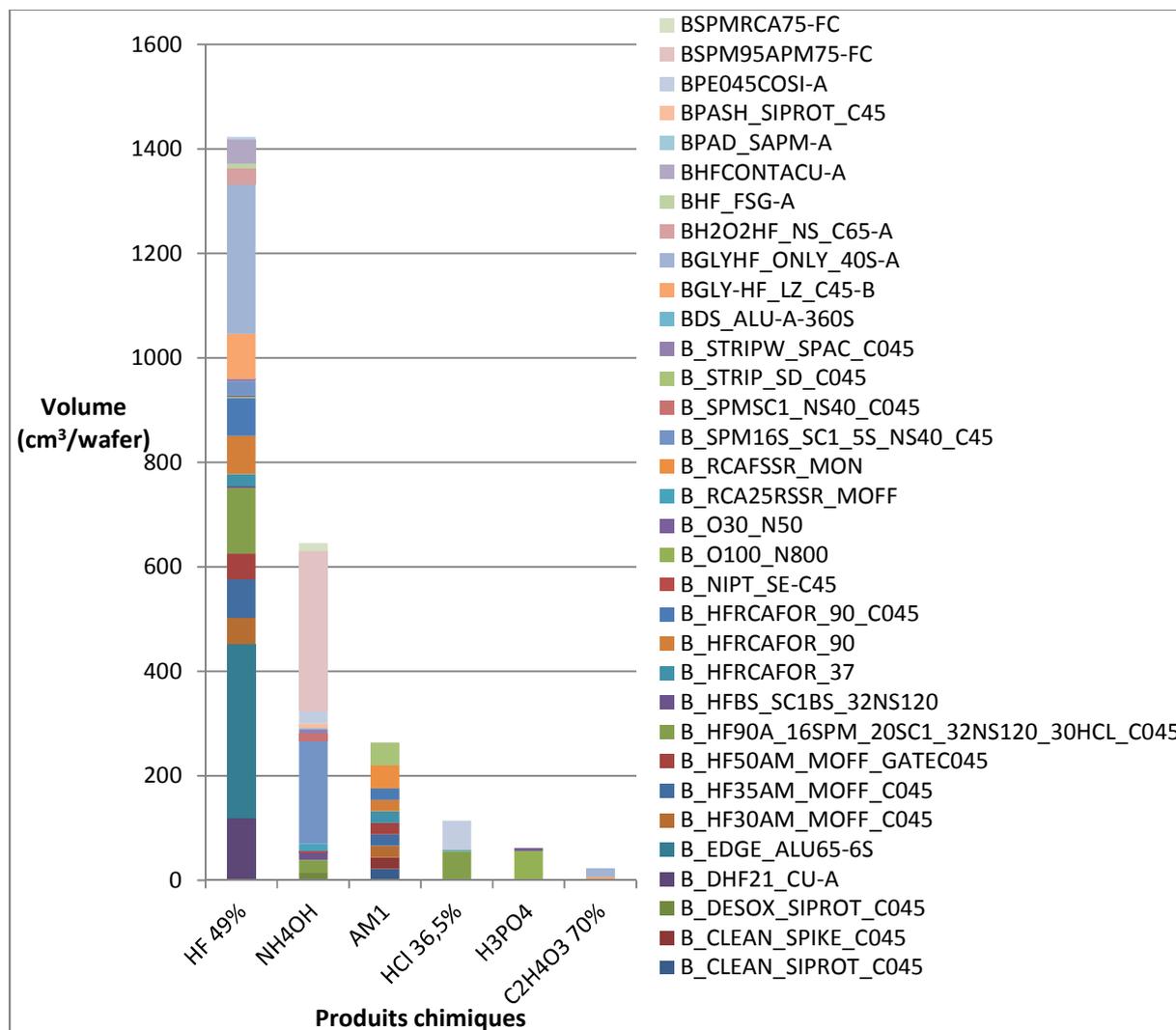


Figure 4. 12 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier Wet, par étape de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.

Les volumes consommés dans cet atelier sont importants (entre 20 et 24000 cm³/wafer). Cela s'explique en partie par le fait que 30 % des étapes de procédés de la route 45 nm sont réalisées en Wet. Tous ces produits chimiques sont traités à la station de traitement des effluents aqueux industriels du site.

4.2.4.3 Atelier Etch

La route majoritaire de la technologie 45 nm comporte 27 étapes d'Etch, dont 19 étapes différentes. Tous les steps ont pu être analysés.

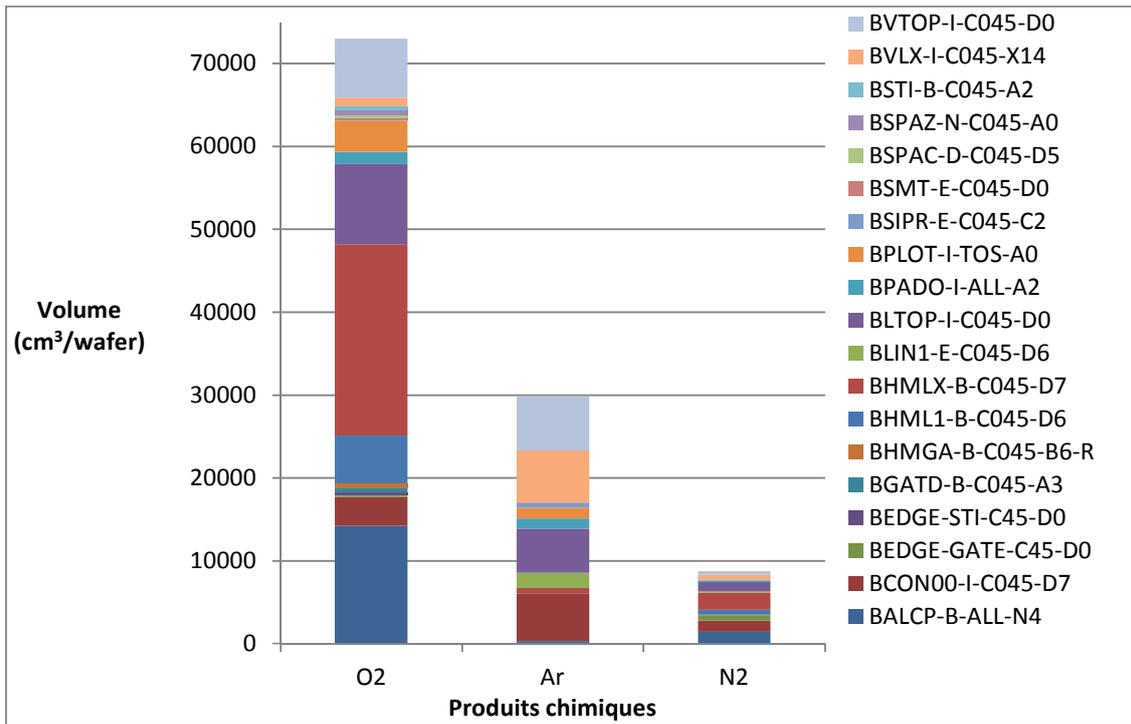


Figure 4. 13 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Etch, par étape de la technologie 45 nm : détail des trois produits les plus consommés.

Les trois produits chimiques les plus utilisés dans l'atelier Etch sont le dioxygène (O₂), l'Argon (Ar) et l'Azote (N₂) (figure 4.13).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les autres produits chimiques gazeux, moins consommés, sont présentés sur la figure 4.14 ci-dessous.

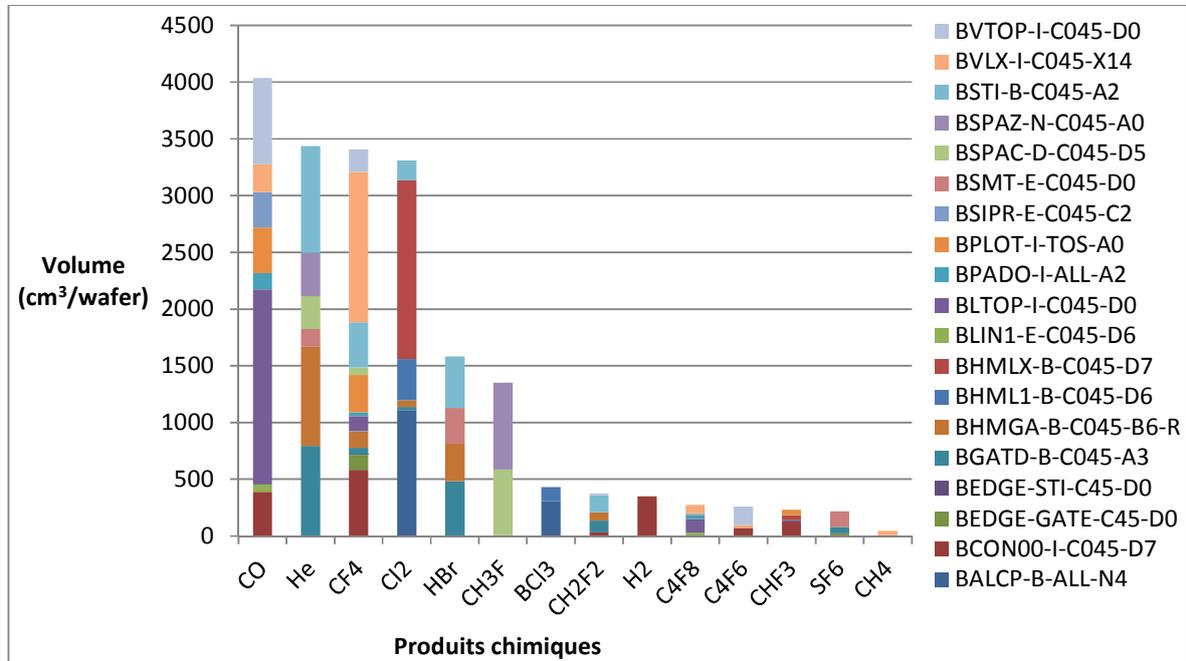


Figure 4. 14 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Etch, par étape de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.

Dans l'atelier Etch, entre et 45 et 73000 cm³ de produits chimiques gazeux sont consommés par wafer. Ces gaz sont traités en aval.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

4.2.4.4 Atelier Dry Stripping

La route majoritaire de la technologie 45 nm comporte 20 étapes de Dry Stripping, dont 11 étapes différentes. Tous les steps ont pu être analysés.

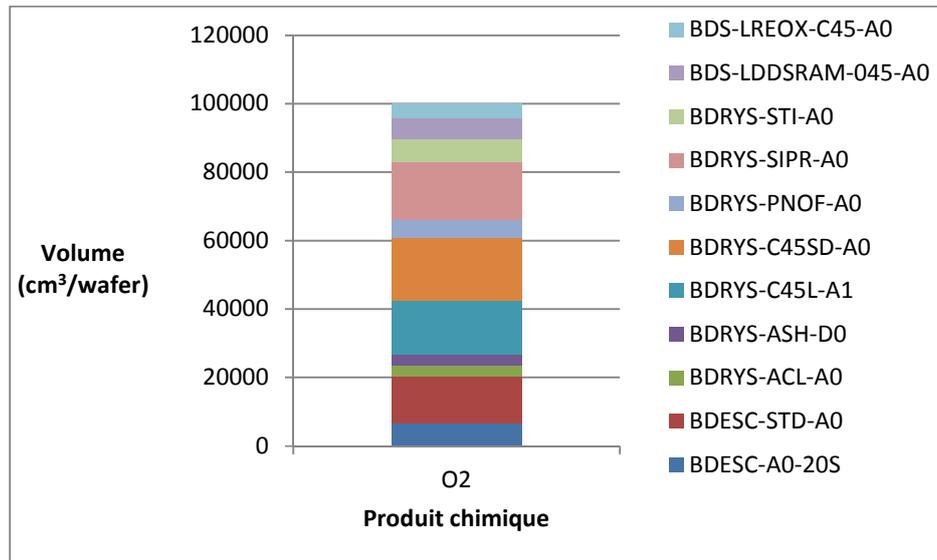


Figure 4. 15 Consommation par étape du produit chimique gazeux le plus utilisé dans l'atelier Dry Stripping, pour la technologie 45 nm.

Le produit chimique le plus utilisé dans l'atelier Dry Stripping est le dioxygène (O₂) (figure 4.15).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les autres produits chimiques gazeux, moins consommés, sont présentés sur les figures 4.16 et 4.17 ci-dessous.

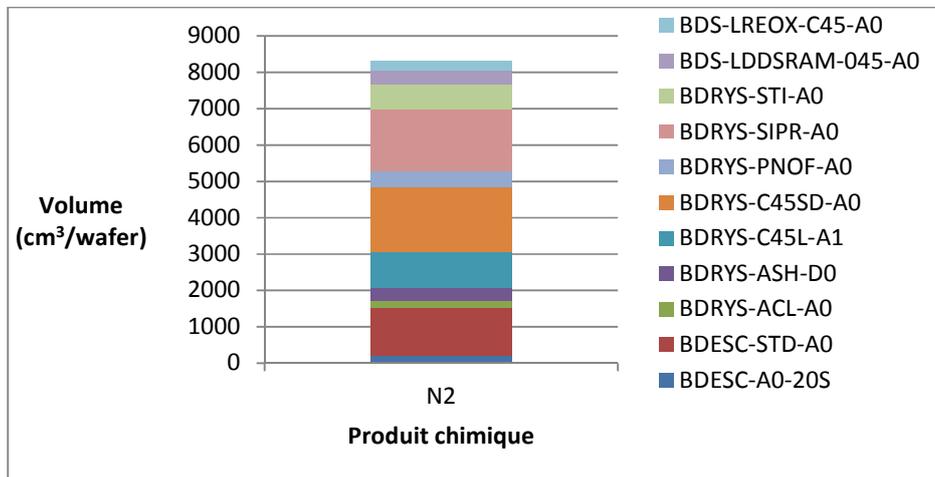


Figure 4. 16 Consommation par étape du second produit chimique gazeux le plus utilisé dans l'atelier Dry Stripping, pour la technologie 45 nm.

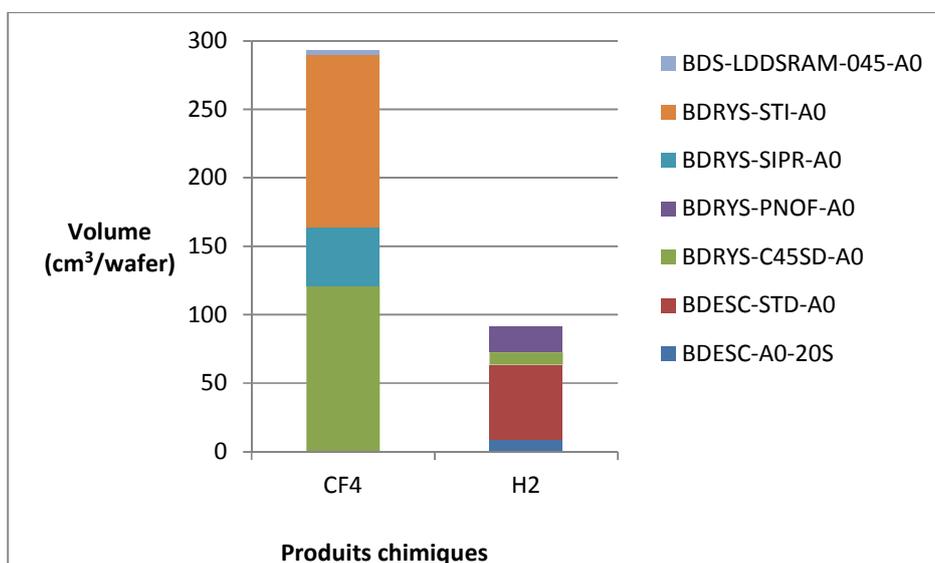


Figure 4. 17 Consommation par étape des autres produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Dry Stripping, pour la technologie 45 nm.

Dans l'atelier Dry Stripping, on consomme entre 90 et 100000 cm³/wafer de produits chimiques gazeux.

4.2.4.5 Atelier Métal

La route majoritaire de la technologie 45 nm comporte 24 étapes de Métal, dont 12 étapes différentes. Les recettes manquent pour trois steps, qui apparaissent respectivement une, deux et cinq fois dans la route.

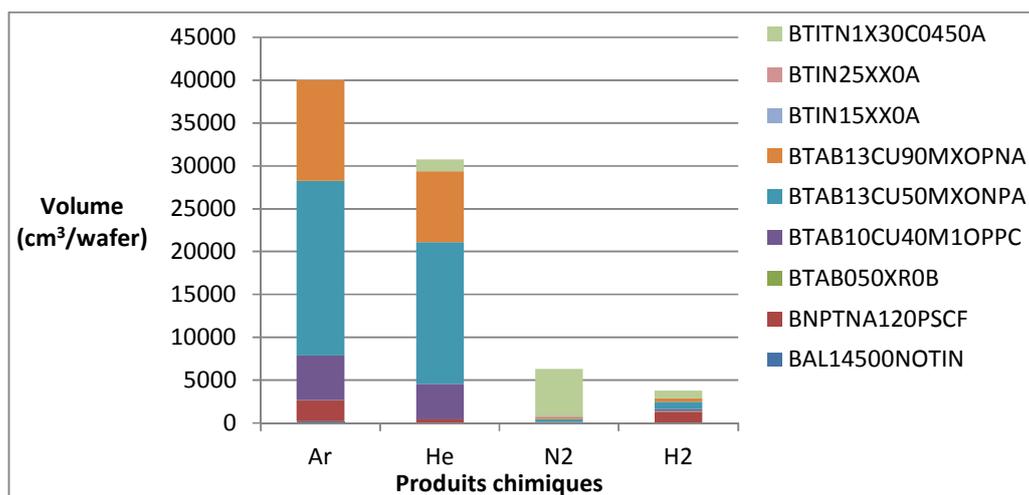


Figure 4. 18 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Métal, par étape de la technologie 45 nm : détail des quatre produits les plus consommés.

Les produits chimiques les plus utilisés dans l'atelier Métal sont l'Argon (Ar), l'Hélium (He), l'Azote (N₂) et le dihydrogène (H₂) (figure 4.18).

Les autres produits chimiques gazeux, moins consommés, sont présentés sur la figure 4.19 ci-dessous.

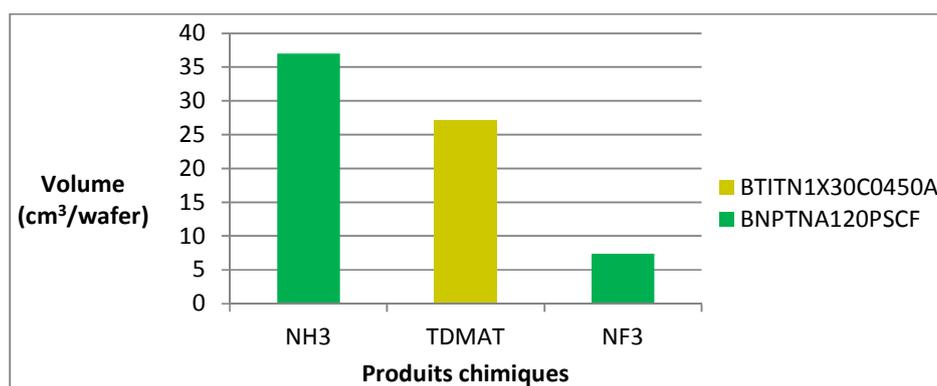


Figure 4. 19 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Métal, par étape de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.

Entre 7 et 40000 cm³ de produits chimiques gazeux sont consommés par wafer en Métal.

4.2.4.6 Atelier Traitement Thermique

La route majoritaire de la technologie 45 nm comporte 20 étapes de Traitement Thermique, toutes différentes.

Les recettes manquent pour six steps.

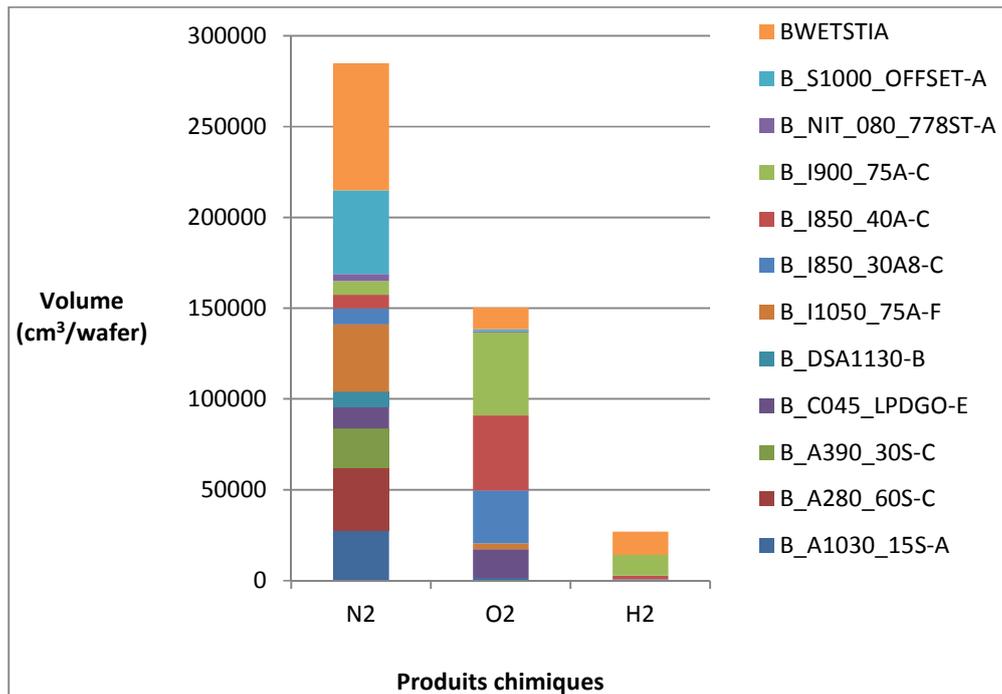


Figure 4. 20 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Traitement Thermique, par étape de la technologie 45 nm : détail des trois produits les plus consommés.

Les produits chimiques les plus utilisés dans l'atelier Métal sont l'Azote (N₂), le dioxygène (O₂) et le dihydrogène (H₂) (figure 4.20).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les autres produits chimiques gazeux, moins consommés, sont présentés sur la figure 4.21 ci-dessous.

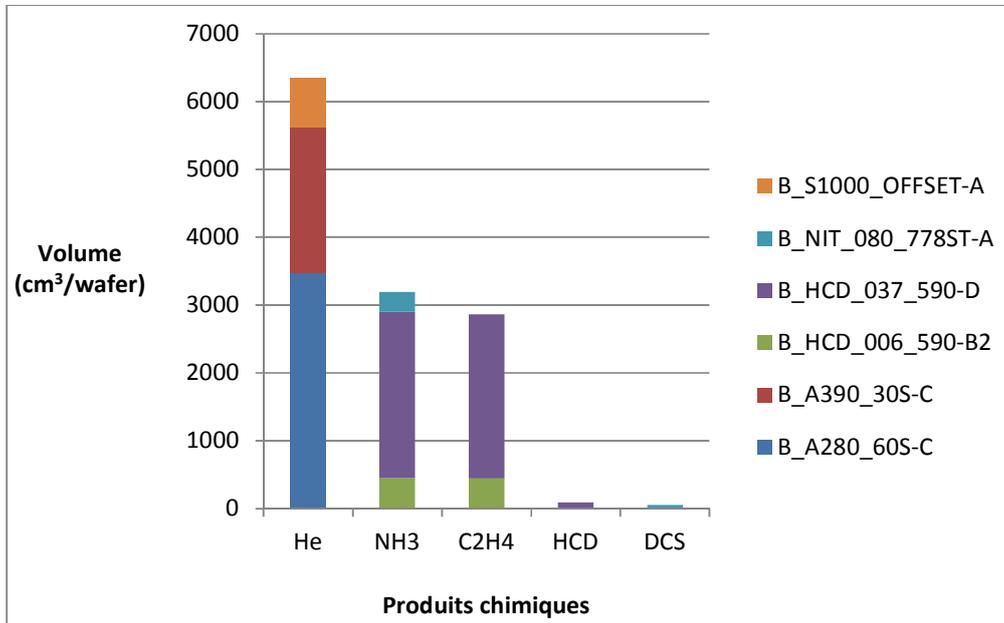


Figure 4. 21 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Traitement Thermique, par step de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.

On consomme entre 50 et 285000 cm³/wafer de produits chimiques gazeux dans l'atelier Traitement Thermique.

4.2.4.7 Atelier Diel

La route majoritaire de la technologie 45 nm comporte 53 étapes de Diel, dont 31 étapes différentes. Les recettes manquent pour deux steps, qui apparaissent deux et trois fois dans la route.

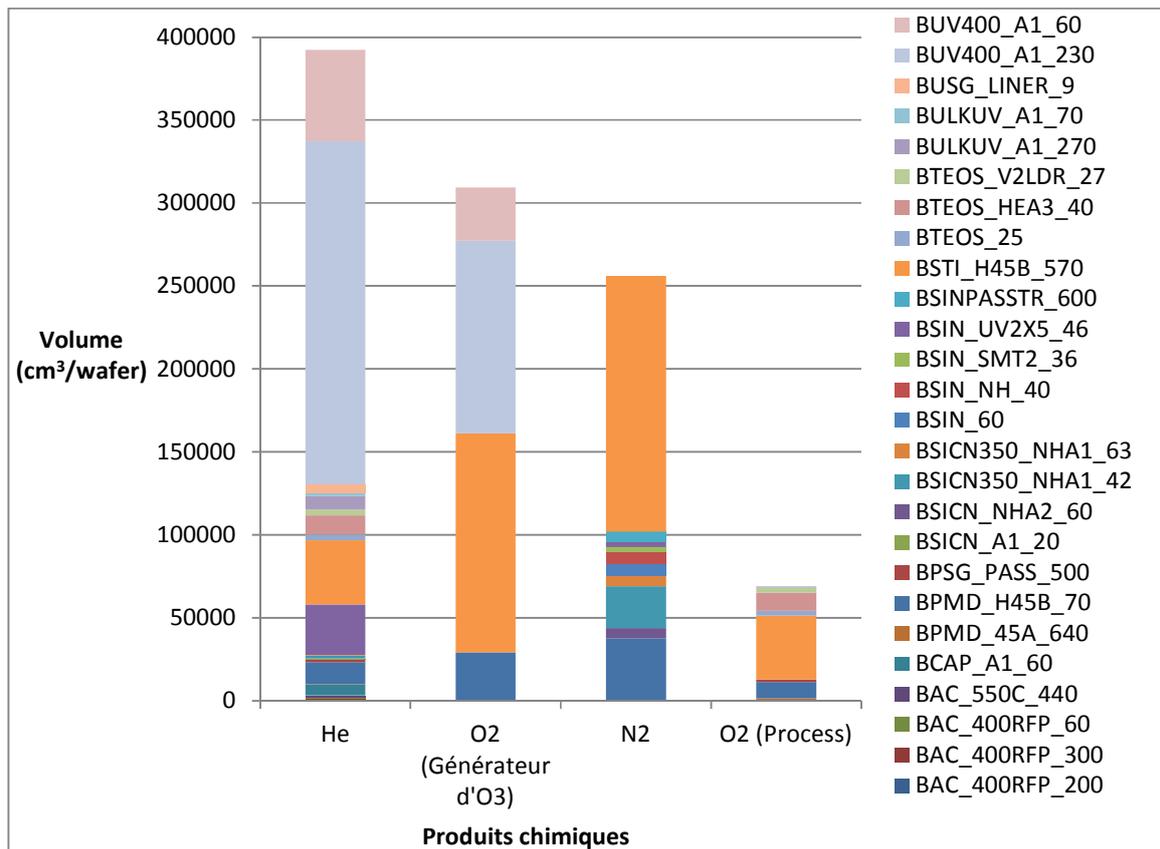


Figure 4. 22 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Diel, par étape de la technologie 45 nm : détail des quatre produits les plus consommés.

Les produits chimiques les plus utilisés dans l'atelier Diel sont l'Hélium (He), le dioxygène consommé pour fabriquer de l'Ozone (O₂ Générateur d'O₃), l'Azote (N₂), et le dioxygène (O₂) (figure 4.22).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les autres produits chimiques gazeux, moins consommés, sont présentés sur la figure 4.23 ci-dessous.

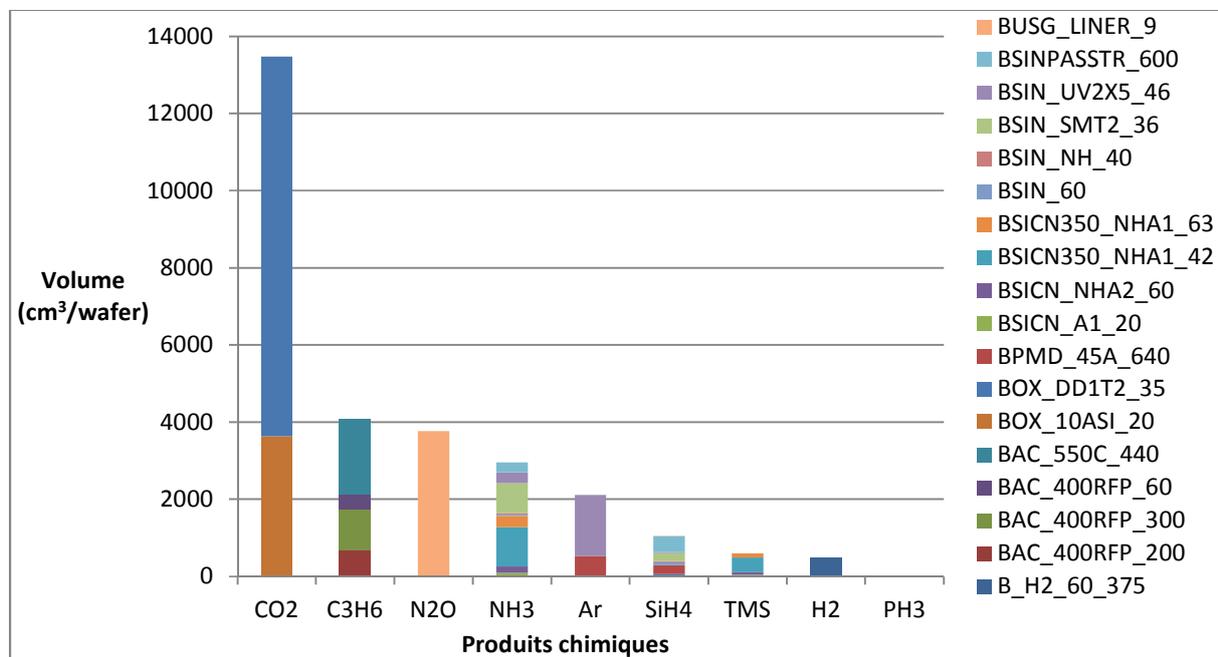


Figure 4. 23 Classement des produits chimiques gazeux utilisés dans l'atelier Die1, par step de la technologie 45 nm : détail des produits les moins consommés.

En Die1, on consomme entre 1,7 et 390000 cm³ de produits chimiques par wafer.

Les consommations de produits chimiques liquides, peu utilisés (entre 0,05 et 23 cm³/wafer), sont présentées sur la figure 4.24.

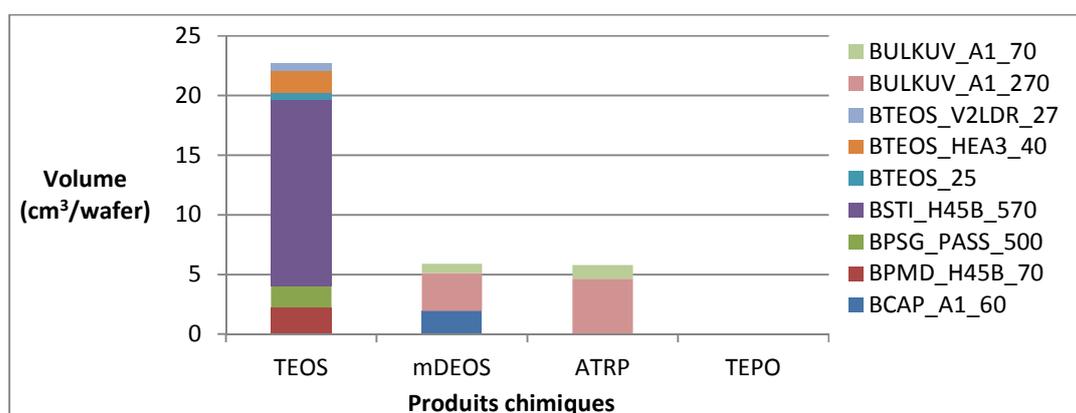


Figure 4. 24 Classement des produits chimiques liquides utilisés dans l'atelier Die1, par étape de la technologie 45 nm.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

4.2.4.8 Bilan pour tous les ateliers de production pour la technologie 45 nm

Consommations de produits chimiques liquides

Les consommations de produits chimiques liquides durant le process d'un wafer représentatif de la technologie 45 nm sont présentées dans le tableau 4.13 ci-dessous :

Produit Chimique liquide	Volume consommé (cm ³ /wafer)	Ateliers
H ₂ SO ₄ 96%	23856	Wet
H ₂ O ₂ 31%	10768	Wet
TMAH	8813	Photolithographie
Slurry GK	1750	CMP
HF 49%	1423	Wet
Slurry DP	1401	CMP
Slurry Eternal EPL2361	1072	CMP
NH ₄ OH 29%	686	CMP, Wet
Slurry 1501	623	CMP
EC Solvant	584	Photolithographie
Slurry 7573-M87	548	CMP
AM1	264	Wet
Slurry HS9400D	183	CMP
ECP Clean	163	CMP
CP72B	116	CMP
HCl 36,5%	114	Wet
H ₃ PO ₄ 80%	62	Wet
AQ8	40	Photolithographie
TEOS	23	Diel
Acide Glycolique 70%	23	Wet
P6159-27cp	9	Photolithographie
UV56	9	Photolithographie
TCX041	9	Photolithographie
AR19	8	Photolithographie
AIM5264-20	7	Photolithographie
UV26-1.35	7	Photolithographie
IM5010-15	6	Photolithographie
M78Y	6	Photolithographie
ATRP	6	Diel
mDEOS	6	Diel
UV26-2.5	5	Photolithographie
DUV30	5	Photolithographie
UV49-0.3	3	Photolithographie
M79Y	3	Photolithographie
TEPO	0.1	Diel

Tableau 4. 13 Consommations de produits chimiques liquides, par wafer, par les étapes de procédé du produit majoritaire de la technologie 45 nm.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les figures 4.25 et 4.26 montrent les quantités de produits chimiques liquides consommés pour le process des wafers de la technologie 45 nm. Afin de simplifier la lecture de ces graphes, nous n'avons présenté que les quinze produits chimiques liquides dont la consommation était la plus importante (il y en a trente-cinq au total) : les trois produits chimiques liquides les plus utilisés apparaissent sur la figure 4.25 et les douze suivants sur la figure 4.26.

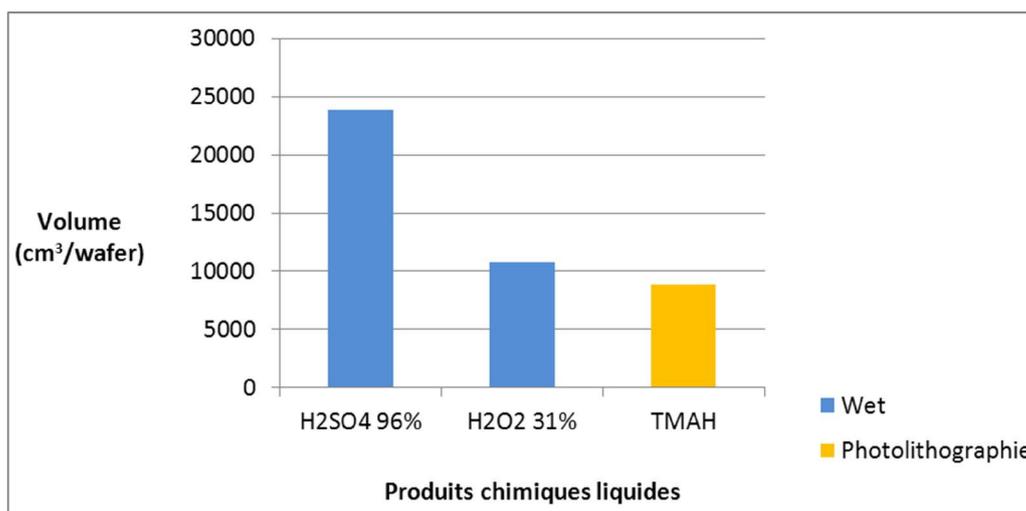


Figure 4. 25 Volumes consommés des trois produits chimiques liquides les plus utilisés pour le process des wafers 45 nm.

Les trois produits chimiques liquides les plus consommés sont l'acide sulfurique (H_2SO_4) et le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), qui sont des acides utilisés dans l'atelier Wet, et le TMAH (Tetramethylammonium hydroxide), développeur consommé en Photolithographie. Les acides de Wet sont employés pour les étapes de nettoyage après le retrait de la résine (donc après chaque étape de photolithographie) et parfois pour de la préparation de surface. Cela explique les quantités importantes mises en jeu.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

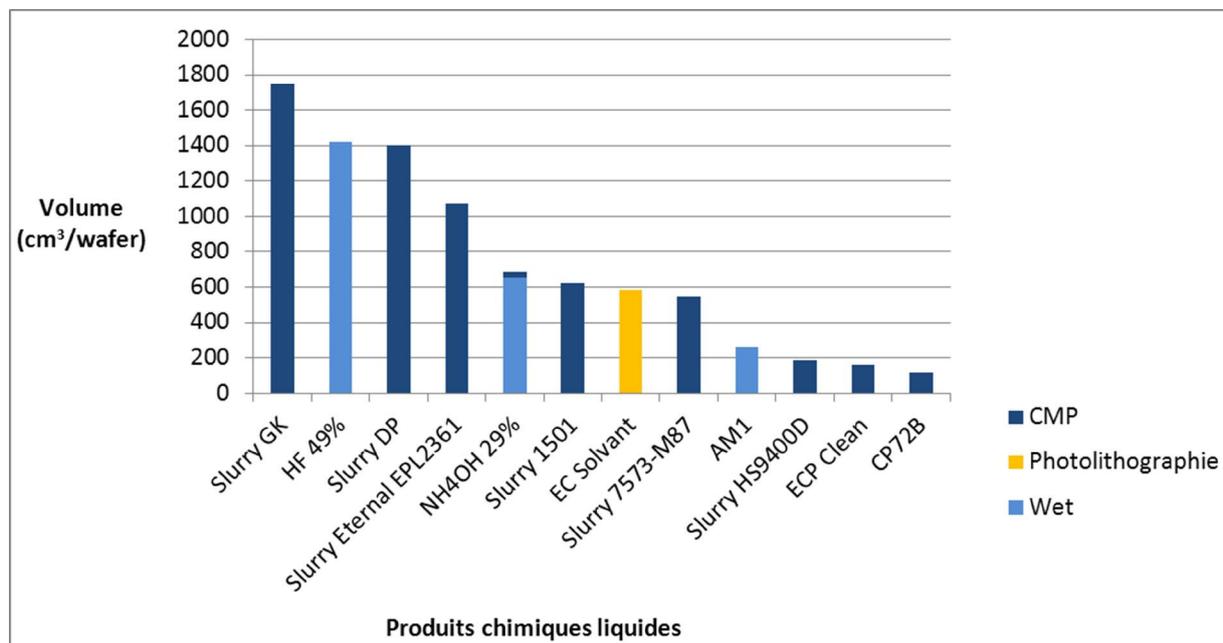


Figure 4. 26 Volumes consommés des produits chimiques liquides les plus utilisés pour le process des wafers 45 nm (produit 8500).

Les trois ateliers Wet, Photolithographie et CMP sont les seuls ateliers qui consomment des produits chimiques liquides pendant le process (sans compter des volumes extrêmement faibles en Diel). Chaque produit n'est utilisé que dans le process d'un atelier de production, sauf l'Ammoniaque (NH_4OH), principalement consommé en Wet, mais aussi en CMP. Ces graphes permettent de visualiser rapidement les produits chimiques liquides les plus consommés pendant le process d'un wafer 45 nm.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Consommations de produits chimiques gazeux

Les consommations de produits chimiques gazeux durant le process d'un wafer représentatif de la technologie 45 nm sont présentées dans le tableau 4.14 ci-dessous :

Produit Chimique gazeux	Volume consommé (cm ³ /wafer)	Ateliers
N ₂	5336382	Traitement Thermique, Métal, Diel, Etch, Stripping, Wet
He	433005	Traitement Thermique, Métal, Diel, Etch
O ₂ (Process)	392513	Traitement Thermique, Diel, Etch, Stripping
O ₂ (Générateur d'O ₃)	309471	Diel
Ar	72055	Métal, Diel, Etch
H ₂	31761	Traitement Thermique, Métal, Diel, Etch, Stripping
CO ₂	13479	Diel
NH ₃	6184	Traitement Thermique, Métal, Diel
C ₃ H ₆	4068	Diel
CO	4035	Etch
N ₂ O	3767	Diel
CF ₄	3703	Etch, Stripping
Cl ₂	3312	Etch
C ₂ H ₄	2868	Traitement Thermique
HBr	1581	Etch
CH ₃ F	1353	Etch
SiH ₄	1050	Diel
TMS	604	Diel
BCl ₃	433	Etch
CH ₂ F ₂	374	Etch
C ₄ F ₈	274	Etch
C ₄ F ₆	261	Etch
CHF ₃	232	Etch
SF ₆	218	Etch
HCD	88	Traitement Thermique
DCS	54	Traitement Thermique
CH ₄	47	Etch
TDMAT	27	Métal
NF ₃	7	Métal
PH ₃	2	Diel

Tableau 4. 14 Consommations de produits chimiques gazeux, par wafer, par les étapes de procédé du produit majoritaire de la technologie 45 nm.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les figures 4.27 et 4.28 montrent les quantités de produits chimiques gazeux consommés pour le process des wafers de la technologie 45 nm. Comme pour les liquides, nous ne présentons pas tous les gaz sur le graphe : seuls les quinze produits dont la consommation est la plus importante figurent ici, sur vingt-neuf différents gaz au total.

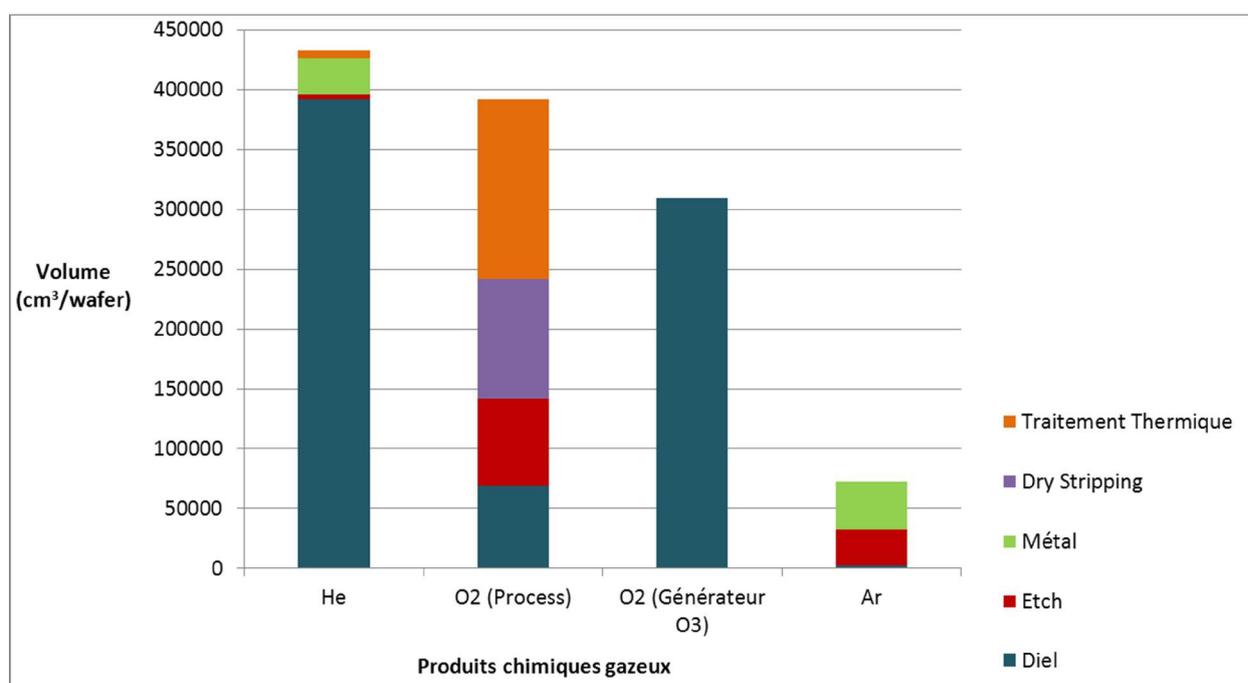


Figure 4. 27 Volumes consommés des quatre produits chimiques gazeux les plus utilisés pour le process des wafers 45 nm (produit 8500).

Les ateliers consommateurs de produits chimiques pendant le process sont le Traitement Thermique, le Dry Stripping, le Métal, l'Etch et le Diel. C'est également une caractéristique de l'Implantation Ionique, pour lequel nous n'avons pas les données.

L'azote (N_2) n'apparaît pas sur le graphe : il s'agit du produit chimique gazeux le plus consommé (plus de cinq millions de cm^3 par wafer), mais c'est un gaz largement utilisé pour assurer le fonctionnement des équipements et du site, et malgré les volumes importants consommés durant les étapes de procédé, ces quantités restent faibles par rapport aux consommations globales du site.

Nous distinguons par ailleurs le dioxygène (O_2) utilisé pour la réalisation des étapes de procédé du dioxygène consommé pour produire de l'ozone (O_3).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

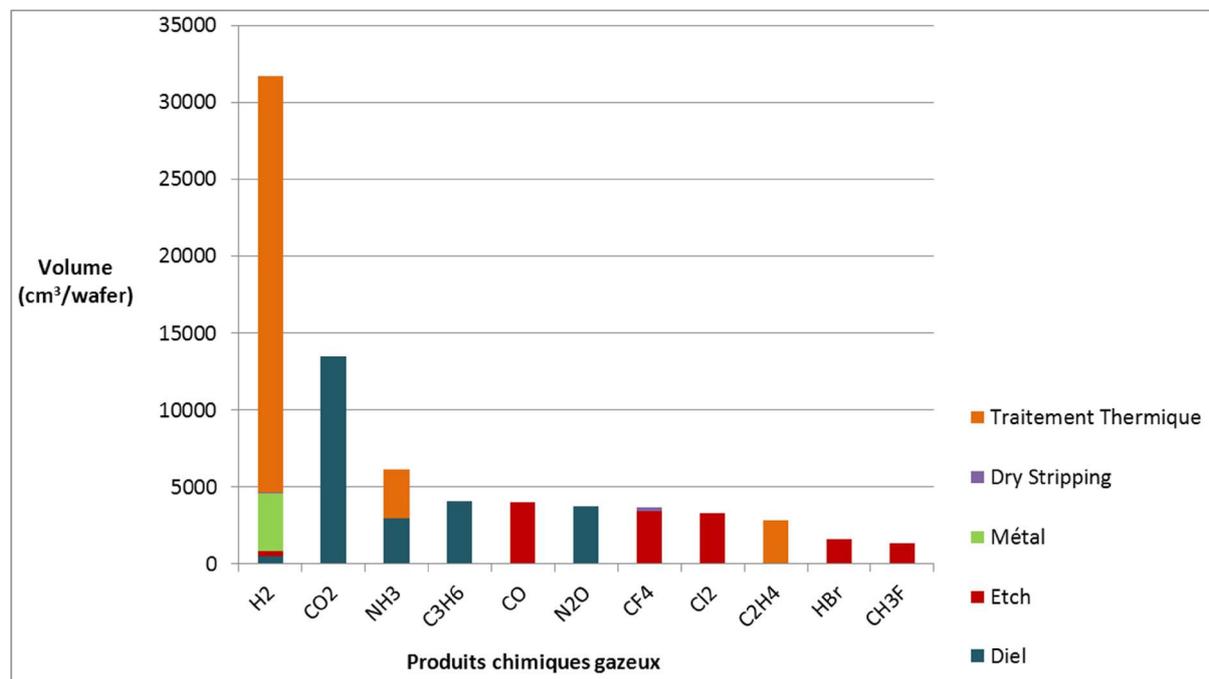


Figure 4. 28 Volumes consommés des produits chimiques gazeux les plus utilisés pour le process des wafers 45 nm (produit 8500), hors N₂.

On constate que trois gaz sont utilisés en quantités largement supérieures à cette moyenne : Hélium (He), Dioxygène destiné au process (O₂ Process) et Dioxygène destiné à la production d'O₃ pour le process (O₂ Générateur O₃).

Les tableaux 4.13 et 4.14 et les figures 4.25 à 4.28 présentent une synthèse de l'analyse de 76 % des 356 étapes de la route majoritaire de la technologie 45 nm. Ces résultats devront être présentés aux experts des ateliers, et discutés avec eux, avant d'être utilisés pour engager des travaux de diminution des consommations.

4.3 Estimation de la consommation d'électricité, d'eau, de gaz de ville, de réactifs, et des rejets aqueux et atmosphériques de la technologie 45 nm

4.3.1 Les données globales du site

Les données globales sont des données qui ne sont pas directement disponibles au niveau d'un wafer pour une technologie : il s'agit de paramètres suivis pour tout le site, avec le plus souvent des valeurs mensuelles. On suivra par exemple la consommation d'électricité et d'eau, certains rejets atmosphériques, et certains rejets aqueux. Afin de pouvoir utiliser ces données pour caractériser une

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

technologie, ainsi que les étapes de la route associée à la technologie étudiée, elles doivent être modifiées pour passer de données liées au site à des données liées aux steps.

Les paramètres concernés sont présentés dans le tableau 4.15 ci-dessous :

Paramètre	Type de données disponibles	Source des données
Consommation d'électricité	Mensuelle Site	Factures (Tableau de suivi pour le reporting au Corporate)
Consommation d'eau désionisée (EDI)	Mensuelle Site	Compteurs (Tableau de suivi pour le reporting au Corporate)
Consommation de Gaz de ville	Mensuelle Site	Factures (Tableau de suivi pour le reporting au Corporate)
Consommation de réactifs de la station de traitement	Mensuelle Station	Tableau de bord Environnement Ondéo ¹
Rejets aqueux	Mensuelle Station	Tableau de bord Environnement Ondéo
Rejets atmosphériques	Trimestrielle Site	Rapports d'analyses

Tableau 4. 15 Type de données disponibles pour les différents paramètres.

Concernant les consommations d'eau, nous avons décidé de quantifier le flux d'EDI et pas le flux d'eau brute. En effet, l'EDI est utilisée très majoritairement pour le process des wafers, contrairement à l'eau brute.

Ces paramètres sont suivis par différentes organisations du site, mais sont tous accessibles et exploités par le service ESH. Nous avons pu accéder à ces données à partir d'outils informatiques. Faisant partie du service ESH, la collecte des informations a été très rapide pour moi. De plus, elles se présentent sous forme de tableaux clairs, compréhensibles et donc facilement exploitables.

¹ La gestion du traitement des effluents aqueux industriels du site est sous-traitée à la société Ondéo.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les données globales utilisées dans cette partie correspondent aux consommations et rejets du site en 2011. La figure 4.29 présente l'évolution du nombre d'étapes réalisées sur l'année 2011 :

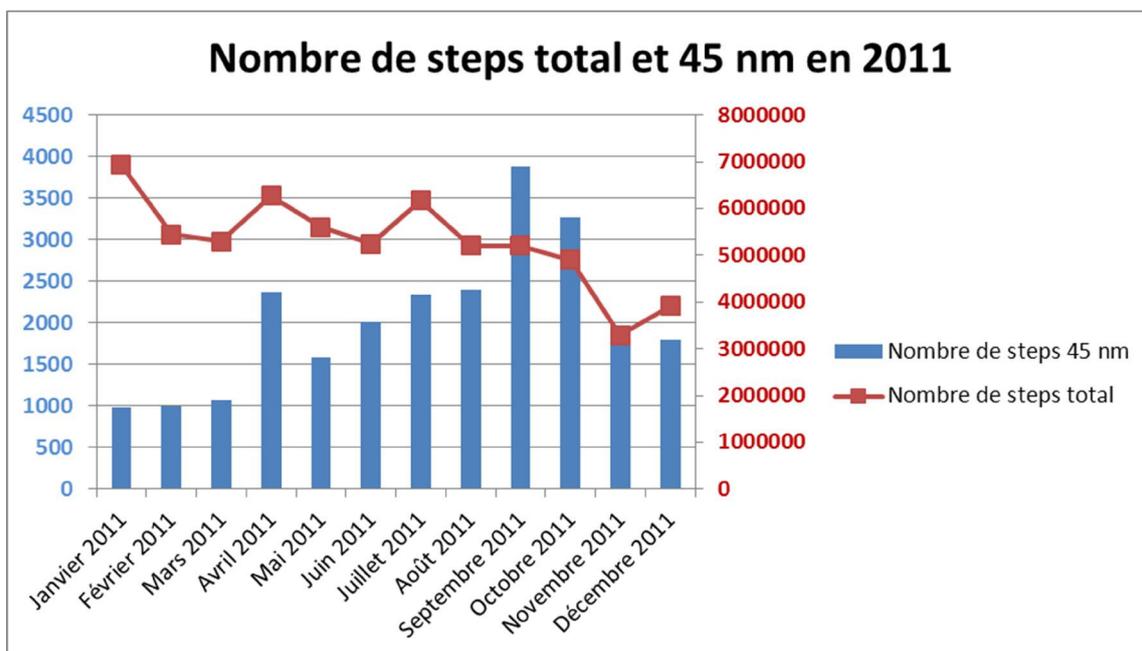


Figure 4. 29 Evolution du nombre d'étapes de procédé réalisées en 2011, pour la technologie 45 nm et pour l'ensemble des technologies du site.

Sur ce graphe, nous avons représenté l'évolution du nombre d'étapes total réalisées sur le site pendant l'année 2011 (courbe rouge). Après un pic au mois de janvier, environ sept millions de steps au total, la production se stabilise entre 5 et 6,5 millions de steps au cours de l'année, pour chuter en fin d'année en-dessous des quatre millions de steps. Cette chute significative de l'activité est liée à une période de chômage partiel, conséquence directe de la crise mondiale. Les barres bleues représentent la montée en puissance de la technologie 45 nm dans l'usine, constante pendant l'année avant la forte baisse observée à partir du mois d'octobre 2011 (crise mondiale).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

4.3.1.1 Détail des réactifs de la station de traitement

Les quantités de réactifs consommés par la station pour le traitement des effluents industriels aqueux sont suivies mensuellement. Il s'agit des réactifs mentionnés dans le tableau 4.16 :

Réactifs consommés par la station de traitement	Utilisation	Consommation annuelle en 2011 (tonnes)
Chaux (Ca(OH)₂)	Traitement Physico-chimique	620
Hydroxyde de Sodium (NaOH)	Traitement Physico-chimique	570
Chlorure de Calcium (CaCl₂)	Traitement Physico-chimique	550
Acide sulfurique (H₂SO₄)	Traitement Physico-chimique	270
Isopropanol (IPA)	Traitement Biologique	157
Sulfate ferreux (FeSO ₄)	Traitement Physico-chimique	55
Acide chlorhydrique (HCl)	Traitement Physico-chimique	6
Acide phosphorique (H ₃ PO ₄)	Traitement Biologique	3
Isopropanol (IPA)	Traitement Biologique	157

Tableau 4. 16 Réactifs consommés pour le traitement des effluents liquides industriels et leur utilisation.

Nous ne présenterons les résultats que pour les quatre réactifs les plus consommés (écrits en rouge dans le tableau), à savoir la Chaux, l'Hydroxyde de Sodium, le Chlorure de Calcium et l'Acide sulfurique.

4.3.1.2 Détail des rejets aqueux

La charge en substances polluantes dans les rejets aqueux est surveillée en sortie de la station de traitement.

Environ 15 paramètres sont suivis mensuellement ; nous en avons sélectionné trois, mais les calculs pourront être effectués pour les autres. Il s'agit de l'Azote, des Fluorures et du Cuivre.

Nous avons décidé de suivre la charge d'Azote dans les rejets aqueux, puisque ce paramètre participe au phénomène d'eutrophisation, qui fait partie des indicateurs environnementaux suivis par STMicroelectronics. Le Phosphore est également concerné, mais sa consommation est inférieure à celle de l'Azote : pour l'année 2011 et le premier trimestre 2012, on consomme presque 5 fois plus d'Azote que de Phosphore (en comparant la quantité de (HNO₃ + NH₄OH) à la quantité de H₃PO₄ consommées). Par ailleurs, il y a plus d'Azote que de Phosphore dans les rejets aqueux : pour l'année 2011 et le premier trimestre 2012, la charge d'Azote total est plus de quinze fois supérieure à la charge de Phosphore.

Nous nous intéresserons également aux Fluorures, dont la consommation sur le site n'est pas négligeable et dont la concentration dans les rejets est relativement importante par rapport aux autres paramètres (autour de 6 mg/L). De plus, des fluorures sont émis par de nombreux équipements de production sur le site.

Concernant le Cuivre, il fait partie des métaux dont on surveille les rejets, et constitue le métal majoritairement utilisé sur le site. De plus, l'utilisation de Cuivre est une des spécificités de l'industrie du semiconducteur.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

4.3.1.3 Détail des rejets atmosphériques

Les flux massiques de plusieurs composants des rejets atmosphériques sont suivis (tableau 4.17) :

Paramètres atmosphériques suivis	Unité
Fluor et composés inorganiques du Fluor	Equivalent HF
Chlorures d'Hydrogène et autres composés inorganiques du Chlore	Equivalent HCl
Ammoniac	Equivalent NH ₃
COV hors méthane	Equivalent COT C300
Acidité	Equivalent H ⁺
Alcalinité	Equivalent OH ⁻
Arsine	Equivalent AsH ₃
Phosphine	Equivalent PH ₃

Tableau 4. 17 Paramètres de rejets atmosphériques suivis.

Nous avons sélectionné quatre paramètres : le Fluor, le Chlorure d'Hydrogène, l'Ammoniac, et les COV (= Composés Organiques Volatils).

En effet, le Fluor, le Chlorure d'Hydrogène et l'Ammoniac sont des paramètres utilisés dans le calcul de l'indicateur Acidification Atmosphérique, qui fait partie des indicateurs environnementaux suivis par STMicroelectronics. Ils permettent d'estimer un impact environnemental que la compagnie a identifié comme important vis-à-vis de l'activité du site, ce qui n'est pas le cas de l'acidité et de l'alcalinité. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de suivre ces paramètres.

Nous n'avons pas choisi d'étudier précisément l'Arsine et la Phosphine, substances qui ne sont quasiment jamais détectées, même en amont des laveurs de gaz. *A priori*, les futures technologies n'utiliseront pas davantage d'Arsine et de Phosphine, sauf en cas d'augmentation importante de la production.

Quant aux émissions de COV, elles font partie des indicateurs environnementaux suivis par STMicroelectronics. De plus, le site consomme de grandes quantités de solvants, ce qui implique la présence d'un système de traitement thermique dédié (incinérateur) afin de n'émettre finalement que de très faibles quantités de COV dans l'atmosphère. Nous ne nous intéressons ici qu'aux COV émis en sortie de l'incinérateur de solvants, qui traite les effluents gazeux provenant des exhausts solvants (EXS). Ces effluents sont totalement liés aux salles blanches, et donc aux procédés. Les charges de COV seront donc uniquement liées au nombre de steps.

Grâce à ces données, nous estimerons la contribution de la technologie 45 nm à différents paramètres site, puis la contribution d'une étape de procédé à ces paramètres.

4.3.2 Fonction de répartition des consommations et rejets sur les différentes technologies

D'après l'étude de la technologie 45 nm, il apparaît que le nombre d'étapes de procédé est une caractéristique des technologies microélectroniques. Cette donnée est obtenue en comptabilisant le nombre d'étapes des ateliers étudiés sur la route du produit majoritaire de chaque technologie. Comme on le voit sur la figure 4.30, le nombre de steps a tendance à augmenter avec les avancées technologiques, et avec la complexité croissante des procédés de fabrication.

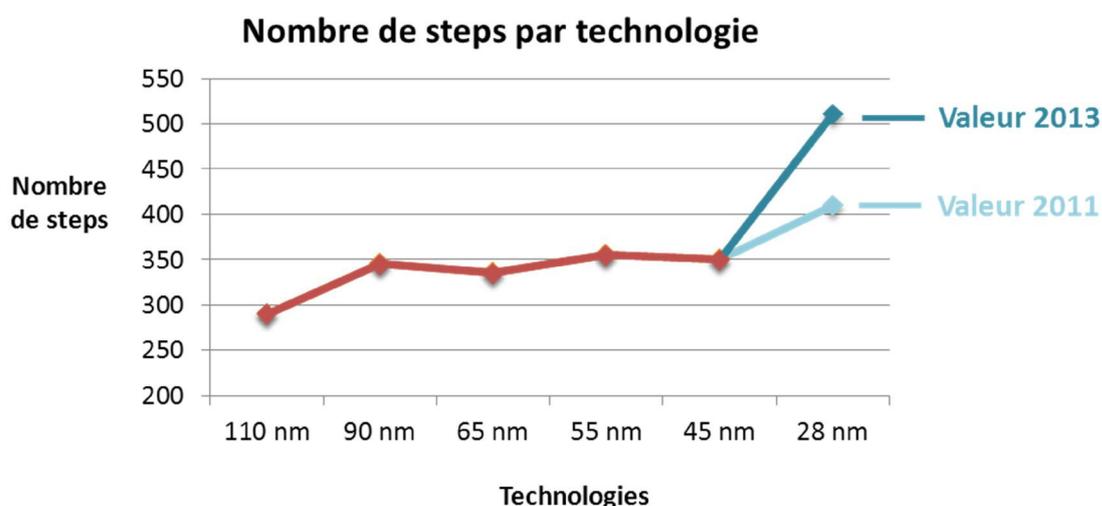


Figure 4. 30 Evolution du nombre d'étapes de procédé par technologie.

Sur cette figure, les différentes technologies réalisées sur le site sont représentées en abscisse, et le nombre de steps apparaît en ordonnée.

Globalement, le nombre d'étapes par technologie a augmenté depuis le 110 nm (290 étapes) jusqu'au 28 nm (410 étapes pour la route majoritaire en 2011, et 511 étapes pour la route majoritaire en 2013), même s'il est resté relativement stable entre les technologies 90 et 45 nm (autour de 350 étapes). La technologie 28 nm est en rupture technologique : la structure de la grille a été modifiée. Cela explique la forte augmentation du nombre de steps par rapport à la technologie 45 nm.

Les données sont donc ramenées au niveau d'une technologie sur une période grâce à une fonction de répartition qui dépend du nombre de steps du produit majoritaire de chaque technologie, et du nombre de produits lancés en production (que l'on appelle « starts ») par technologie. L'introduction du nombre de starts permet de tenir compte de toutes les étapes qui ont lieu pour produire tous les wafers d'une technologie.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

$$N_{Total_X} = N_X \times S_X \quad (4.9)$$

Où :

- N_{Total_X} est le nombre total de steps nécessaire à la réalisation des wafers de la technologie X nm pour une période donnée,
- N_X représente le nombre de steps du produit majoritaire de la technologie X ,
- S_X est le nombre de starts de la technologie X sur la période étudiée.

Nous pouvons ainsi définir le nombre total d'étapes nécessaires à la réalisation de wafers, pour toutes les technologies et sur une période donnée, de la façon suivante :

$$N_{Total} = \sum_{k=1}^K (N_k \times S_k) \quad (4.10)$$

Avec :

- N_{Total} le nombre total de steps nécessaires à la réalisation de wafers pour toutes les technologies sur une période donnée,
- N_k le nombre de steps du produit majoritaire de la technologie k ,
- S_k le nombre de starts de wafers de la technologie k sur la période étudiée,
- K le nombre de technologies du site.

$$Param\grave{e}tre_X = \frac{Param\grave{e}tre_Site \times N_{Total_X}}{N_{Total}} \quad (4.11)$$

Où :

- $Param\grave{e}tre_X$ représente une donnée disponible au niveau du site ramenée au niveau de la technologie X pour la période sur laquelle on a les données globales,
- $Param\grave{e}tre_Site$ une donnée disponible au niveau du site,

Ce calcul nous permet d'estimer la contribution d'une technologie aux consommations et rejets du site, à partir de ces paramètres site, et du nombre de steps qui est une caractéristique des technologies microélectroniques.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Le calcul de la contribution de la technologie 45 nm aux différents paramètres de consommation et de rejet du site nécessite le nombre d'étapes pour réaliser un wafer de chaque technologie de ce site. Une technologie permet la fabrication de plusieurs produits décrits par des routes. Nous considérons le nombre d'étapes entrant en jeu dans la fabrication d'un wafer du produit majoritaire de chaque technologie (tableau 4.18) :

Technologie	Nombre de steps N_k
120 / 110 nm	290
90 nm	345
65 nm	335
55 nm	355
45 nm	350
28 nm	410
Imagers ¹	300

Tableau 4. 18 Nombre d'étapes nécessaires au process d'un wafer pour le produit majoritaire de chaque technologie.

Pour la technologie 28 nm, tous les calculs de ce chapitre seront effectués à partir du nombre d'étapes de la route majoritaire en 2011.

Le nombre d'étapes de procédé total pour toutes les technologies sur l'année 2011 est présenté dans le tableau 4.19 ci-dessous. Il est obtenu en sommant, chaque mois, le produit du nombre de steps nécessaires à la fabrication d'un wafer par le nombre de wafers produits pour chaque technologie.

Période	Somme ($N_k * S_k$)
Janvier 2011	6932140
Février 2011	5450860
Mars 2011	5290660
Avril 2011	6269725
Mai 2011	5598565
Juin 2011	5241130
Juillet 2011	6176365
Août 2011	5207235
Septembre 2011	5203455
Octobre 2011	4894975
Novembre 2011	3289825
Décembre 2011	3915410
Année 2011	63470345

Tableau 4. 19 Nombre de steps total réalisés pour toutes les technologies sur l'année 2011.

Grâce à ces données, nous pouvons maintenant estimer la contribution de la technologie 45 nm aux consommations et rejets globaux du site sur l'année 2011.

¹ Les technologies Imagers permettent la fabrication de produits destinés à la photographie.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les calculs seront détaillés pour la consommation d'électricité, concernant les autres paramètres, seules les valeurs pour l'année 2011 seront mentionnées. Les détails mensuels ou trimestriels seront explicités en annexe [Annexe A.2].

Rappelons que pour les paramètres de la station de traitement des effluents aqueux industriels, nous considérons que la moitié des flux est liée à l'activité du site de Crolles 300. Les valeurs « Site » indiquées dans la suite correspondent donc à la moitié des valeurs des données obtenues à la station de traitement.

4.3.3 Consommation d'électricité pour la technologie 45 nm

Pour ce paramètre, nous prenons la consommation d'électricité du site, incluant la station de traitement des effluents aqueux industriels. En effet, la consommation d'électricité de la station de traitement est très faible par rapport à la consommation du site (sur le total de l'année 2011, la consommation d'électricité de la station de traitement représentait environ 1,3 % de la consommation totale du site).

Période	Electricité_Site (kWh)	N ₄₅	S ₄₅	N _{Total_45}	Somme (N _k *S _k)	Electricité_45 (kWh)	Rapport
Janvier 2011	18935189	350	987	345450	6932140	943599	4,98 %
Février 2011	14866563	350	1002	350700	5450860	956492	6,43 %
Mars 2011	14612309	350	1062	371700	5290660	1026601	7,03 %
Avril 2011	18590657	350	2364	827400	6269725	2453363	13,20 %
Mai 2011	15503929	350	1580	553000	5598565	1531405	9,88 %
Juin 2011	15741428	350	2007	702450	5241130	2109768	13,40 %
Juillet 2011	19609217	350	2336	817600	6176365	2595782	13,24 %
Août 2011	16193056	350	2397	838950	5207235	2608902	16,11 %
Septembre 2011	15959275	350	3884	1359400	5203455	4169353	26,12 %
Octobre 2011	18777235	350	3262	1141700	4894975	4379587	23,32 %
Novembre 2011	14218494	350	1975	691250	3289825	2987555	21,01 %
Décembre 2011	14564067	350	1790	626500	3915410	2330379	16,00 %
Année 2011	197571419	350	24646	8626100	63470345	26851450	13,59 %

Tableau 4. 20 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation d'électricité du site sur l'année 2011.

Dans le tableau 4.20 ci-dessus, la colonne « Rapport » correspond au rapport entre la consommation d'électricité de la technologie 45 nm et la consommation d'électricité du site.

En 2011, la technologie 45 nm a donc nécessité la consommation de 26 851 450 kWh.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Rappelons l'équation nous permettant d'évaluer la contribution de la technologie 45 nm à la consommation d'électricité du site :

$$Electricité_{45} = \frac{Electricité_{Site} \times N_{Total_{45}}}{\sum_{k=1}^K (N_k \times S_k)} \quad (4.12)$$

Où :

- $Electricité_{45}$ représente la consommation d'électricité due à la technologie 45 nm,
- $Electricité_{Site}$ représente la consommation d'électricité du site,
- $N_{Total_{45}}$ correspond au nombre total de steps réalisés pour fabriquer des wafers 45 nm sur une période.

La contribution de la technologie 45 nm aux impacts du site dépend de l'activité du site, il y a donc des différences entre les mois de l'année 2011. Dans notre calcul, le numérateur dépend d'une constante, le nombre d'étapes du produit majoritaire de la technologie 45 nm, et de deux variables, à savoir la consommation d'électricité du site et le nombre de starts de la technologie 45 nm. Lorsque ces variables augmentent, et si les autres termes sont constants, la contribution de la technologie 45 nm à la consommation d'électricité du site va augmenter. Par ailleurs, le dénominateur dépend également de variables qui sont le nombre de starts de chaque technologie réalisée sur le site. Lorsque l'activité globale du site augmente, et si les autres termes sont constants, la contribution de la technologie 45 nm à la consommation globale d'électricité du site va diminuer.

Les intérêts de cette information sont donc d'estimer la contribution d'une technologie à un paramètre site, et de voir l'évolution de cette contribution en fonction de l'activité du site, représentée par le nombre d'étapes total de toutes les technologies qui y sont développées.

Nous avons calculé, dans la colonne « Rapport » du tableau 4.20, le rapport de la consommation d'électricité obtenue chaque mois pour la technologie 45 nm sur la consommation d'électricité du site. Ce rapport mensuel est exprimé en pourcentage. Pour l'année 2011, on constate que la contribution de la technologie 45 nm à la consommation d'électricité du site varie de 5 à 26 %, avec une valeur d'environ 14 % sur l'année. Ces pourcentages seront les mêmes pour tous les paramètres de consommation et de rejet obtenus à partir de données « site » puisque la relation utilisée pour obtenir la contribution de la technologie 45 nm est la même (il sera divisé par deux pour les paramètres obtenus à partir de données liées à la station de traitement puisque celle-ci est unique pour deux sites).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

4.3.4 Contribution de la technologie 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet du site pour l'année 2011

Afin de représenter les flux entrants et sortants de la technologie 45 nm, nous avons calculé les contributions de cette technologie aux paramètres de consommation et de rejet du site pour l'année 2011 (tableau 4.21). Ces calculs ont été effectués en considérant qu'en moyenne, la technologie 45 nm contribue pour 14 % aux impacts du site sur l'année 2011.

Type de paramètre	Paramètre	Consommation / rejet du site	Consommation / rejet de la technologie 45 nm
Consommation du site	Electricité	197 571 419 kWh	26 851 450 kWh
	EDI ¹	586 350 m ³	79 689 m ³
	Gaz Naturel	1 659 852 m ³	225 586 m ³
Consommation de la station de traitement	Acide sulfurique (H ₂ SO ₄)	135 t	18,39 t
	Hydroxyde de Sodium (NaOH)	284 t	38,63 t
	Chlorure de Calcium (CaCl ₂)	277 t	37,61 t
	Chaux (Ca(OH) ₂)	310 t	42,15 t
Rejets liquides de la station de traitement	Azote	11 459 kg	1557,36 kg
	Fluorure	7 199 kg	978,33 kg
	Cuivre	85 kg	11,48 kg
Rejets atmosphériques du site	Chlorure d'Hydrogène	282 kg	38,30 kg
	Fluor	282 kg	38,37 kg
	Ammoniac	539 kg	73,22 kg
	COV	271 kg	36,83 kg

Tableau 4. 21 Contribution de la technologie 45 nm aux différents paramètres de consommation et de rejet du site sur l'année 2011.

¹ Nous avons décidé de quantifier le flux d'EDI et pas celui d'eau brute car l'EDI est utilisée très majoritairement pour le process des wafers.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

4.4 Première évaluation : bilan de la contribution de la technologie 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet du site pour l'année 2011 (hors produits chimiques)

Les calculs de la contribution de la technologie 45 nm à différents paramètres de consommation et de rejet du site nous permettent de quantifier les flux entrants et sortants pour cette technologie pour l'année 2011.

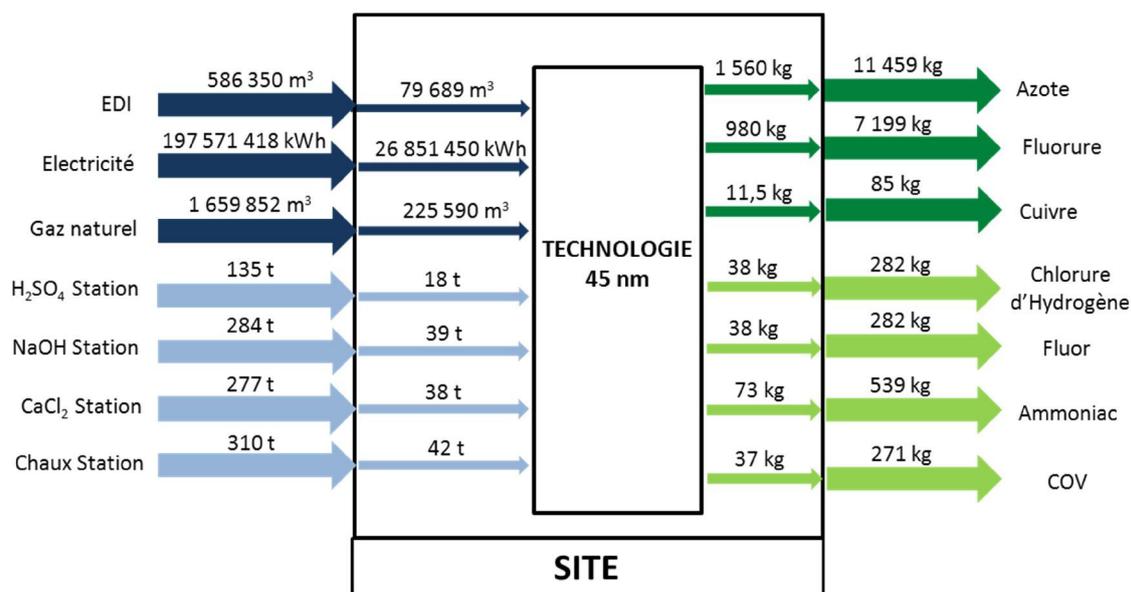


Figure 4. 31 Flux entrants et sortants quantifiés du site et de la technologie 45 nm pour l'année 2011.

Sur la figure 4.31, les flèches les plus épaisses correspondent aux flux entrants et sortants du site, et les flèches plus fines représentent les flux entrants et sortants de la technologie 45 nm. Les quatre réactifs consommés à la station de traitement des effluents aqueux industriels apparaissent sous les mentions *Réactif Station*.

Dans la partie 4.4, nous avons utilisé l'évolution du nombre d'étapes des technologies microélectroniques pour différencier leur contribution aux flux entrants et sortants du site, et modéliser la technologie 45 nm. Dans le paragraphe suivant, nous cherchons à affiner ces résultats en intégrant des informations plus précises sur les étapes des procédés de fabrication de chaque technologie microélectronique.

4.5 Méthode d'attribution des consommations et rejets du site à une étape de procédé de la technologie 45 nm

Le but de cette partie est de déterminer, lorsque cela est possible, des règles simples d'allocation de paramètres globaux (c'est-à-dire connus uniquement au niveau de tout le site) à une étape de procédé (step). Cela nous permettrait également d'affiner l'attribution de ces paramètres globaux sur une technologie microélectronique consistant en une somme de steps.

Pour connaître la contribution d'une technologie à un paramètre connu au niveau du site, nous avons en effet fait l'hypothèse que tous les steps de toutes les technologies du site avaient le même impact sur ces paramètres globaux. Cette approximation est grossière mais permet de bien analyser les différents contributeurs et de déterminer les améliorations globales possibles. Néanmoins, la précision n'est pas suffisante pour étudier la technologie elle-même car nous avons besoin de la contribution de chaque étape de procédé ; c'est l'objet de ce paragraphe.

4.5.1 Consommation d'électricité

L'électricité est consommée pour de nombreuses utilisations sur le site, et en grande partie pour assurer le fonctionnement des équipements de production. En effet, les équipements nécessitent une alimentation importante en énergie pour fonctionner, de plus ils ne sont jamais totalement arrêtés : même lorsqu'il n'y a pas de wafers dans les équipements, ils sont maintenus en veille afin d'éviter les gros pics de consommation lors de leur redémarrage et de leur requalification. Les conditions en salle blanche (hygrométrie, température) sont par ailleurs toujours maintenues.

Cela implique, d'après les estimations des équipes en charge de l'énergie sur le site, que la consommation d'électricité du site ne diminue que de 20 % lorsque la production est arrêtée.

Nous pouvons donc faire l'hypothèse que le paramètre Consommation d'électricité est composé d'une part fixe importante (qui reste stable même lorsque la production est arrêtée) que l'on suppose de l'ordre de 80 %, et d'une part variable dépendant principalement de l'activité du site et donc du nombre de wafers processés. La part fixe comprend, entre autres, l'alimentation en énergie des équipements en veille et le maintien des conditions de la salle blanche.

Nous pouvons ainsi poser la relation suivante :

$$Electricité_Site = F + v(\text{Nombre de steps processés}) \quad (4.13)$$

Avec :

- *Electricité_Site* la consommation d'électricité du site sur l'année 2011,
- *F* la part fixe de la consommation d'électricité du site sur l'année 2011,
- *v(Nombre de steps processés)* la part variable de la consommation d'électricité du site dépendant majoritairement de l'activité de ce site, sur l'année 2011.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Une fois déterminées les parts fixes et variables de la consommation d'électricité du site sur l'année 2011, nous quantifierons l'incertitude sur les résultats.

Nous vérifions cette hypothèse en comparant l'évolution de la consommation d'électricité du site avec l'évolution du nombre de steps qui y sont réalisés pour l'année 2011. Nous disposons pour cela de données mensuelles.

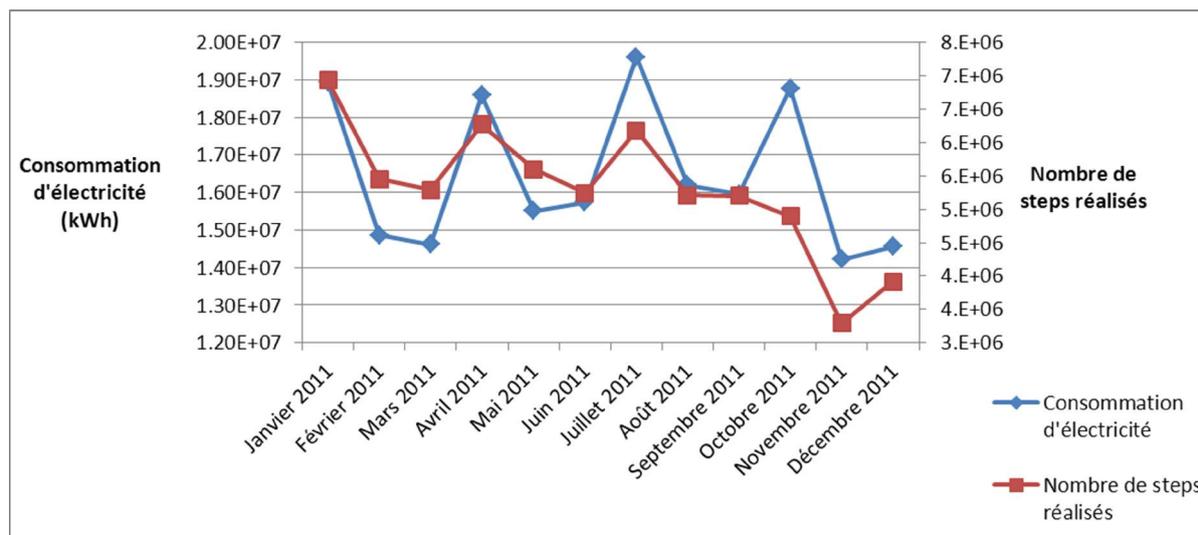


Figure 4. 32 Evolution de la consommation d'électricité et du nombre d'étapes de procédé réalisées chaque mois sur le site pour l'année 2011.

Globalement, les deux courbes de la figure 4.32 évoluent de la même façon, c'est-à-dire que lorsque le nombre d'étapes augmente ou diminue, la consommation d'électricité du site augmente ou diminue (même si ces deux augmentations ne sont pas du même ordre). Dans ce cas, on considère que les courbes se suivent suffisamment pour supposer que l'influence du nombre d'étapes n'est pas négligeable sur la consommation d'électricité du site.

L'évolution de la consommation d'électricité ne suit pas l'évolution du nombre de steps sur deux périodes (tableau 4.22) :

Période	Evolution de la consommation d'électricité	Evolution du nombre de steps
Mai - Juin 2011	Augmente (+ 1,5 %)	Diminue (- 6 %)
Septembre - Octobre 2011	Augmente (+ 18 %)	Diminue (- 6 %)

Tableau 4. 22 Périodes de l'année 2011 pour lesquelles les courbes de consommation d'électricité et de nombre d'étapes de procédé n'évoluent pas de la même façon.

Concernant les deux périodes Mai-Juin et Septembre-Octobre 2011, si les courbes n'évoluent pas de la même façon, nous pouvons supposer que d'autres facteurs ont *a priori* une influence plus importante que le nombre d'étapes réalisées sur la consommation d'électricité.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

La relation (4.13) peut donc s'écrire de cette façon :

$$Electricité_Site = F + v(\text{Nombre de steps processés}) + v(\text{Autres facteurs}) \quad (4.14)$$

Avec :

- $v(\text{Autres facteurs})$ la part variable de la consommation d'électricité du site principalement d'autres facteurs, sur l'année 2011

Nous pouvons alors supposer quels sont les facteurs autres que l'activité de production qui peuvent davantage influencer la consommation d'électricité sur les périodes pour lesquelles nous observons des évolutions différentes entre la consommation d'électricité et l'activité du site.

Malgré ces deux périodes, nous considérons que, globalement, le nombre de steps réalisés est bien le facteur influençant majoritairement la part variable de la consommation d'électricité du site.

Nous pouvons donc chercher à évaluer la part fixe F de la consommation d'électricité du site pour l'année 2011, ainsi que la part variable en fonction du nombre de steps réalisés.

Pour cela, nous allons supposer que les autres facteurs pouvant influencer la consommation d'électricité sont négligeables.

- ✓ **Estimation de la part fixe de la consommation d'électricité du site pour l'année 2011, ainsi que de la part variable dépendant du nombre d'étapes de procédé réalisées**

Nous calculons la contribution d'un step pour un wafer d'une technologie, $C_{Electricité_Step}$, pour plusieurs valeurs de F fixées en fonction de la consommation mensuelle d'électricité de l'année 2011. Les consommations d'électricité mensuelles en 2011 apparaissent sur la figure 4.33 :

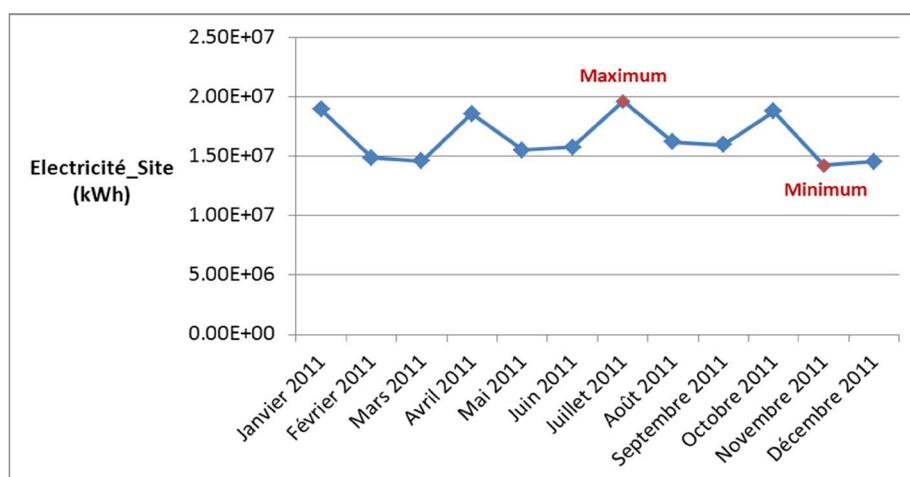


Figure 4. 33 Consommation d'électricité mensuelle du site pour l'année 2011.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Afin d'obtenir une part fixe de valeur toujours inférieure ou égale à la consommation la plus faible de l'année 2011, nous choisissons de fixer la valeur de F en fonction de la consommation d'électricité mensuelle la plus faible de l'année. Dans ce cas, il s'agit de la consommation du mois de novembre 2011.

Nous commençons par nous placer dans le cas où la consommation d'électricité du site ne dépend que de l'activité, et donc de la réalisation des étapes de procédé. Dans cette situation, F sera nulle.

A partir de cette hypothèse, nous calculons les différentes valeurs de $C_{\text{Electricité_Step}}$ (tableau 4.23) :

Période	$C_{\text{Electricité_Step}}$	$N_{\text{Total}} \times (C_{\text{Electricité_Step}} - C_{\text{Electricité_Step,moyen}})^2$
Janvier 2011	2,732	1007902,01
Février 2011	2,727	809781,73
Mars 2011	2,762	651472,94
Avril 2011	2,965	136715,72
Mai 2011	2,769	660765,23
Juin 2011	3,003	62696,79
Juillet 2011	3,175	23791,94
Août 2011	3,110	49,79
Septembre 2011	3,067	10896,45
Octobre 2011	3,836	2560217,98
Novembre 2011	4,322	4809835,79
Décembre 2011	3,720	1441982,60
Année 2011	3,113	

Tableau 4. 23 Valeurs de $C_{\text{Electricité_Step}}$ obtenues pour une part fixe nulle pour la consommation d'électricité du site.

La dernière colonne est une étape intermédiaire permettant de calculer l'incertitude sur $C_{\text{Electricité_Step}}$.

La valeur $C_{\text{Electricité_Step,moyen}}$ correspond à la valeur de $C_{\text{Electricité_Step}}$ pour l'année 2011, soit 3,113.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

L'incertitude sur $C_{\text{Electricité_Step}}$ est obtenue par la relation suivante :

$$I_{C_{\text{Electricité_Step}}} = \frac{\sum_{m=1}^{12} (N_{\text{Total},m} \times (C_{\text{Electricité_Step},m} - C_{\text{Electricité_Step},\text{moyen}})^2)}{N_{\text{Total},\text{annuel}}} \quad (4.15)$$

Où :

- $I_{C_{\text{Electricité_Step}}}$ représente l'incertitude sur $C_{\text{Electricité_Step}}$,
- m le mois de l'année 2011,
- $N_{\text{Total},m}$ le nombre total de steps processés pour tous les wafers pour toutes les technologies du site pendant le mois m de l'année 2011,
- $N_{\text{Total},\text{annuel}}$ le nombre total de steps processés pour tous les wafers de toutes les technologies du site pendant l'année 2011,
- $C_{\text{Electricité_Step},m}$ la contribution d'un step pour un wafer et pour un step d'une technologie pendant le mois m ,
- $C_{\text{Electricité_Step},\text{moyen}}$ la contribution moyenne d'un step pour un wafer et pour un step d'une technologie sur l'année 2011.

Les incertitudes en fonction de la valeur de la part fixe sont présentées dans le tableau 4.24 suivant :

Part fixe F	Valeur de F par rapport à la consommation d'électricité de Novembre 2011	Valeur de F (kWh)	Incrtitude $I_{C_{\text{Step}}}$
F_1	0 %	0	0,1918
F_2	25 %	3 554 624	0,1157
F_3	50 %	7 109 247	0,0740
F_4	75 %	10 663 871	0,0670
F_5	80 %	11 374 795	0,0695
F_6	70 %	9 952 946	0,06545
F_7	65 %	9 242 021	0,06551

Tableau 4. 24 Incrtitude sur $C_{\text{Electricité_Step}}$ pour la consommation d'électricité en fonction de la valeur de la part fixe F.

L'incertitude sur $C_{\text{Electricité_Step}}$ peut se représenter graphiquement : la courbe de l'incertitude sur $C_{\text{Electricité_Step}}$ en fonction de F sera une parabole (figure 4.34), puisque la relation à partir de laquelle on calcule cette incertitude est un polynôme du deuxième degré. Sélectionner la valeur de F pour laquelle l'incertitude sur $C_{\text{Electricité_Step}}$ est la plus petite revient à prendre le minimum de la courbe $I_{C_{\text{Electricité_Step}}} = f(F)$.

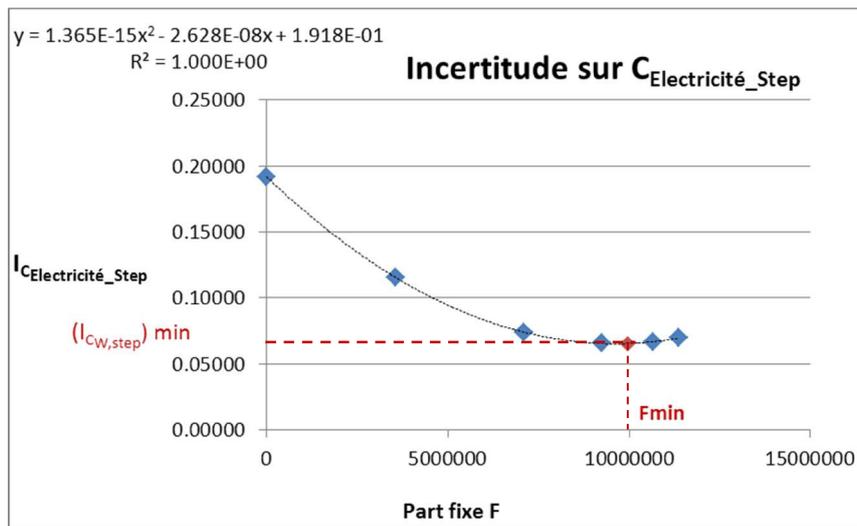


Figure 4. 34 Représentation graphique de l'incertitude sur $C_{Electricité_Step}$ en fonction de la valeur de la part fixe F pour la consommation d'électricité du site en 2011.

Une fois que nous disposons de suffisamment de points, nous obtenons l'équation de la courbe $I_{C_{Electricité_Step}} = f(F)$, qui sera de la forme $I_{C_{Electricité_Step}} = a \cdot F^2 + b \cdot F + c$, où a , b et c sont des coefficients positifs ou négatifs. Nous calculons alors la valeur de F permettant de minimiser l'incertitude sur $C_{Electricité_Step}$ à partir de la relation suivante :

$$F_{min} = \frac{-b}{2 \times a} \quad (4.16)$$

Où :

- F_{min} représente la valeur de F pour laquelle l'incertitude sur $C_{Electricité_Step}$ sera la plus faible,
- a et b les coefficients de l'équation de la courbe $I_{C_{Electricité_Step}} = f(F)$.

Dans ce cas, nous obtenons :

$$F_{min} = \frac{2,628e^{-8}}{2 \times 1,365e^{-15}} \quad (4.17)$$

Soit $F_{min} = 9\,626\,374$ kWh.

Nous pouvons calculer le rapport entre F_{min} et la plus petite consommation mensuelle d'électricité du site pour l'année 2011 :

$$\frac{9626374}{14218494} \times 100 = 68 \% \quad (4.18)$$

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

On obtient une part fixe F qui représente 68 % de la plus faible consommation mensuelle d'électricité de l'année 2011, ce qui est cohérent avec les estimations des Facilities.

Nous pouvons enfin déduire de ce résultat la contribution moyenne d'une étape de procédé à la consommation d'électricité du site pour un wafer d'une technologie sur l'année 2011, $C_{Electricité_Step,moyen}$:

$$C_{Electricité_Step,moyen} = \frac{Electricité_Site - (12 \times F_{min})}{N_{Total}} \quad (4.19)$$

Soit pour la consommation d'électricité de l'année 2011 :

$$C_{Electricité_Step,moyen} = \frac{197571419 - (12 \times 9626374)}{63470345} \quad (4.20)$$

$$C_{Electricité_Step,moyen} = 1,293 \text{ kWh} = 1,3 \text{ kWh} \quad (4.21)$$

Ainsi, d'après nos calculs et nos estimations, chaque étape pour le process d'un wafer d'une technologie consommait en moyenne 1,3 kWh en 2011.

Nous avons supposé les autres facteurs pouvant influencer la consommation d'électricité négligeables devant le nombre de steps réalisés. Afin de vérifier cette hypothèse, nous pouvons étudier les valeurs mensuelles de $C_{Electricité_Step}$ obtenues pour F_{min} , et les comparer à la valeur moyenne (tableau 4.25).

Période	$C_{Electricité_Step}$	Ecart à la moyenne
Janvier 2011	1,343	4 %
Février 2011	0,961	26 %
Mars 2011	0,942	27 %
Avril 2011	1,430	11 %
Mai 2011	1,050	19 %
Juin 2011	1,167	10 %
Juillet 2011	1,616	25 %
Août 2011	1,261	2 %
Septembre 2011	1,217	6 %
Octobre 2011	1,869	45 %
Novembre 2011	1,396	8 %
Décembre 2011	1,261	2 %
Année 2011	1,293	

Tableau 4. 25 Contribution mensuelle de chaque étape de procédé pour un wafer d'une technologie à la consommation d'électricité du site pour l'année 2011 avec une part fixe de 9626374 kWh.

Les valeurs de $C_{Electricité_Step}$ varient de 0,9 à 1,9 kWh.

L'écart à la moyenne varie entre 2 et 45 %, avec un écart moyen de 15 %.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Nous pouvons donc supposer que ces variations sont dues au fait que nous avons sous-estimé un ou plusieurs facteurs influençant la consommation d'électricité du site.

Ces facteurs peuvent être :

- Saisonniers : en cas d'écart important entre la température extérieure et la température qui doit être maintenue dans la salle blanche, la régulation de cette température consommera davantage d'énergie. En effet, les installations techniques nécessaires au maintien de la température en salle blanche (groupes froids et tours aéro-réfrigérantes) consomment beaucoup d'énergie.
- Techniques : installation de nouveaux équipements nécessitant des réglages,...
- Technologiques : tous les steps réalisés dans tous les ateliers n'ont en réalité pas la même consommation d'électricité.
- Economiques : les variations de la charge du site de production peuvent influencer la consommation d'électricité du site. Plus le nombre de wafers produits est faible, plus la consommation d'énergie par wafer est importante.

4.5.2 Consommation d'eau désionisée (= EDI)

L'EDI est utilisée en grande majorité pour le process des wafers. Certains équipements en veille sont également alimentés en EDI, mais ces consommations sont très inférieures à celles liées au process. De plus, lors de l'installation et la qualification de nouveaux équipements, des quantités assez importantes d'EDI peuvent être utilisées, mais ces consommations sont ponctuelles. Nous supposons donc que ce paramètre se compose principalement d'une part variable dépendant du nombre de steps réalisés sur le site, et évoluant donc avec l'activité du site.

Nous voulons répartir ces consommations uniquement sur les steps réalisés sur le site consommant effectivement de l'EDI. Pour cela, les équipements connectés au réseau d'alimentation en EDI ont été identifiés d'après l'étude des différents PID (Piping and Instrumentation Diagram ou Schéma tuyauterie et instrumentation).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les étapes de procédé ayant un impact sur la consommation d'EDI du site sont présentées dans le tableau 4.26 suivant :

Ateliers de production	Etapes de procédé
CMP	Tous les steps
Photolithographie	Tous les steps
Wet	Tous les steps
Etch	Steps d'élimination de résine
Métal	Steps de dépôt de Cuivre

Tableau 4. 26 Etapes de procédé des technologies du site consommant de l'EDI, par atelier de production.

Les procédés contribuant à la consommation d'EDI du site concernent les étapes réalisées dans les équipements humides : c'est le cas des ateliers CMP, Photolithographie et Wet.

Concernant les ateliers Etch et Métal dont les équipements fonctionnent principalement en phase gazeuse, nous tiendrons compte d'étapes particulières d'élimination de résine et de dépôt de Cuivre qui nécessitent de l'EDI.

Afin de répartir la consommation d'EDI sur les étapes de procédé consommatrices d'EDI, nous avons besoin de connaître le nombre d'étapes concernées par ce paramètre pour toutes les technologies du site. Ces données seront obtenues à partir de la route du produit majoritaire de chaque technologie, et nous supposons qu'elles sont identiques pour toutes les routes de ces technologies.

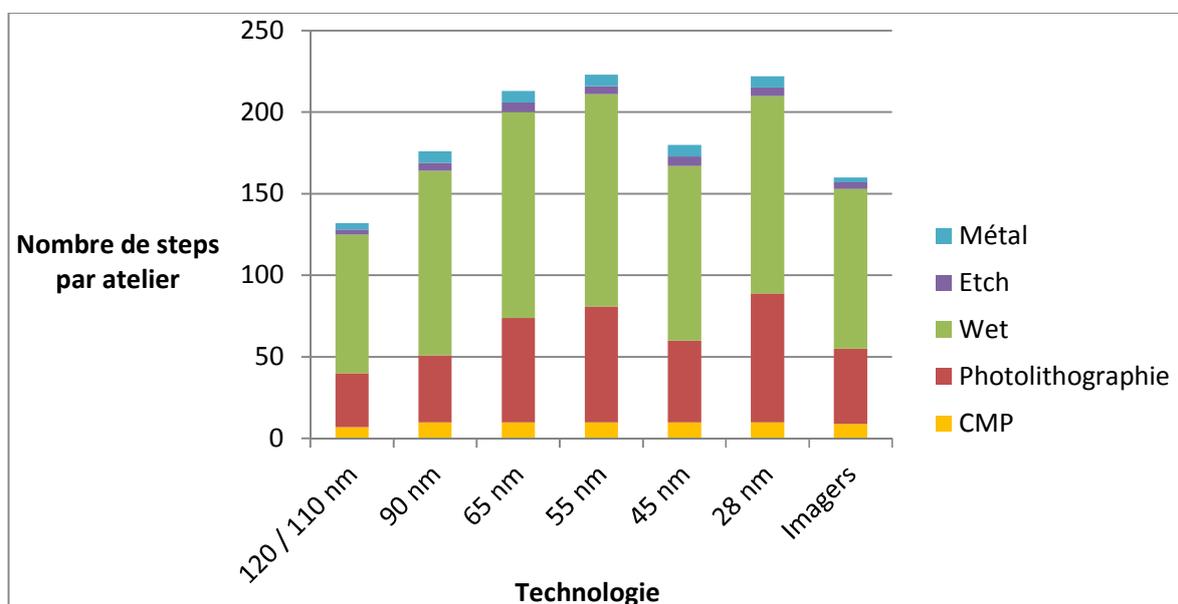


Figure 4. 35 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site consommant de l'EDI.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Sur la figure 4.35 ci-dessus, le nombre de steps par atelier est en ordonnée, et les différentes technologies apparaissent en abscisse.

Nous calculons la contribution de chaque étape de procédé nécessitant de l'EDI à la consommation d'EDI du site grâce à la relation suivante :

$$C_{EDI_Step} = \frac{EDI_Site}{N_{Total_EDI}} \quad (4.22)$$

Où :

- C_{EDI_Step} représente la contribution d'un step traité utilisant de l'EDI à la consommation d'EDI du site, sur la période étudiée
- EDI_Site la consommation d'EDI du site sur la période étudiée
- N_{Total_EDI} le nombre total de steps traités utilisant de l'EDI sur la période étudiée

Le terme N_{Total_EDI} s'obtient par la relation suivante :

$$N_{Total_EDI} = \sum_{k=1}^K (N_{EDI,k} \times S_k) \quad (4.23)$$

Avec :

- $N_{EDI,k}$ le nombre de steps du produit majoritaire de la technologie k consommant de l'EDI

Ces calculs sont basés sur deux hypothèses :

- Tous les steps des technologies consommant de l'EDI en consomment la même quantité.
- Le nombre de Starts S_k représente le nombre de wafers qui sont lancés en process, mais qui peuvent ne pas aller au terme des étapes de procédé. Nous supposons que tous les steps sont réalisés pour tous les wafers comptabilisés dans les Starts.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les résultats des calculs de la consommation d'EDI d'une étape de procédé pour tous les mois de l'année 2011 sont présentés sur la figure 4.36 ci-dessous :

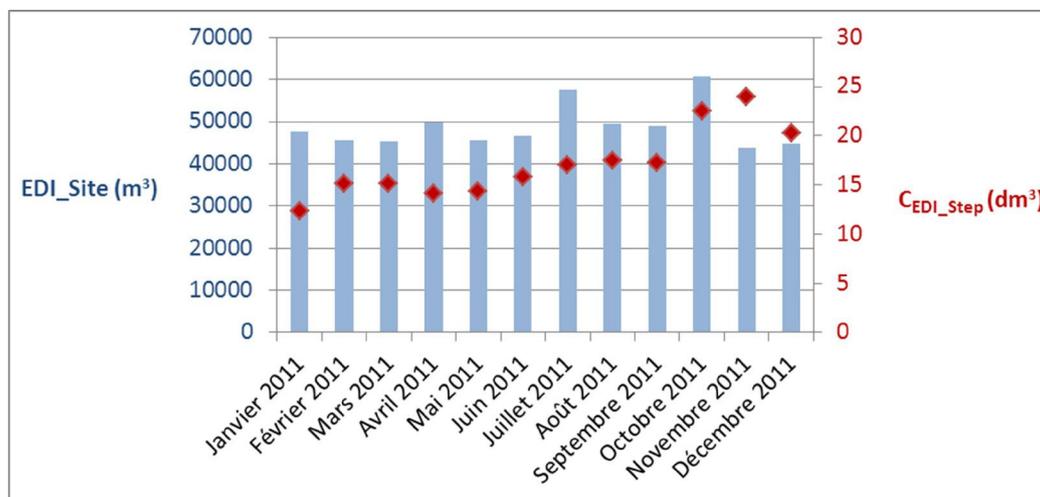


Figure 4. 36 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation d'EDI du site pour l'année 2011.

Sur cette figure, les barres bleues correspondent aux consommations mensuelles d'EDI du site (premier axe des ordonnées). Les points rouges représentent la consommation mensuelle de chaque step réalisé et contribuant à la consommation d'EDI du site (second axe des ordonnées). Les mois de l'année 2011 sont en abscisse.

En moyenne sur l'année 2011, un step réalisé sur le site consomme donc 16,6 dm³ d'EDI.

Afin de mesurer la précision de nos résultats, nous pouvons calculer l'écart à la moyenne de la valeur de C_{EDI_Step} pour chaque mois de l'année 2011, en effectuant le calcul suivant :

$$E = \frac{|C_{EDI_Step} - C_{EDI_Step,moyen}|}{C_{EDI_Step,moyen}} \quad (4.24)$$

Où :

- o E représente l'écart à la moyenne des valeurs mensuelles de C_{EDI_Step}
- o $C_{EDI_Step,moyen}$ est la valeur de la consommation d'EDI d'un step processé sur le site, obtenue avec les données relatives à l'année 2011

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

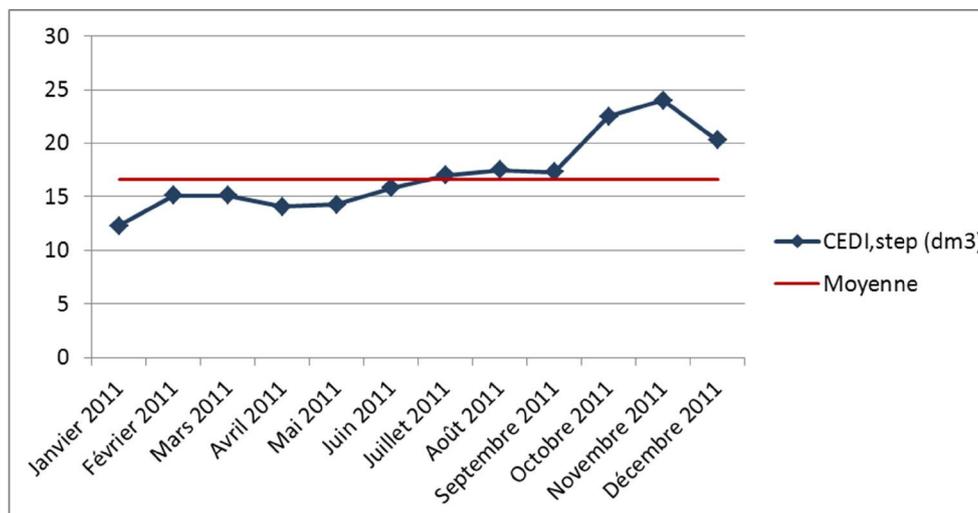


Figure 4.37 Ecarts à la moyenne des valeurs mensuelles de C_{EDI_Step} sur l'année 2011.

Sur la figure 4.37, la courbe bleue représente la consommation mensuelle d'EDI de chaque étape de procédé réalisée sur le site et contribuant à la consommation d'EDI du site. La courbe rouge correspond à la consommation moyenne d'une étape de procédé utilisant de l'EDI. L'augmentation importante de la contribution d'un step à la consommation d'EDI que l'on observe en fin d'année 2011 s'explique par la baisse d'activité.

Les valeurs de C_{EDI_Step} varient de 12,3 à 24,0 dm³.

Les écarts à la moyenne varient de 3 à 44 %, avec un écart moyen de 16 %.

Les variations observées entre les différents mois peuvent s'expliquer par des pics de consommation ponctuels d'EDI pour l'installation de nouveaux équipements en salle blanche, ou par des consommations d'EDI par les équipements en veille.

Pour ce paramètre, nous retiendrons donc la valeur suivante pour la consommation d'EDI d'une étape de procédé :

$$C_{EDI_step,moyen} = 16,6 \text{ dm}^3 \quad (4.25)$$

Limite de la méthode

Nous avons fait l'hypothèse que tous les steps qui consomment de l'EDI en consomment la même quantité. Cela est une approximation car cet ensemble de steps est en réalité constitué d'étapes de procédé plus ou moins contributrices en fonction des procédés et des équipements dans lesquels elles sont réalisées.

4.5.3 Consommation de Gaz Naturel

Le gaz naturel est principalement utilisé pour le fonctionnement des chaudières et des générateurs de vapeur (installations soutenant les pompes à chaleur permettant de réguler les conditions atmosphériques de la salle blanche), et pour les POU.

Les conditions de la salle blanche sont toujours maintenues, quel que soit le nombre de steps réalisés sur le site. Concernant les POU et la cafétéria, leur activité est moins importante quand il y a moins de production, mais n'est jamais totalement arrêtée. De plus, d'après les observations faites sur le site, les consommations de gaz naturel pour l'alimentation des chaudières et des générateurs de vapeur sont très supérieures à celles des POU et de la cafétéria.

Nous supposons donc que ce paramètre est indépendant du nombre d'étapes de procédé réalisées.

Cependant, nous cherchons à rapporter les flux entrants et sortants du site au niveau de chaque step qui y est réalisé. Dans ce cas, nous utiliserons donc la relation suivante :

$$C_{GN_Step} = \frac{GN_Site}{N_{Total}} \quad (4.26)$$

Avec :

- C_{GN_Step} représente la contribution d'un step processé à la consommation de gaz naturel du site, sur la période étudiée
- GN_Site la consommation de gaz naturel du site sur la période étudiée
- N_{Total} le nombre total de steps processés sur le site sur la période étudiée

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

La figure 4.38 suivante présente les consommations mensuelles de gaz naturel du site pour l'année 2011 (barres bleues), la contribution mensuelle d'un step réalisé (points rouges), ainsi que la contribution moyenne d'un step à la consommation de gaz naturel du site sur l'année 2011 (droite rouge).

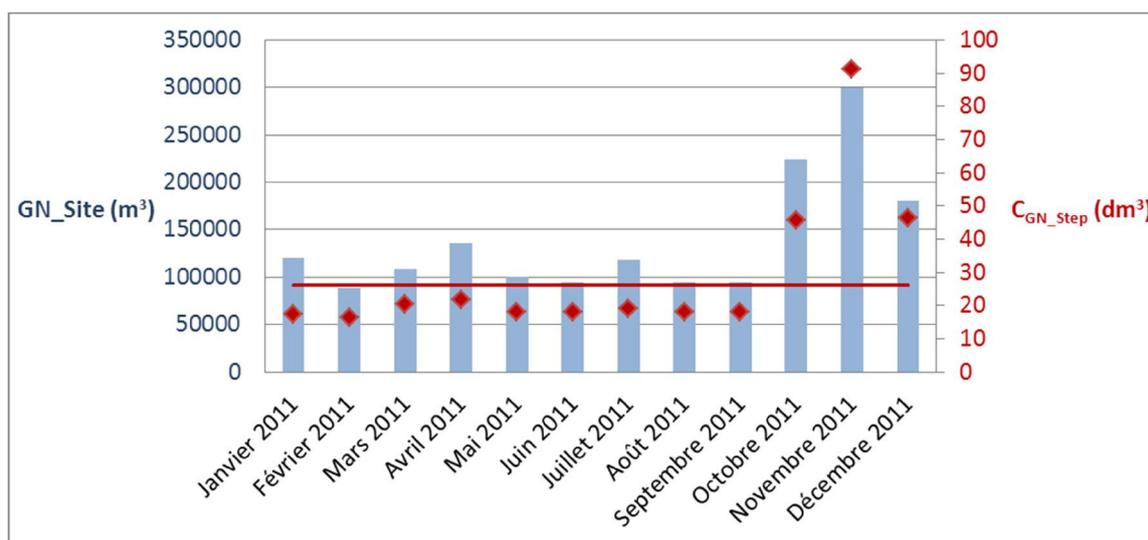


Figure 4. 38 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation de gaz naturel du site pour l'année 2011.

Les valeurs de C_{GN_Step} varient de 17,3 à 91,1 dm^3 .

Les écarts à la moyenne varient de 17 à 248 %, avec un écart moyen de 55 %.

La très forte augmentation observée au mois de Novembre 2011 s'explique par un incident ponctuel sur le site : une pompe à chaleur (principale installation utilisée pour réguler les conditions de la salle blanche) est tombée en panne. Dans ce cas, les chaudières prennent le relais. Or, à l'inverse des chaudières, la pompe à chaleur ne consomme pas de gaz naturel : le remplacement de la pompe à chaleur par les chaudières a donc provoqué une forte augmentation de la consommation de gaz naturel du site.

Il s'agit d'un événement anormal sur le site, mais il me semble pertinent de tenir compte de cette valeur élevée de consommation de gaz naturel, puisque cet incident pourrait se reproduire et fait partie des risques liés à l'activité du site.

Pour ce paramètre, nous retiendrons donc la valeur suivante pour la consommation de gaz naturel d'une étape de procédé :

$$C_{GN_Step,moyen} = 26,2 \text{ dm}^3 \quad (4.27)$$

4.5.4 Consommation de réactifs de la station de traitement

4.5.4.1 Méthode

La consommation de réactifs de la station de traitement des effluents aqueux industriels dépend directement du nombre de steps réalisés. Cependant, vu le fonctionnement de la station, il est très difficile de faire un lien entre un réactif et un type d'étape de procédé.

Pour ces paramètres, nous utilisons donc la même méthode que pour le gaz naturel, à savoir que nous considérons que chaque step réalisé contribue autant à la consommation des réactifs.

$$C_{Réactif\ Station_Step} = \frac{Réactif\ Station}{N_{Total}} \quad (4.28)$$

Avec :

- $C_{Réactif\ Station_Step}$ représente la contribution d'un step processé sur le site à la consommation de réactif de la station de traitement des effluents aqueux industriels, sur la période étudiée
- $Réactif\ Station$ la consommation de réactif de la station de traitement des effluents aqueux industriels sur la période étudiée
- N_{Total} le nombre total de steps processés sur le site sur la période étudiée

4.5.4.2 Exemple pour la consommation d'acide sulfurique (H_2SO_4) de la station de traitement

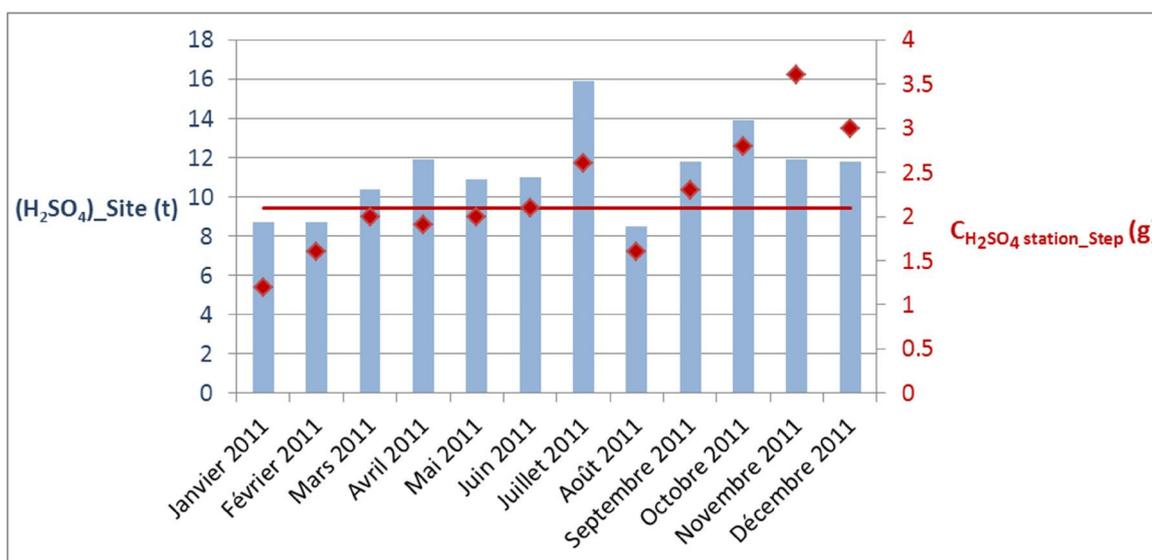


Figure 4. 39 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation d'acide sulfurique de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Sur la figure 4.39, $(H_2SO_4)_{Site}$ représente la consommation d'acide sulfurique de la station de traitement que l'on considère utilisé pour le traitement des effluents aqueux industriels venant du site de Crolles 300.

Les valeurs de $C_{H_2SO_4 Station_Step}$ varient de 1,2 à 3,6 g.

Les écarts à la moyenne varient de 2 à 70 %, avec un écart moyen de 24 %.

Pour ce paramètre, nous retiendrons donc la valeur suivante pour la consommation d'acide sulfurique à la station de traitement d'un step réalisé sur le site :

$$C_{H_2SO_4 Station_Step,moyen} = 2,1 \text{ g} \quad (4.29)$$

4.5.4.3 Résultats sur les réactifs consommés par la station de traitement des effluents aqueux industriels

Le tableau 4.27 ci-dessous présente les contributions moyennes d'une étape de procédé aux consommations de réactifs de la station de traitement des effluents aqueux industriels. Les détails sont présentés en annexe [Annexes A.3.1 à A.3.3].

Réactif	Contribution moyenne d'un step
H_2SO_4	$C_{H_2SO_4 Station_Step,moyen} = 2,1 \text{ g}$
NaOH	$C_{NaOH Station_Step,moyen} = 4,5 \text{ g}$
$CaCl_2$	$C_{CaCl_2 Station_Step,moyen} = 4,4 \text{ g}$
$Ca(OH)_2$	$C_{Ca(OH)_2 Station_Step,moyen} = 4,9 \text{ g}$

Tableau 4. 27 Contributions moyennes d'une étape de procédé à la consommation des réactifs utilisés par la station de traitement des effluents aqueux industriels.

4.5.5 Rejets liquides

4.5.5.1 Méthode

Afin d'estimer la contribution moyenne d'une étape de procédé aux paramètres de rejets liquides, nous procédons comme pour la consommation d'EDI, c'est-à-dire que nous identifions les steps qui ont réellement un impact sur ces rejets. Pour cela, nous étudions les connections aux différents drains sur les PID des équipements, ce qui nous permet de voir sur quels équipements sont réalisés les steps contributeurs. Nous pouvons ainsi déterminer quelles étapes de procédé ont une influence sur les paramètres de rejets liquides du site. Nous supposons que toutes les étapes contributrices ont le même impact.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

4.5.5.2 Exemple pour la charge d'Azote dans les rejets aqueux de la station de traitement

L'Azote est présent dans les effluents en sortie de la station de traitement en raison de son utilisation dans les procédés de fabrication, sous forme d'Ammoniaque (NH_4OH) et d'AM1 (produit chimique liquide utilisé dans l'atelier Wet). Nous faisons donc l'hypothèse que la quantité d'Azote présente dans les rejets aqueux de la station de traitement est largement dépendante du nombre de steps réalisés.

D'après l'étude des PID, les étapes de procédé ayant un impact sur la charge en Azote dans les rejets de la station de traitement sont présentées dans le tableau 4.28 :

Ateliers de production	Steps
CMP	Tous les steps
Wet	Tous les steps

Tableau 4. 28 Etapes de procédé des technologies du site rejetant de l'Azote, par atelier de production.

Il s'agit des steps réalisés dans des équipements connectés au drain ESAM (Effluents Ségrégués AMmoniac) : c'est le cas pour tous les équipements de CMP et une grande partie des équipements de Wet. La distinction entre les différentes étapes de Wet afin de déterminer lesquelles ont un impact sur la charge d'Azote dans les rejets de la station étant difficile, nous considérons que toutes les étapes de Wet sont concernées.

Le nombre de steps par technologie et par atelier ayant un impact sur la charge d'Azote dans les rejets de la station figure sur le graphe ci-dessous (figure 4.40) :

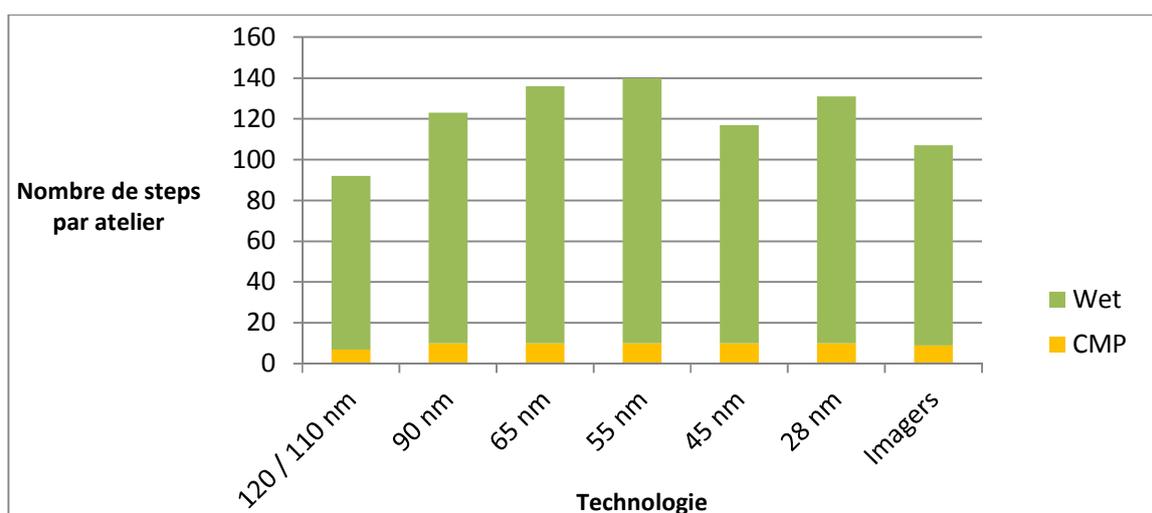


Figure 4. 40 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge d'Azote dans les rejets de la station.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Nous calculons alors la contribution de chaque step C_{Azote_Step} impactant la charge d'Azote dans les rejets de la station attribués au site (figure 4.41).

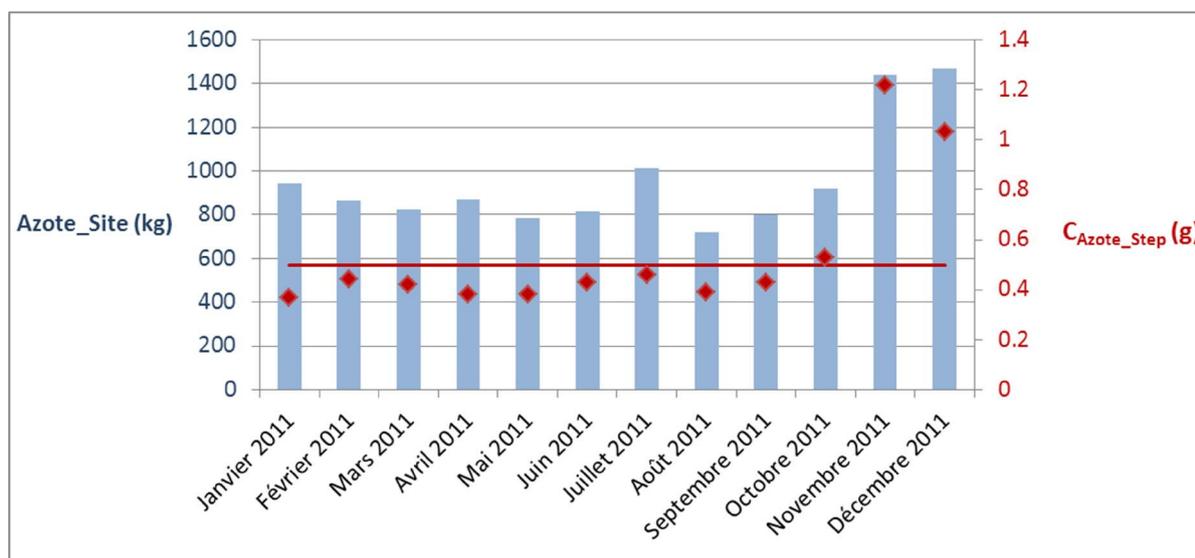


Figure 4. 41 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la charge d'Azote dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

En moyenne sur l'année 2011, un step réalisé sur le site rejette donc 0,5 g d'Azote dans le milieu naturel.

Les valeurs de C_{Azote_Step} varient de 0,37 à 1,22 g.

Les écarts à la moyenne varient de 6 à 144 %, avec un écart moyen de 35 %.

Nous observons des valeurs de C_{Azote_Step} plus importantes pour les mois de Novembre et Décembre 2011 (alors que cette valeur est relativement stable de Janvier à Octobre). Cela peut s'expliquer par le fait qu'au mois d'Octobre, le traitement biologique (entre autres utilisé pour le traitement de l'Azote dans les effluents) a été modifié (injection de réactifs), ce qui a augmenté la charge en Azote dans les rejets finaux (tout en restant très inférieur aux seuils réglementaires).

De plus, nous faisons l'hypothèse que la moitié des rejets de la station de traitement est issue de l'activité de Crolles 300. Cela vient du fait que les débits venant de Crolles 200 et de Crolles 300 et arrivant à la station de traitement sont à peu près équivalents, mais cette hypothèse pourrait être affinée : en effet, les technologies, et donc les effluents, sont différents entre les deux sites.

Pour ce paramètre, nous retiendrons donc la valeur suivante pour la contribution d'une étape de procédé à la charge en Azote dans les rejets de la station de traitement attribués au site :

$$C_{Azote_Step,moyen} = 0,5 \text{ g} \quad (4.30)$$

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Limite de la méthode :

Nous avons considéré que tous les steps réalisés dans l'atelier Wet ont un impact sur la charge d'Azote dans les rejets liquides de la station de traitement. Or certaines étapes de Wet ne contribuent pas à ce paramètre.

4.5.5.3 Résultats sur les rejets liquides de la station de traitement des effluents aqueux industriels

La contribution moyenne d'une étape de procédé aux rejets liquides de la station de traitement est présentée dans le tableau 4.29 suivant. Les détails pour les rejets de Fluorure et de Cuivre figurent en annexe [Annexes A.3.4 et A.3.5].

Rejet liquide	Steps contributeurs	Contribution moyenne d'un step
Azote	- CMP : tous les steps - Wet : tous les steps - Diel : tous les steps - Wet : tous les steps	$C_{Azote_Step,moyen} = 0,5 \text{ g}$
Fluorure	- Traitement Thermique : tous les steps - Etch : tous les steps - Métal : steps de dépôt de Tungstène	$C_{Fluorure_Step,moyen} = 0,19 \text{ g}$
Cuivre	- CMP : steps de CMP Cuivre - Métal : steps de dépôt de Cuivre	$C_{Cuivre_Step,moyen} = 37,2 \text{ mg}$

Tableau 4. 29 Steps contributeurs et contributions moyennes d'un step aux rejets liquides de la station de traitement des effluents aqueux industriels.

4.5.6 Rejets gazeux

4.5.6.1 Méthode

Nous procédons de la même façon que pour les rejets liquides pour estimer la contribution moyenne d'une étape de procédé aux paramètres de rejets atmosphériques : nous étudions les connections aux différents exhausts sur les PID des équipements, ce qui nous permet de voir sur quels équipements sont réalisés les steps contributeurs. Nous pouvons ainsi déterminer quelles étapes ont une influence sur les paramètres de rejets atmosphériques du site. Nous supposons que toutes les étapes contributrices ont le même impact.

4.5.6.2 Exemple pour la charge d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques

L'Ammoniac présent dans les effluents en sortie de la station de traitement vient de l'utilisation d'Ammoniac gazeux (NH_3) ou d'Ammoniaque liquide (NH_4OH , qui peut s'évaporer) pendant des étapes de procédé. Les effluents gazeux contenant de l'Ammoniac sont ségrégués et dirigés vers des laveurs adaptés via les exhausts Ammoniac (EXNH).

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Les étapes de procédé contribuant à la charge d'Ammoniac en sortie des laveurs Ammoniac sont réalisées dans les ateliers suivants (tableau 4.30) :

Ateliers de production	Steps
CMP	Tous les steps
Photolithographie	Tous les steps
Wet	Tous les steps

Tableau 4. 30 Etapes des technologies du site rejetant de l'Ammoniac, par atelier de production.

Les équipements de CMP sont connectés à l'EXNH car une partie du process (nettoyage des wafers) utilise de l'Ammoniaque, et qu'il y a des dégagements gazeux d'Ammoniac.

Concernant l'atelier Photolithographie, c'est l'utilisation d'un développeur qui provoque des dégagements d'Ammoniac.

Nous avons également identifié des steps de l'atelier Diel qui consomment de l'Ammoniac, mais ceux-ci sont brûlés par des POU. Les effluents issus de ce traitement sont ensuite dirigés vers l'exhaust Acide (EXA).

Les steps réalisés dans l'atelier Wet ont été identifiés comme contributeurs à la charge d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques car certaines de ces étapes utilisent de l'AM1 et de l'Ammoniaque (NH₄OH), dont une partie s'évapore.

Le nombre d'étapes de procédé ayant un impact sur la charge d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques du site est présenté sur la figure 4.42 :

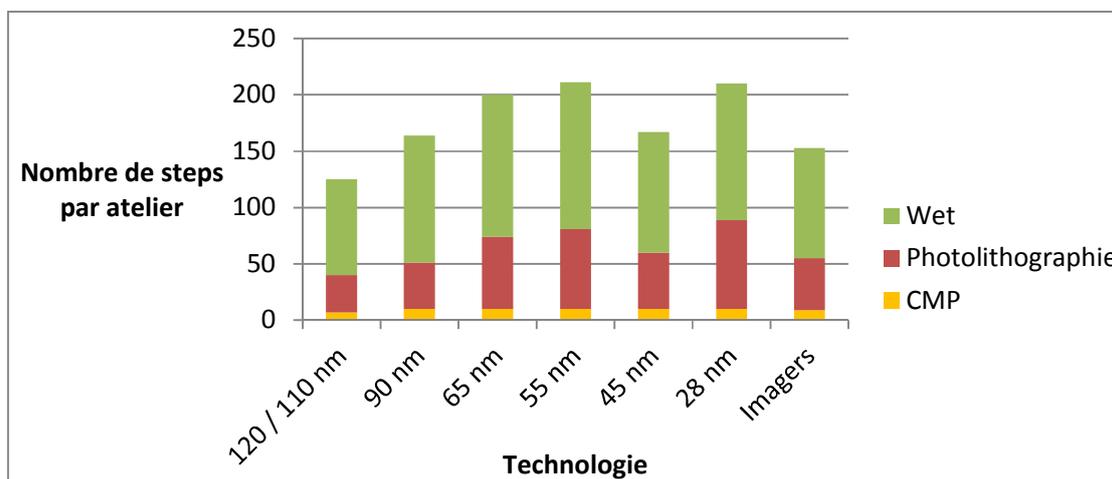


Figure 4. 42 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

La figure 4.43 présente la contribution $C_{\text{Ammoniac_Step}}$ de chaque step impactant la charge d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques du site, pour chaque trimestre de l'année 2011.

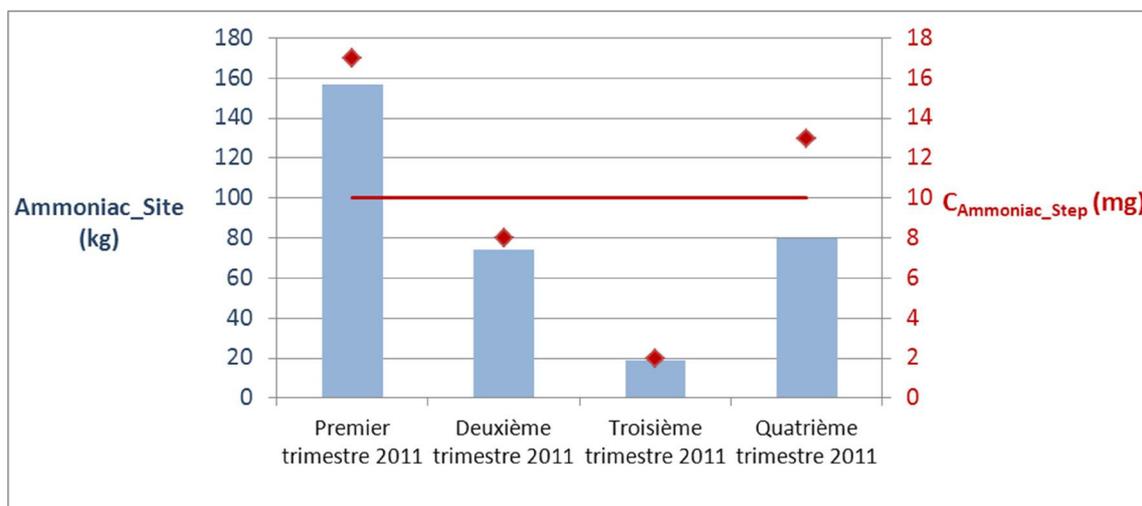


Figure 4.43 Contributions trimestrielles d'une étape de procédé à la charge d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques pour l'année 2011.

En moyenne sur l'année 2011, un step réalisé sur le site rejette donc 16 mg d'Ammoniac dans le milieu naturel.

Les valeurs de $C_{\text{Ammoniac_Step}}$ varient de 2 à 17 mg.

Les écarts à la moyenne varient de 18 à 77 %, avec un écart moyen de 48 %.

Les écarts entre les différentes valeurs de $C_{\text{Ammoniac_Step}}$ sont importants. Cela peut s'expliquer par le fait que pour ce paramètre, comme pour tous les paramètres de rejet atmosphérique, les données sont obtenues grâce à une mesure sur quelques heures chaque trimestre, ce qui n'est sans doute pas assez fin pour notre analyse.

Par ailleurs, nous n'avons comptabilisé que l'Ammoniac en sortie des laveurs Ammoniac, alors que nous constatons également la présence d'Ammoniac en sortie des laveurs Acides, en fonction des connexions sur les équipements. Cependant, la majorité de l'Ammoniac rejeté dans le milieu naturel par le site passe par les EXNH et les laveurs Ammoniac.

Pour ce paramètre, nous retiendrons donc la valeur suivante pour la contribution d'une étape de procédé à la charge en Ammoniac dans les rejets atmosphériques du site :

$$C_{\text{Ammoniac_Step,moyen}} = 10 \text{ mg} \quad (4.31)$$

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Limite de la méthode

Nous avons tenu compte de tous les steps réalisés dans l'atelier Wet du site pour ce paramètre. En réalité, toutes ces étapes n'ont pas d'impact sur la charge d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques (tous les steps ne consomment pas de substances pouvant rejeter de l'Ammoniac).

4.5.6.3 Résultats sur les rejets gazeux

La contribution moyenne d'une étape de procédé aux rejets atmosphériques des laveurs de gaz est présentée dans le tableau 4.31 suivant. Les détails pour les rejets de Chlorure d'Hydrogène, de Fluor et de COV figurent en annexe [Annexes A.3.6 à A.3.8].

Rejet liquide	Steps contributeurs	Contribution moyenne d'un step
Ammoniac	- CMP : tous les steps - Photolithographie : tous les steps - Wet : tous les steps	$C_{Ammoniac_Step,moyen} = 10\text{ mg}$
Chlorure d'Hydrogène	- Traitement Thermique : tous les steps - Etch : tous les steps - Wet : tous les steps	$C_{Chlorure_Step,moyen} = 6,3\text{ mg}$
Fluor	- Métal : tous les steps - Etch : tous les steps - Dry Stripping : tous les steps - Diel : tous les steps - Wet : tous les steps - Implantation Ionique : steps de dopage au Fluor	$C_{Fluor_Step,moyen} = 5,4\text{ mg}$
COV	- CMP : tous les steps - Photolithographie : tous les steps	$C_{COV_Step,moyen} = 22,2\text{ mg}$

Tableau 4. 31 Steps contributeurs et contributions moyennes d'un step aux rejets atmosphériques des laveurs de gaz.

4.5.7 Conclusion

Afin d'estimer la contribution de chaque étape de procédé réalisée sur le site aux différents paramètres de consommation et de rejet du site et de la station de traitement, nous les avons différenciées en fonction des connexions des équipements sur lesquels elles étaient réalisées. Cela nous a permis de montrer que tous les steps réalisés sur le site n'avaient pas les mêmes impacts environnementaux.

4.6 Seconde évaluation : bilan de la contribution de la technologie 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet du site pour l'année 2011

Cette distinction de différents types de steps en fonction des impacts environnementaux du site auxquels ils contribuent nous permet d'améliorer la précision de la contribution de la technologie 45 nm aux impacts environnementaux du site, présentée au paragraphe 4.4, pour certains paramètres.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

En effet, dans cette partie, nous avons considéré que toutes les étapes de procédé contribuaient à tous les impacts environnementaux du site. Grâce aux résultats obtenus dans le paragraphe 4.5, nous pouvons accéder à la contribution de la technologie 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet du site en fonction des catégories de steps qui la composent.

Nous utilisons la relation suivante :

$$Paramètre_{45} = C_{Paramètre_Step,moyen} \times N_{Paramètre_{45}} \quad (4.32)$$

Où :

- $C_{Paramètre_Step,moyen}$ représente la contribution d'un step à un paramètre de consommation ou de rejet du site,
- $N_{Paramètre_{45}}$ est le nombre total de steps 45 nm traité ayant un impact sur ce paramètre sur la période étudiée

On peut exprimer $N_{Paramètre_{45}}$ de la façon suivante :

$$N_{Paramètre_{45}} = n_{Paramètre_{45}} \times S_{45} \quad (4.33)$$

Avec :

- $n_{Paramètre_{45}}$ le nombre de steps de la technologie 45 nm contribuant à ce paramètre
- S_{45} le nombre de Starts de wafers de la technologie 45 nm sur la période étudiée

Par ailleurs, l'étude plus fine de la consommation d'électricité du site nous permet également d'améliorer la précision de l'estimation de la contribution de la technologie 45 nm aux impacts environnementaux du site (tableau 4.32).

Paramètre	$C_{Paramètre_Step,moyen}$	$N_{Paramètre_{45}}$	S_{45}	Paramètre_45
Consommation d'électricité	1,3 kWh	356	24 646	11 406 169 kWh
Consommation d'EDI	16,6 dm ³	180	24 646	73 642 m ³
Rejets d'Azote	0,5 g	117	24 646	1 441 kg
Rejets de Fluorure	0,19 g	208	24 646	974 kg
Rejets de Cuivre	37,2 mg	14	24 646	12,8 kg
Rejets d'Ammoniac	10 mg	167	24 646	41,2 kg
Rejets de Chlorure d'Hydrogène	6,3 mg	159	24 646	24,7 kg
Rejets de Fluor	6,4 mg	243	24 646	38,3 kg
Rejets de COV	22,2 mg	60	24 646	32,8 kg

Tableau 4. 32 Contribution de la technologie 45 nm aux impacts environnementaux du site pour l'année 2011.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Nous pouvons alors représenter les flux entrants et sortants de la technologie 45 nm par rapport à ceux du site pour l'année 2011 (hors produits chimiques utilisés pour le process des wafers) :

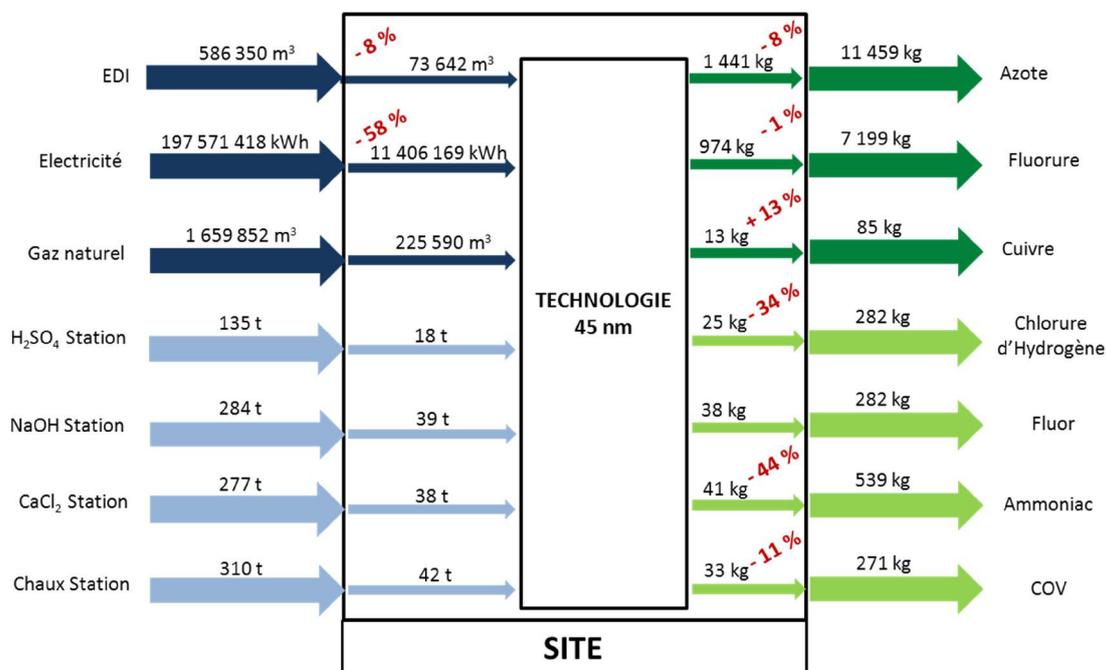


Figure 4.44 Réévaluation de la contribution de la technologie 45 nm aux impacts environnementaux du site pour l'année 2011.

Sur la figure 4.44, nous voyons la contribution de la technologie 45 nm aux flux entrants et sortants du site sur lequel elle est réalisée. L'intérêt de ces informations est de maîtriser plus finement les impacts environnementaux du site, en connaissant la part imputable à une technologie. Les valeurs indiquées en rouge correspondent à l'évolution de la contribution de la technologie 45 nm aux flux « site » entre les deux modèles (figures 4.31 et 4.44).

La différence entre ce résultat et la première approximation de la contribution de la technologie 45 aux impacts environnementaux du site (figure 4.31) est l'intégration de précisions sur les étapes de procédé des technologies. Dans le premier modèle, nous avons supposé que tous les steps de toutes les technologies du site contribuaient autant aux flux entrants et sortants. Les flux pour la technologie 45 nm ont donc été obtenus en tenant compte uniquement du nombre de steps du produit majoritaire et du nombre de wafers réalisés sur une période. Dans ce cas, le rapport entre les flux entrants et sortants de la technologie 45 nm et ceux du site est le même pour tous les paramètres.

Pour ce second modèle, nous avons affiné l'attribution des flux site à la technologie 45 nm, de différente façon selon les paramètres. Pour la consommation d'électricité, nous avons déterminé une part fixe qui n'est pas liée au process des wafers, et nous avons réparti également la part variable sur toutes les

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

étapes réalisées sur le site. Concernant la consommation d'EDI, et les rejets liquides et gazeux, nous avons identifié les étapes contributrices, et nous avons supposé qu'elles participaient toutes autant à ces paramètres. Quant à la consommation de gaz naturel et de réactifs utilisés par la station de traitement des effluents aqueux industriels, nous avons gardé le même mode de répartition que dans le premier modèle.

Nous pouvons alors regrouper les étapes de procédé en fonction de leur contribution moyenne aux différents paramètres de consommation et de rejet du site, et représenter cela sous forme d'un diagramme de flux (figure 4.45 ci-dessous). Nous avons identifié onze groupes de steps.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

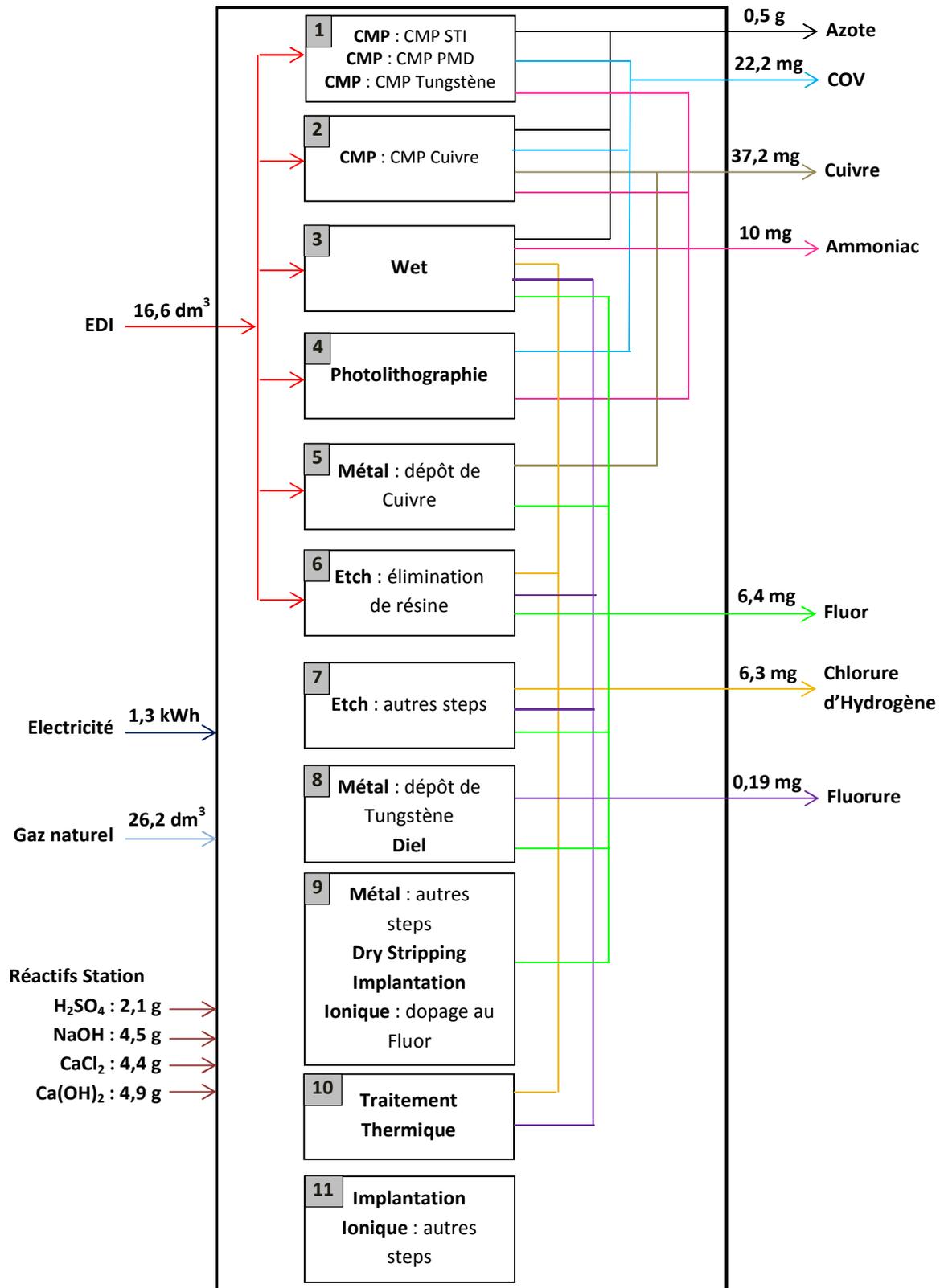


Figure 4. 45 Contribution moyenne des étapes de procédé aux paramètres de consommation et de rejet.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Pour la technologie 45 nm, la répartition des étapes de procédé en fonction de leur contribution aux paramètres de consommation et de rejet est présentée dans le tableau 4.33 :

Paramètre	Groupes de steps	Nombre de steps par groupe	Contribution par step	Contribution pour le 45 nm
Electricité	Tous les steps	356	1,3 kWh	462,8 kWh
Gaz naturel	Tous les steps	356	26,2 dm ³	9327,2 dm ³
H₂SO₄ Station	Tous les steps	356	2,1 g	747,6 g
NaOH Station	Tous les steps	356	4,5 g	1602 g
CaCl₂ Station	Tous les steps	356	4,4 g	1566,4 g
Ca(OH)₂ Station	Tous les steps	356	4,9 g	1744,4 g
EDI	Groupe 1	3	16,6 dm ³	2988 dm ³
	Groupe 2	7		
	Groupe 3	107		
	Groupe 4	50		
	Groupe 5	7		
	Groupe 6	6		
Azote	Groupe 1	3	0,5 g	58,5 g
	Groupe 2	7		
	Groupe 3	107		
Fluorure	Groupe 3	107	0,19 g	39,52 g
	Groupe 6	6		
	Groupe 7	21		
	Groupe 8	54		
	Groupe 10	20		
Cuivre	Groupe 2	7	37,2 mg	520,8 mg
	Groupe 5	7		
Ammoniac	Groupe 1	3	10 mg	1670 mg
	Groupe 2	7		
	Groupe 3	107		
	Groupe 4	50		
Chlorure d'Hydrogène	Groupe 3	107	6,3 mg	970,2 mg
	Groupe 6	6		
	Groupe 7	21		
	Groupe 10	20		
Fluor	Groupe 3	107	6,4 mg	1555,2 mg
	Groupe 5	7		
	Groupe 6	6		
	Groupe 7	21		
	Groupe 8	54		
	Groupe 9	48		
COV	Groupe 1	3	22,2 mg	1332 mg
	Groupe 2	7		
	Groupe 4	50		

Tableau 4. 33 Contribution moyenne d'un wafer 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet.

Chapitre 4 – Estimation des flux entrants et sortants pour une technologie microélectronique : l'exemple de la technologie 45 nm

Grâce à cette modélisation, nous pouvons maintenant définir des indicateurs adaptés aux procédés du site, afin de donner des outils permettant aux concepteurs des futures technologies microélectroniques d'intégrer des paramètres environnementaux pendant leur phase de développement.

5. DEFINITION D'INDICATEURS ET D'OUTILS ENVIRONNEMENTAUX POUR L'AIDE A L'ECO-CONCEPTION DES FUTURES TECHNOLOGIES MICROELECTRONIQUES

Nous avons vu dans la revue bibliographique que les concepteurs des équipes de R&D manquaient de méthodes pour éco-concevoir les technologies microélectroniques, notamment parce qu'il est difficile d'évaluer leurs impacts environnementaux dès la phase de développement. Les concepteurs ont par ailleurs besoin d'indicateurs adaptés aux données qu'ils manipulent au quotidien, qui ne se focalisent pas uniquement sur des critères environnementaux mais intègrent également des paramètres techniques. Ce chapitre sera ainsi consacré à la proposition d'indicateurs et d'outils environnementaux dans le cadre d'une démarche d'éco-conception des technologies sur un site de fabrication microélectronique.

5.1 Définition d'indicateurs environnementaux pour l'éco-conception des technologies microélectroniques

5.1.1 Objectifs des indicateurs environnementaux

La mise en place d'indicateurs environnementaux a pour but d'aider les concepteurs à éco-concevoir les technologies microélectroniques développées, en tenant compte de l'impact environnemental des procédés de fabrication dès les premières étapes de leur développement. Différents acteurs seront impliqués dans cette démarche, dont le service ESH qui gère tous les aspects risque et environnement du site, les équipes de R&D qui conçoivent les routes des technologies, et les équipes de support à la Production en charge de ces technologies après leur industrialisation. Les indicateurs et outils environnementaux présentés dans ce chapitre ont comme intérêt majeur de renforcer les liens entre le service ESH, qui suit les impacts environnementaux du site, et les équipes des Opérations (c'est-à-dire les équipes de R&D et de support à la Production) qui maîtrisent les données liées aux technologies microélectroniques développées et réalisées sur le site.

Les intérêts des indicateurs sont les suivants :

- Service ESH : connaissances techniques sur les technologies, et informations sur la part des procédés de fabrication microélectronique dans les impacts environnementaux du site
- R&D : outils pour intégrer des aspects environnementaux dans le développement de nouvelles technologies
- Production : suivi des impacts environnementaux des technologies après leur industrialisation (celles-ci n'étant pas systématiquement stabilisées lorsqu'elles passent en production).

5.1.2 Utilisation des indicateurs environnementaux

La définition de ces indicateurs environnementaux sera accompagnée de préconisations d'utilisation, afin d'assurer leur mise en œuvre et leur pérennité sur le site : méthode de collecte de données,

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

périodes de mise à jour, acteurs impliqués. La méthode d'accès à ces données par les utilisateurs des outils d'éco-conception sera donc définie dans ce chapitre. Les moments d'utilisation au cours du développement des technologies, ainsi que les contributeurs au calcul des indicateurs, seront également précisés. L'ESH coordonnera les informations fournies par les différents acteurs, et s'assurera du suivi et de la mise à jour des indicateurs.

5.1.3 Forme des indicateurs environnementaux

Les indicateurs permettront de suivre l'évolution des performances environnementales avec les avancées technologiques, en comparant la technologie en cours de développement avec celles précédemment conçues sur le site, au même stade de la vie des technologies. En effet, la norme sur l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit rappelle qu'il est important d'établir des systèmes de référence environnementale en fonction de générations précédentes de procédés [ISO, 2002]. Cet aspect est également mentionné par Griese, qui écrit qu'il est essentiel d'améliorer l'efficacité environnementale des nouveaux produits et procédés de fabrication en comparaison avec d'anciens modèles [Griese, 2004].

Afin de présenter la forme finale des indicateurs environnementaux proposés, nous comparerons dans ce chapitre les technologies 45 et 28 nm, les calculs ayant été effectués en majorité à partir des données correspondant à leur avancement en fin d'année 2012 : la technologie 45 nm est industrialisée depuis le premier trimestre 2010, et la technologie 28 nm est à mat. 20 (elle évoluera donc encore avant d'être stabilisée).

5.1.4 Communication

Il est enfin nécessaire de communiquer sur la stratégie d'éco-conception de l'entreprise. Comme nous l'avons mentionné dans la revue bibliographique, on constate généralement un manque de communication et d'échange entre ceux qui supportent les méthodes et outils (le service ESH dans notre cas), et ceux qui les exécutent (les équipes de R&D et de support à la Production) [Pascual, 2003]. Or selon Lindahl, la visualisation des résultats des démarches d'éco-conception est l'un des facteurs indispensables pour rendre les méthodes et outils attractifs, et ainsi pour assurer leur diffusion et leur utilisation [Lindahl, 2006]. Afin que ces indicateurs soient communiqués au plus grand nombre de personnes, nous proposons donc de créer une application dédiée aux indicateurs environnementaux sur le site intranet de l'entreprise.

5.2 Types d'indicateurs et accès aux données

Dans le chapitre précédent, nous avons modélisé une technologie microélectronique développée et industrialisée sur le site. L'identification et la quantification des flux entrants et sortants nous ont permis

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

de définir les paramètres techniques et environnementaux pertinents à suivre pour évaluer les impacts environnementaux des procédés de fabrication.

5.2.1 Trois types d'indicateurs

Nous avons ainsi formalisé plusieurs indicateurs que nous avons regroupés en trois catégories, selon les données sur lesquelles ils sont basés :

- Les indicateurs Procédés
- Les indicateurs Environnement
- Les indicateurs Chimie

Les paragraphes suivants seront consacrés à la présentation des données nécessaires pour le calcul de ces indicateurs.

5.2.2 Accès aux données pour les indicateurs Procédés

Les indicateurs Procédés sont calculés à partir de caractéristiques techniques des technologies : le nombre de steps par atelier de production, et les volumes de produits chimiques consommés pendant ces étapes de procédé.

5.2.2.1 Nombre de steps par atelier de production

Le nombre de steps par atelier est obtenu à partir de la route du produit majoritaire de la technologie étudiée. Cette route est accessible depuis l'intranet du site, *via* l'application Safir (système de gestion informatique de la production). Cependant, la route d'une nouvelle technologie n'est écrite que lorsque celle-ci est suffisamment avancée : selon le moment du développement de la technologie auquel les indicateurs environnementaux seront calculés, si la route n'est pas encore disponible, le nombre de steps devra être collecté directement auprès des équipes R&D.

5.2.2.2 Volumes de produits chimiques consommés pendant les steps

Les consommations de produits chimiques pour le process des wafers sont issues des recettes de production. Nous avons vu dans le chapitre précédent que la collecte et l'exploitation de ces recettes prenaient beaucoup de temps ; il est en effet nécessaire de passer par les spécialistes de chaque étape de procédé pour obtenir les recettes, et pour les interpréter. Les calculs des volumes de produits chimiques consommés par les procédés de la technologie 45 nm ont été effectués de cette façon.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Cette méthode n'est pas adaptée pour supporter des indicateurs environnementaux (calculs trop longs, nombreuses ressources nécessaires, incertitude sur la disponibilité des informations), et ne permet pas leur mise à jour rapide et fiable, à plusieurs moments du développement des technologies.

Nous avons donc cherché à utiliser des outils disponibles sur le site afin de proposer une méthodologie d'accès aux recettes de production reproductible, et donc industrialisable. Pour certaines étapes de la route de la technologie 28 nm, nous avons ainsi utilisé un outil non-officiel, keRMeSse, développé par un membre de l'atelier Métal à partir du système de gestion des recettes du site, RMS.

Initiative individuelle : keRMeSse

Toutes les recettes de R&D et de production sont regroupées dans un système de gestion appelé RMS (Recipe Management System), et peuvent être extraites au format XML. Ce langage rend cependant la compréhension des recettes quasiment impossible pour les non-spécialistes des procédés.

Un employé d'un atelier a donc développé l'outil keRMeSse, qui traduit les recettes XML au format Excel. keRMeSse n'est pas une application officielle diffusée sur le site, mais elle y est pourtant utilisée. Cet outil est intéressant pour notre travail puisqu'il permet d'accéder simplement au détail des produits chimiques consommés pour chaque step, sous une forme lisible et exploitable. Toutes les recettes ne sont pas accessibles aujourd'hui *via* keRMeSse (notamment en raison du type de fonctionnement de certains équipements), et des informations complémentaires sont parfois encore indispensables. Cela prouve cependant qu'une grande partie du travail de collecte des données pourrait être réalisée par le service ESH.

Nous avons par ailleurs travaillé sur cet outil pour simplifier davantage la récupération des données. keRMeSse a ainsi été complété dans un atelier-test par une fonction calculant automatiquement, pour chaque step, les volumes de produits chimiques consommés.

Précisons que keRMeSse n'a pas été développé spécialement dans le cadre du projet d'éco-conception des technologies, mais pour simplifier le travail des personnes ayant à manipuler fréquemment les recettes de production. La mise en œuvre de cet outil aurait donc des intérêts pour de multiples acteurs sur le site.

5.2.3 Accès aux données pour les indicateurs Environnement

Les indicateurs Environnement sont basés à la fois sur des données globales, à savoir les consommations et rejets du site, et sur des caractéristiques techniques des technologies : nombre de steps, quantités de gaz à effet de serre (GES) consommés durant le process des wafers.

Les données globales, c'est-à-dire connues au niveau du site, sont les suivantes : consommation d'électricité, consommation d'eau désionisée (EDI), consommation de réactifs par la station de traitement des effluents aqueux industriels, rejets aqueux et rejets atmosphériques.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Les données disponibles au niveau du site pour le calcul des indicateurs Environnement apparaissent dans le tableau 5.1 suivant, présentés dans le chapitre 4 :

Paramètre	Type de données disponibles	Source des données
Consommation d'électricité	Mensuelle Site	Factures (Tableau de suivi pour le reporting au Corporate)
Consommation d'eau désionisée (EDI)	Mensuelle Site	Compteurs (Tableau de suivi pour le reporting au Corporate)
Consommation de réactifs de la station de traitement	Mensuelle Station	Tableau de bord Environnement Ondéo
Rejets atmosphériques	Trimestrielle Site	Rapports d'analyses
Rejets aqueux	Mensuelle Station	Tableau de bord Environnement Ondéo

Tableau 5. 1 Type de données disponibles pour les différents paramètres sur le site.

Les sources de ces données sont disponibles pour le service ESH.

L'accès au nombre de steps par atelier a été présenté dans le paragraphe précédent. Les volumes de gaz à effet de serre consommés pendant le process des wafers s'obtiennent à partir des recettes de production.

5.2.4 Accès aux données pour les indicateurs Chimie

Les indicateurs Chimie nécessitent l'accès à des documents sur les produits chimiques que l'on souhaite introduire sur le site. Ces documents sont les suivants : fiches de données de sécurité, et procédure *Achat / entrée de nouveaux produits chimiques*. Les fiches de données de sécurité des produits que l'on souhaite introduire sur le site sont obtenues auprès des fournisseurs proposés par le demandeur. La procédure *Achat / entrée de nouveaux produits chimiques* est disponible à partir du système de gestion documentaire de l'entreprise.

L'outil Chimie, supportant les indicateurs Chimie, est par ailleurs basé sur plusieurs documents : *Banned, exempted and declarable substances lists* (Listes des substances interdites, exemptées et soumises à déclaration, document interne à la compagnie STMicroelectronics), *Chemical Risk Assessment* (Analyse du risque chimique, document interne à la compagnie STMicroelectronics), et l'arrêté préfectoral du site. Ces documents sont disponibles via le système de gestion documentaire du site. L'arrêté préfectoral est un document public, accessible sur internet, sur l'intranet du site, et en version papier au service ESH.

Nous présenterons plus précisément ces textes dans le paragraphe Définition et utilisation des indicateurs.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Nous allons maintenant présenter les différents types d'indicateurs environnementaux d'aide à l'éco-conception des nouvelles technologies microélectronique.

5.3 Définition et utilisation des indicateurs

5.3.1 Indicateurs Procédés

Nous avons vu que le nombre d'étapes de procédé était une caractéristique des technologies microélectroniques, qui sont constituées d'une somme de steps. Il s'agit de la plus petite unité pouvant décrire les technologies microélectroniques. Afin d'évaluer précisément les impacts environnementaux des technologies, il est nécessaire de connaître les entrants et sortants de ces étapes de procédé.

Nous proposons donc deux indicateurs, que nous appellerons indicateurs Procédés car ils sont associés aux caractéristiques techniques des technologies microélectroniques : un indicateur permettant le suivi du nombre de steps des technologies, dans leur ensemble (c'est-à-dire pour les neuf ateliers de production étudiés) et par atelier, et un indicateur comptabilisant les volumes de produits chimiques consommés par ces steps.

5.3.1.1 Nombre de steps

Le premier indicateur environnemental que nous proposons d'intégrer au processus de développement d'une nouvelle technologie est donc le nombre de steps de cette technologie, dans chacun des neuf ateliers de production étudiés dans le chapitre précédent.

Intérêts

Aux différentes étapes du développement d'une nouvelle technologie, les équipes de R&D auront donc accès au nombre de steps par atelier du produit majoritaire de cette technologie, comparé au nombre de steps de la technologie précédente. Puisque l'on considère que le nombre de steps des technologies influe directement leurs impacts environnementaux, ce qui est notamment suggéré par Yao qui relie la quantité d'énergie et de matière consommée au nombre d'étapes et donc à la complexité des technologies [Yao, 2004], cela permettra d'intégrer un indicateur lié à l'environnement à un process axé sur la technique et les coûts, et donc de faire prendre conscience aux équipes de R&D du fait que les technologies microélectroniques, *via* les steps qui les composent, ont un impact environnemental.

Le principal intérêt de cet indicateur pour le service ESH est d'avoir, dès le début du développement d'une nouvelle technologie, des informations sur ses caractéristiques techniques. La comparaison de l'indicateur *Nombre de steps* au même stade d'avancement du développement des technologies permettra également d'anticiper les futurs impacts environnementaux des technologies réalisées sur le site, et d'établir un lien entre le nombre de steps des technologies et l'évolution des impacts environnementaux du site.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

→ *Exemple* : si le pôle Environnement observe qu'il y a plus de Cuivre à traiter à la station de traitement, il a rapidement les moyens de chercher une éventuelle corrélation entre ce constat et le passage en production d'une nouvelle technologie dont le nombre de niveaux de Cuivre est supérieur à celui des technologies précédentes.

Formalisation

L'indicateur *Nombre de steps* montre donc le nombre d'étapes de procédé d'une nouvelle technologie, par atelier de production, à des moments précis de son développement. Ce nombre de steps est comparé à celui de la technologie précédemment développée, à la même étape de développement. L'indicateur *Nombre de steps* a la forme suivante :

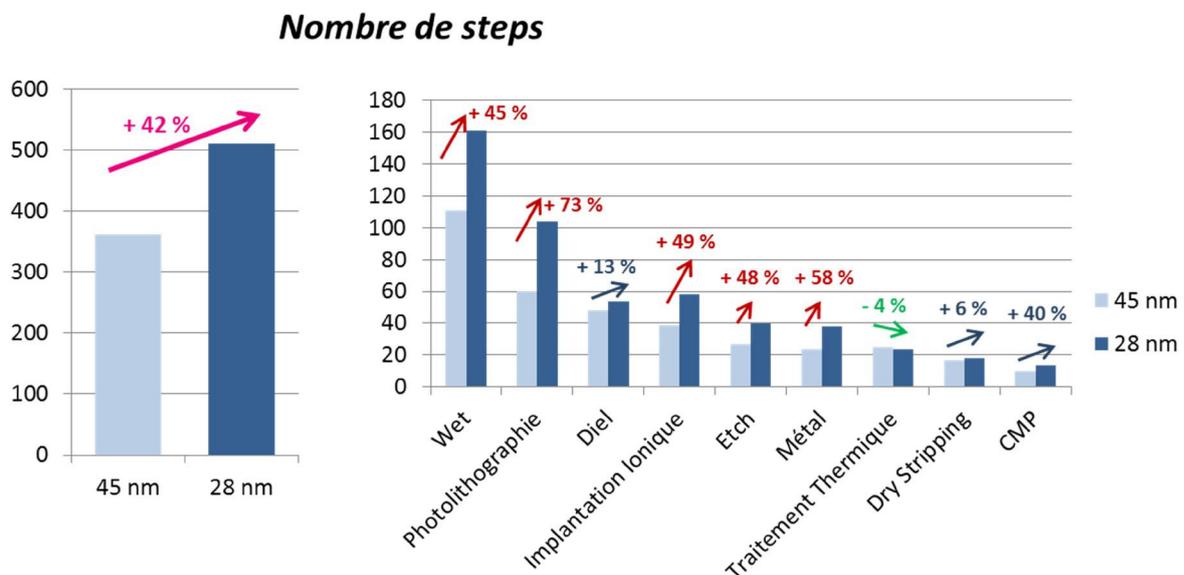


Figure 5. 1 Indicateur Nombre de steps global et par atelier pour les technologies microélectroniques 45 et 28 nm.

Ce graphe (figure 5.1) montre l'évolution du nombre d'étapes de procédé entre la dernière technologie développée sur le site et la technologie en cours de développement. L'indicateur suit également l'évolution du nombre de steps pour chaque atelier entre ces deux technologies : sur cette figure, les évolutions sont représentées par une flèche rouge lorsque le nombre de steps de l'atelier augmente davantage entre les technologies 45 et 28 nm que l'augmentation globale. Lorsque l'augmentation par atelier est inférieure à l'augmentation globale, les flèches sont bleues. Enfin lorsque le nombre de steps diminue entre ces deux technologies pour un atelier, la flèche est verte.

Pour cet indicateur, nous avons utilisé le nombre d'étapes de procédé de la route majoritaire de la technologie 28 nm en 2013.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Nous constatons ainsi une augmentation de 42 % du nombre de steps entre les technologies 45 et 28 nm. Grâce à cet indicateur détaillé par atelier, nous voyons que cette tendance n'est pas la même pour tous les types de procédés : le nombre de steps a beaucoup augmenté pour les ateliers Photolithographie, Métal, Implantation Ionique, Etch, Wet et CMP (entre 40 et 73 %), légèrement augmenté pour les ateliers Diel et Dry Stripping (respectivement 13 et 6 %), et a diminué en Traitement Thermique (moins 6 %).

Acteurs et utilisation

Le nombre d'étapes de procédé d'une technologie en cours de développement évoluant très souvent, nous proposons de calculer plusieurs fois l'indicateur *Nombre de steps* sur la période de développement d'une nouvelle technologie, depuis son démarrage jusqu'à son industrialisation.

D'après le processus de développement des nouvelles technologies sur le site, nous avons défini des moments précis pour calculer l'indicateur *Nombre de steps* : à chaque changement de maturité des nouvelles technologies, cet indicateur sera mis à jour et intégré dans les rapports écrits à ces occasions. Nous proposons enfin de calculer cet indicateur après six mois d'industrialisation de chaque nouvelle technologie, lorsque l'on peut considérer que la technologie est stabilisée (c'est-à-dire sans changements majeurs dans les steps). En cas de changement important de process au-delà de cette période, les indicateurs environnementaux seront recalculés. Cela permettra de voir l'évolution des impacts environnementaux d'une technologie entre la fin du développement de cette technologie et après six mois d'industrialisation. Nous pourrions alors mesurer l'ampleur des modifications effectuées sur les technologies lors de leurs premiers mois d'industrialisation, et voir l'impact de leur montée en volume.

L'indicateur *Nombre de steps* sera utilisé prioritairement par les équipes de R&D et de support à la Production, ainsi que par le service ESH, plus particulièrement le Pôle Environnement. Les rôles de ces acteurs et la nature de leurs interactions sont présentés dans la figure 5.2 suivante :

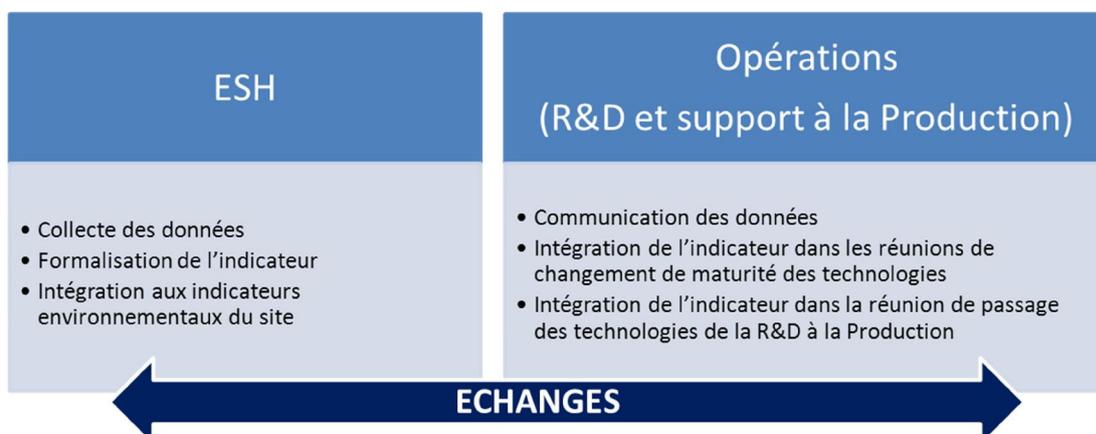


Figure 5. 2 Suggestion d'utilisation de l'indicateur *Nombre de steps* par les différents acteurs du site.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Le service ESH a la maîtrise de l'indicateur : il le formalise avant chaque réunion de changement de maturité ainsi qu'avant la réunion de passage de la technologie en Production. De plus, l'indicateur *Nombre de steps* pourra être intégré aux indicateurs environnementaux du site.

Les équipes de R&D de chaque atelier devront communiquer les données nécessaires à l'élaboration de l'indicateur environnemental au service ESH si celles-ci ne sont pas disponibles sur *Safir*.

Les équipes de support à la Production suivront l'indicateur *Nombre de steps* dès la réunion d'industrialisation de la nouvelle technologie, mais pourront y accéder pendant son développement grâce à l'application que nous proposons de créer sur le site intranet. Elles serviront de support au service ESH pour la formalisation de l'indicateur après six mois d'industrialisation de la nouvelle technologie.

5.3.1.2 Consommation de produits chimiques pendant les steps

Intérêts

Maîtriser les consommations de produits chimiques des technologies développées permet en premier lieu à la R&D d'avoir conscience des impacts environnementaux de leurs choix techniques.

Ces informations sont également utiles pour identifier les étapes les plus consommatrices, et ainsi orienter les travaux de réduction des impacts environnementaux des technologies.

Comparer la consommation de produits chimiques de la nouvelle technologie avec celle de la technologie précédente permet par ailleurs de voir l'évolution de cet indicateur avec les avancées technologiques : la consommation de produits chimiques par étape de procédé tend-t-elle à diminuer ? Est-elle stable ou tend-t-elle à augmenter ?

De plus, la mise à jour de cet indicateur six mois après l'industrialisation de la technologie permettra de mesurer l'ampleur des modifications des recettes entre le passage de la technologie de la R&D à la Production et le moment où la technologie est plus stable, et de voir l'impact de leur montée en volume. Enfin, un intérêt important du suivi précis des consommations de produits chimiques pendant les steps est l'anticipation de ruptures de stocks sur ces produits.

Le service ESH pourra par ailleurs corrélérer cet indicateur avec les consommations de produits chimiques du site qu'il suit, afin de mieux maîtriser le lien entre ces paramètres et les caractéristiques des technologies.

De plus, le service ESH et les autres services concernés pourront anticiper d'éventuelles modifications, notamment sur les systèmes de traitement des rejets du site, dès le passage en production d'une nouvelle technologie.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Formalisation

L'indicateur *Consommation de produits chimiques par step* présente le volume de produits chimiques consommé pour chaque étape de procédé d'une nouvelle technologie et par un wafer, par atelier de production. Ces volumes sont comparés à ceux de la technologie précédemment développée, aux mêmes étapes de la vie de ces technologies.

Le calcul permettant d'obtenir les volumes de produits chimiques à partir des recettes de production a été présenté dans le chapitre précédent (paragraphe 4.2.1.4 *Exploitation des recettes de production : méthodologie et calculs*).

Pour cet indicateur, nous avons utilisé le nombre d'étapes de procédé de la route majoritaire de la technologie 28 nm en 2011. Cela explique pourquoi nous ne voyons pas sur ce graphe l'évolution de 40 % du nombre de steps entre les technologies 45 et 28 nm, comme figurant sur la figure 5.1 (la route majoritaire la plus récente de la technologie 28 nm comporte 14 étapes de CMP).

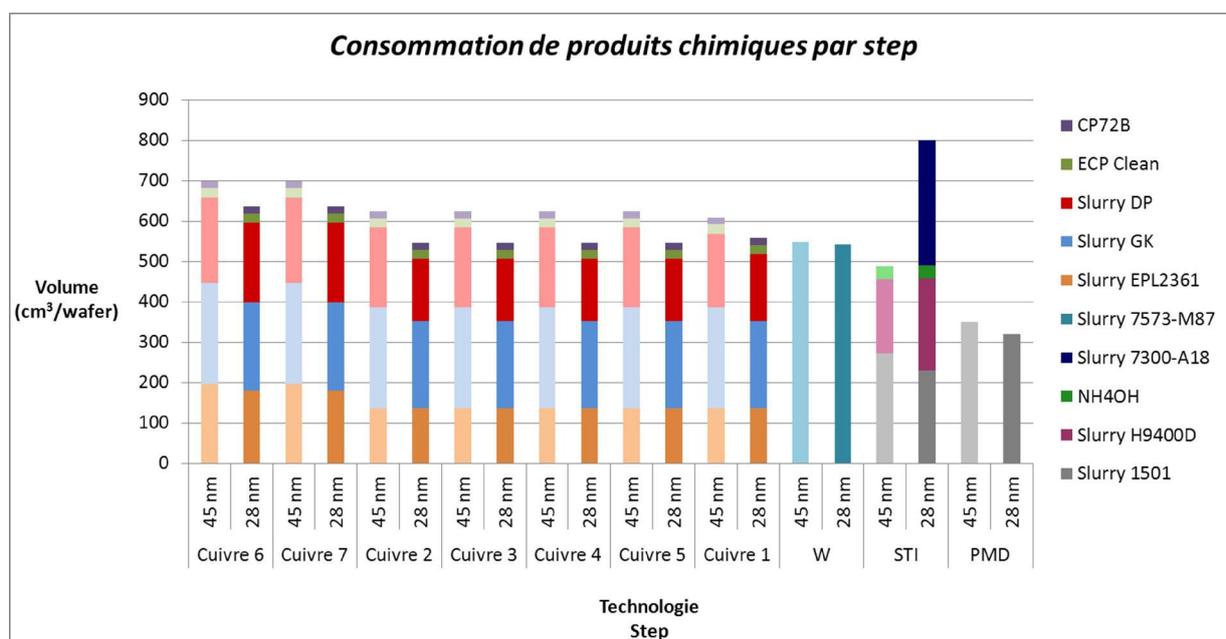


Figure 5. 3 Indicateur Consommation de produits chimiques par step et par wafer, pour un atelier de production (CMP), pour les technologies microélectroniques 45 et 28 nm.

Sur ce graphe (figure 5.3), nous voyons l'évolution du volume total de produits chimiques consommés par step entre les deux dernières technologies développées sur le site pour l'atelier CMP. Les barres de couleurs vives correspondent à la dernière technologie développée sur le site, et les barres plus claires correspondent à la technologie précédente. Nous identifions également les steps pour lesquels un nouveau produit chimique a été introduit dans les procédés de l'atelier : c'est le cas du Slurry 7300-A18 pour l'étape de STI dans l'atelier CMP.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Nous constatons globalement une diminution du volume de produits chimiques consommés par step entre les technologies 45 et 28 nm. Seule l'étape de procédé STI a vu la quantité de produit chimique augmenter de façon significative en raison de l'introduction d'un nouveau produit. Cet indicateur nous a ainsi permis de mettre en évidence une étape de procédé consommant davantage de produit chimique avec les évolutions technologiques. Après discussion avec l'expert STI de R&D, il est apparu que le nouveau slurry est notamment nécessaire à la technologie 28 nm pour améliorer la défektivité (présence de défauts) et réduire la topographie (relief, épaisseur). Une attention particulière pourra donc par la suite être portée par les équipes de R&D sur le procédé de CMP STI, afin de voir si cette tendance se confirme ou non, sans pour autant négliger de s'intéresser aux évolutions de consommation de produits chimiques pour les autres étapes de procédé réalisées dans cet atelier.

Remarque : pour simplifier la lecture de cet indicateur et compléter l'information, nous pourrions parfois choisir de présenter les résultats par brique (ensemble d'étapes de procédé permettant de réaliser une fonction) et pas par step.

Acteurs et utilisation

Les recettes de production évoluant très souvent depuis le début du développement d'une technologie jusqu'à son industrialisation, et encore après cette phase, nous proposons de ne formaliser l'indicateur *Consommation de produits chimiques par step* qu'à deux moments de la vie de la nouvelle technologie : à la fin de son développement, et quelques mois après son industrialisation.

L'indicateur *Consommation de produits chimiques par step* pourra donc être formalisé une première fois pour le produit majoritaire de la nouvelle technologie lors de son industrialisation. Ces résultats seront présentés dans le rapport écrit lors de l'industrialisation de chaque nouvelle technologie. Il sera de nouveau formalisé six mois après le passage de la technologie en production, lorsque les changements majeurs des recettes auront été effectués. Si le produit majoritaire a changé depuis le passage de la technologie en Production, l'indicateur sera formalisé pour le nouveau produit majoritaire. Cet indicateur sera comparé à la technologie précédente, aux mêmes moments de la vie de ces technologies.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

L'indicateur *Consommation de produits chimiques par step* sera utilisé par les équipes des Opérations et par le service ESH, plus particulièrement les Pôles Environnement et Chimie. Les rôles de ces acteurs et la nature de leurs interactions sont présentés dans la figure 5.4 :

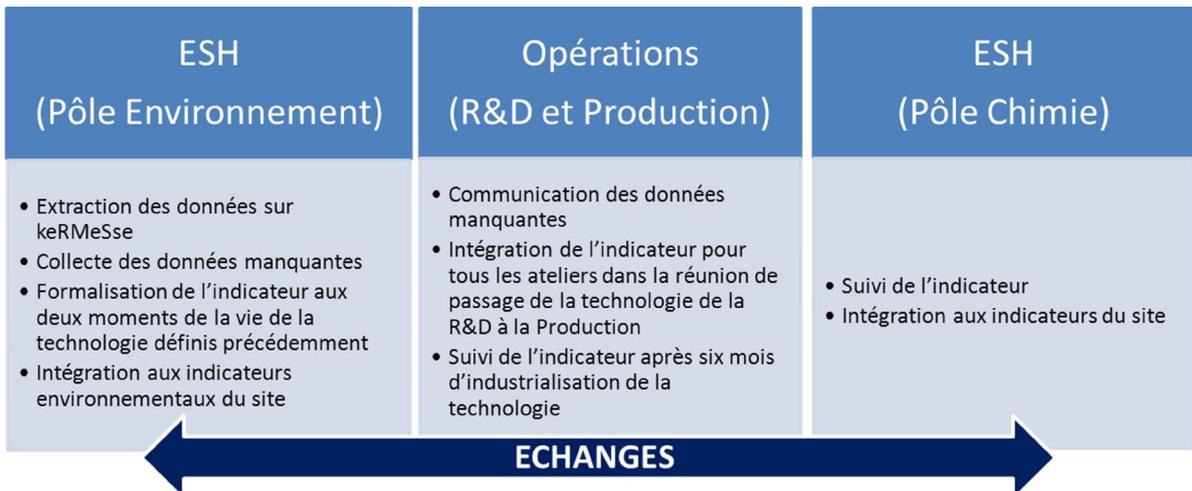


Figure 5. 4 Suggestion d'utilisation de l'indicateur Consommation de produits chimiques par step par les différents acteurs du site.

Le service ESH collecte les données nécessaires et formalise l'indicateur, qui pourra être intégré aux indicateurs environnementaux du site.

Les équipes R&D de chaque atelier communiqueront les données qui ne seront pas accessibles directement par le service ESH.

Les équipes de support à la Production supporteront le service ESH pour la formalisation de l'indicateur *Consommation de produits chimiques par step* six mois après l'industrialisation de la nouvelle technologie.

L'indicateur *Consommation de produits chimiques par step* pourra être communiqué par le service ESH aux équipes de R&D et de support à la Production *via* une application sur le site intranet de l'entreprise.

5.3.2 Indicateurs Environnement

Nous proposons, dans cette partie, la mise en place d'indicateurs que nous appellerons indicateurs Environnement, car ils sont obtenus à partir de données globales, c'est-à-dire liées à l'ensemble du site, utilisées pour l'analyse des performances environnementales du site.

Certains indicateurs sont basés sur des données provenant des recettes de production, d'autres sur le modèle de la technologie 45 nm établi dans le chapitre précédent.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

N'ayant pas accès à toutes les informations nécessaires pour mesurer la contribution de chaque étape de procédé aux impacts environnementaux du site, nous avons divisé les indicateurs Environnement en deux catégories : les macro-indicateurs et les micro-indicateurs.

Les macro-indicateurs Environnement sont basés sur l'hypothèse que toutes les étapes de procédé réalisées sur le site ont les mêmes impacts : la différence d'impacts environnementaux entre technologies est alors uniquement basée sur l'écart du nombre de steps entre ces technologies.

Pour les micro-indicateurs Environnement, les étapes contributrices de la route d'une technologie ont pu être identifiées. Dans ce cas, nous considérons que tous les steps contributeurs à un paramètre ont le même impact.

Afin d'avoir des informations plus pertinentes, il faudrait être capable de séparer les étapes de procédé de la route en steps contributeurs et steps non contributeurs, mais aussi de hiérarchiser les steps contributeurs en fonction de leur part relative dans les impacts environnementaux.

Les macro-indicateurs Environnement sont les suivants : *Consommation d'électricité*, et la consommation de certains réactifs de la station de traitement des effluents aqueux industriels, à savoir *Consommation d'Acide Sulfurique*, *Consommation d'Hydroxyde de Sodium*, *Consommation de Chlorure de Calcium* et *Consommation de Chaux*. Nous avons décidé de ne pas inclure la consommation de gaz naturel dans ces indicateurs car ce paramètre est essentiellement lié au fonctionnement du site, et pas à la réalisation des étapes de procédé sur les wafers.

Les micro-indicateurs Environnement sont : *Potentiel de Réchauffement Global (PRG)*, *Consommation d'EDI*, certains rejets aqueux et certains rejets atmosphériques. Les indicateurs sur les rejets aqueux sont : *Rejet d'Azote*, *Rejet de Fluorure*, et *Rejet de Cuivre*. Les indicateurs sur les rejets atmosphériques sont : *Rejet d'Ammoniac*, *Rejet de Chlorure d'Hydrogène*, *Rejet de Fluor*, et *Rejet de COV*.

Intérêts

Les indicateurs Environnement permettent tout d'abord de sensibiliser les équipes de R&D au fait que les choix techniques faits pendant le développement des technologies ont un impact sur l'environnement : l'indicateur PRG concrétise par exemple le lien entre les procédés réalisés sur les wafers et le réchauffement climatique. Les impacts environnementaux d'un step sont faibles, mais ne sont pas négligeables si l'on considère tous les étapes de procédé réalisées sur tous les wafers en R&D et en Production.

Ces indicateurs permettent au service ESH de maîtriser plus finement l'origine des impacts environnementaux du site, en les associant aux procédés réalisés sur les wafers. De plus, les interactions avec les équipes des Opérations qu'implique la formalisation des indicateurs Environnement renforcera les échanges avec ceux qui développent les futures technologies microélectroniques, ce qui est nécessaire pour anticiper leurs impacts sur l'environnement.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Par ailleurs, STMicroelectronics cherche à connaître toujours plus précisément les impacts environnementaux découlant de son activité. Les indicateurs que nous proposons de mettre en place apportent des informations supplémentaires à ces études.

Formalisation

- Les macro-indicateurs Environnement

Ces indicateurs sont basés sur la différence de nombre de steps entre les technologies microélectroniques. Dans le chapitre précédent, nous avons en effet proposé une méthode pour estimer la contribution d'une étape de procédé à différents paramètres de consommation et de rejet du site. Nous utiliserons ces résultats afin de mettre en place des indicateurs permettant d'évaluer les impacts environnementaux des technologies microélectroniques réalisées sur le site, et de suivre leur évolution d'une technologie à une autre.

Nous déterminerons les valeurs des macro-indicateurs Environnement à partir de la relation suivante :

$$\text{Macro – indicateur Environnement} = n_x \times C_{step,moyen} \quad (5.1)$$

Où :

- n_x représente le nombre de steps de la technologie X ,
- $C_{Step,moyen}$ la contribution moyenne d'un step au paramètre environnemental sur lequel est basé l'indicateur (d'après le chapitre précédent).

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

✓ Consommation d'électricité

Dans le chapitre précédent, nous avons vu qu'environ 30 % de la consommation d'électricité du site sont liés au process des wafers. Nous avons finalement considéré que la contribution d'un step à la consommation d'électricité du site était de 1,3 kWh.

L'indicateur *Consommation d'électricité* a la forme suivante (figure 5.5) :

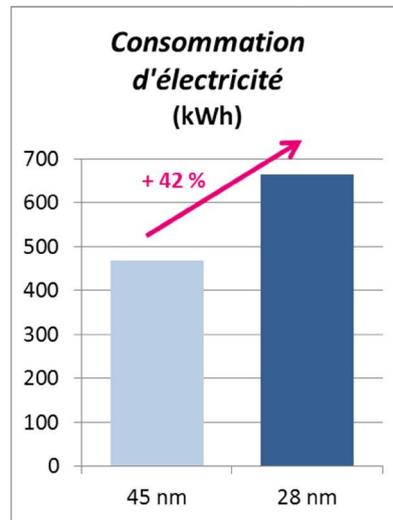


Figure 5.5 Indicateur Consommation d'électricité pour les technologies 45 et 28 nm.

La technologie 28 nm comportant 42 % d'étapes de procédé en plus que la technologie 45 nm, l'indicateur montre une augmentation de la consommation d'électricité entre les deux technologies. Nous pouvons affiner cet indicateur en présentant les résultats par atelier : en effet, le nombre de steps global augmente entre ces deux technologies, mais cette tendance n'est pas homogène sur tous les ateliers de production.

L'indicateur *Consommation d'électricité* par atelier de production a la forme suivante (figure 5.6) :

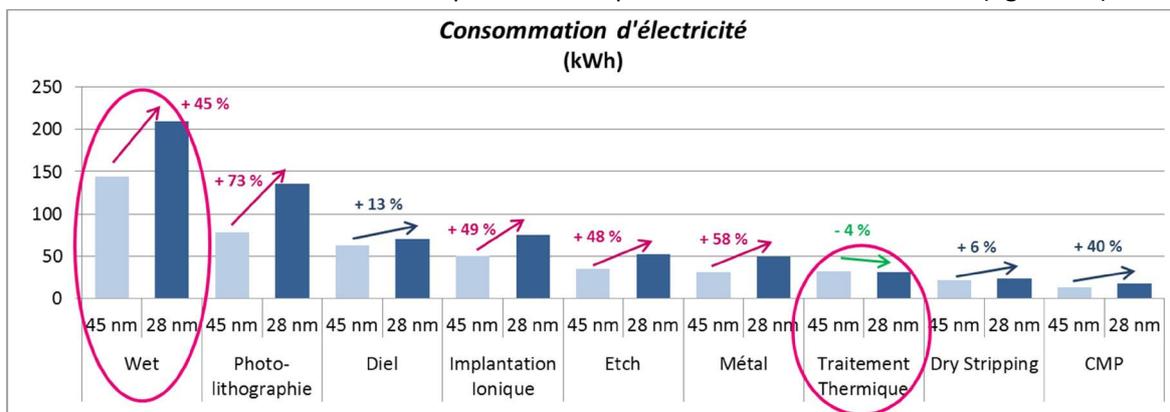


Figure 5.6 Indicateur Consommation d'Electricité par atelier pour les technologies 45 et 28 nm.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Sur ce graphe, nous voyons que l'atelier le plus contributeur à la consommation d'électricité des technologies est l'atelier Wet, suivi de la Photolithographie et du Diel. Nous avons présenté ce résultat aux spécialistes des différents ateliers, et il apparaît que l'indicateur *Consommation d'électricité*, tel qu'il a été construit, n'est pas pertinent. Par expérience, nous savons en effet que cette hiérarchisation des ateliers en fonction de leur consommation d'électricité est fautive : un step de l'atelier Traitement Thermique, du fait des procédés et des équipements utilisés, consomme *a priori* bien plus d'électricité qu'un step de l'atelier Wet par exemple. Dans ce cas, nous ne pouvons donc nous limiter à considérer que le nombre d'étapes de procédé est la seule variable permettant de mesurer la contribution d'un atelier à la consommation d'électricité du site ; il faudrait envisager des mesures sur les équipements, en particulier dans l'atelier Traitement Thermique.

Nous proposons donc de garder l'indicateur *Consommation d'électricité* global, car ce paramètre est important pour évaluer les impacts environnementaux des technologies microélectroniques, et qu'il est cohérent de considérer que plus une technologie comptera d'étapes de procédé, plus elle consommera d'électricité.

En revanche, bien qu'un indicateur *Consommation d'électricité* par atelier de production soit nécessaire pour maîtriser les impacts liés à l'utilisation d'énergie des procédés de fabrication, nous ne pouvons le mettre en place sous sa forme actuelle.

✓ **Consommation de réactifs de la station de traitement**

Nous présenterons dans cette partie les macro-indicateurs Environnement liés à la consommation de quatre réactifs utilisés pour le traitement des effluents aqueux industriels issus du process des wafers : acide sulfurique, Hydroxyde de Sodium, Chlorure de Calcium et Chaux.

Ces réactifs sont utilisés pour le traitement des liquides en sortie des équipements de production, avant leur rejet dans le milieu naturel. Divers procédés de traitement sont réalisés dans la station. L'attribution d'une quantité de réactifs consommés aux étapes de procédé réalisées sur le site étant très compliquée, nous considérons que l'hypothèse d'une égale contribution de tous les steps à ces paramètres est pertinente.

Voici la forme des macro-indicateurs Environnement basés sur la consommation de réactifs de la station de traitement des effluents aqueux industriels. L'indicateur associé à la consommation d'Acide Sulfurique sera présenté dans ce chapitre (figures 5.7 et 5.8), les indicateurs pour les trois autres réactifs apparaissent en annexes [\[Annexe A.4.1\]](#).

- **Consommation d'Acide Sulfurique (H₂SO₄)**

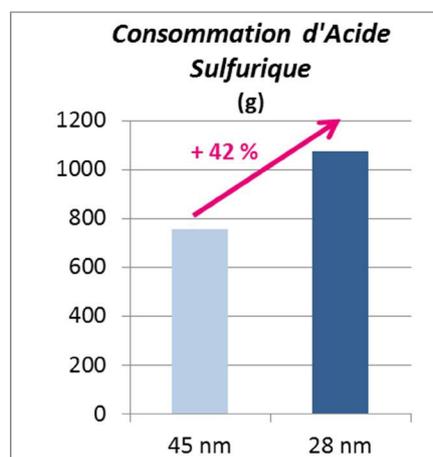


Figure 5. 7 Indicateur Consommation d'Acide Sulfurique pour les technologies 45 et 28 nm.

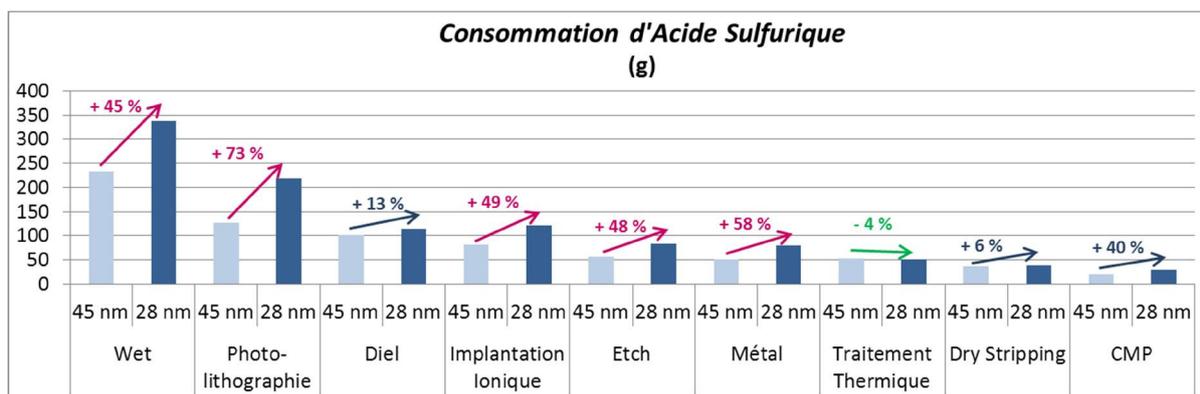


Figure 5. 8 Indicateur Consommation d'Acide Sulfurique par atelier pour les technologies 45 et 28 nm.

La répartition de la consommation de réactifs à la station de traitement des effluents aqueux industriels sur les steps étant complexes, nous pouvons garder l'hypothèse d'une égale contribution de toutes les étapes de procédé à ce paramètre.

✓ **Conclusion sur les macro-indicateurs**

Les macro-indicateurs (Consommation d'électricité, et consommation des réactifs de la station de traitement) se basent uniquement sur la variation du nombre de steps entre les technologies, en considérant que tous les steps ont les mêmes impacts environnementaux. Le nombre d'étapes de procédé influe sur les impacts des technologies, leur formalisation sous forme d'indicateurs constitue donc un premier résultat intéressant pour les concepteurs de technologie.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Cependant, nous savons que la contribution par step à un paramètre de consommation ou de rejet varie selon l'atelier, la génération d'équipement, et le type de step. La maîtrise de ces différences sera nécessaire pour orienter les efforts de minimisation du nombre de steps les plus contributeurs.

- Les micro-indicateurs Environnement

Contrairement aux macro-indicateurs définis dans le paragraphe précédent, pour les micro-indicateurs, nous pouvons distinguer les étapes de procédé contribuant aux paramètres environnementaux de celles qui ne les influencent pas. Toutefois, rappelons que nous ne sommes actuellement pas capables de hiérarchiser les étapes contributrices par leur part dans les impacts environnementaux. La formalisation des micro-indicateurs Environnement découle des résultats obtenus dans le chapitre précédent.

Nous déterminerons les valeurs des micro-indicateurs Environnement à partir de la relation suivante :

$$\text{Micro – indicateur Environnement}_a = n_{a_X} \times C_{a_Step,moyen} \quad (5.2)$$

Où :

- $\text{Micro – indicateur Environnement}_a$ représente le micro-indicateur sur le paramètre de consommation ou de rejet a ,
- n_{a_X} le nombre de steps de la technologie X contribuant au paramètre de consommation ou de rejet a ,
- $C_{a_Step,moyen}$ la contribution moyenne d'un step au paramètre de consommation de rejet a (d'après le chapitre précédent).

Remarque : pour simplifier la lecture des micro-indicateurs Environnement, nous pourrions parfois choisir de présenter les résultats par brique et pas par step.

✓ **Potentiel de Réchauffement Global (PRG)**

Le réchauffement climatique est un impact environnemental majeur qui s'est beaucoup accentué avec l'augmentation des activités anthropiques, particulièrement depuis le développement de l'industrie. Cet impact est suivi par STMicroelectronics grâce à l'indicateur *Global Warming* (= Effet de Serre). Cet indicateur environnemental tient compte de la consommation de Perfluorocarbures (PFC) et d'énergie (électricité et gaz naturel) du site.

Nous proposons de compléter l'indicateur Effet de Serre par un indicateur *PRG (Potentiel de Réchauffement Global)* directement lié aux technologies microélectroniques, basé uniquement sur la consommation de Gaz à Effet de Serre (GES) des technologies. L'utilisation de gaz pour réaliser les étapes de procédé est en effet le paramètre sur lequel les équipes de R&D peuvent le plus facilement agir (c'est plus compliqué pour la consommation d'électricité qui dépend beaucoup des équipements de production, et impossible pour la consommation de gaz naturel puisqu'elle ne dépend pas directement des procédés).

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

- Identification des étapes de procédé consommant des GES

A partir de l'étude des recettes de production de la technologie 45 nm, nous avons identifié les ateliers dans lesquels étaient réalisées des étapes de procédé utilisant des GES. Les gaz retenus sont ceux auxquels l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) a attribué des facteurs d'émission, facteurs que nous utilisons pour transformer les données de consommation brutes en impact environnemental [GIEC, 2007]. Les GES que nous avons retenus dans cette étude, c'est-à-dire les GES utilisés par les technologies réalisées sur le site, ainsi que leur potentiel de réchauffement climatique à 100 ans, sont présentés dans le tableau 5.2 suivant :

Gaz à effet de serre	Formule	Potentiel de Réchauffement Climatique à 100 ans (kg éq. CO ₂)
Dioxyde de Carbone	CO ₂	1
Perfluorocyclobutane	C ₄ F ₈	10300
Protoxyde d'Azote	N ₂ O	298
Méthane	CH ₄	25
Difluorométhane	CH ₂ F ₂	675
Tétrafluorométhane	CF ₄	7390
Trifluorométhane	CHF ₃	14800
Trifluorure d'Azote	NF ₃	17200
Hexafluorure de Soufre	SF ₆	22800

Tableau 5. 2 Potentiels de réchauffement climatique à 100 ans des gaz à effet de serre consommés par les technologies sur le site.

Les volumes de GES sont obtenus à partir des recettes de production. Précisons que pour cet indicateur, nous incluons les steps de Clean (nettoyage) de l'atelier Diel. Ces étapes n'apparaissent pas dans la route des produits, mais elles sont très consommatrices de gaz, et notamment de GES.

Par ailleurs, les données nécessaires au calcul de l'indicateur PRG pour l'atelier Implantation Ionique ne sont actuellement pas accessibles.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

- Formalisation de l'indicateur PRG

Nous obtenons l'indicateur PRG grâce à la relation suivante :

$$PRG_{GES} = V_{GES} \times \rho_{GES} \times PRG_{100,GES} \times ABAT \quad (5.3)$$

Avec :

- PRG_{GES} le pouvoir de réchauffement global pour un GES et pour un wafer, dans un atelier (en kg CO₂ eq / wafer)
- V_{GES} le volume d'un GES consommé pour le process d'un wafer dans un atelier (en m³/wafer)
- ρ_{GES} la masse volumique de la phase gazeuse d'un GES, à 1,013 bar et 15°C (en kg / m³)
- $PRG_{100,GES}$ le PRG à cent ans d'un GES, d'après l'IPCC (en kg CO₂ eq)
- $ABAT$: ce facteur permet d'intégrer l'abattement supposé des GES par les systèmes de traitement des GES au point d'utilisation (POU). Cet abattement est généralement de 90 %, et donc $ABAT = 0,1$.

Cet indicateur sera formalisé de deux façons : PRG par atelier, et PRG par brique pour chaque atelier contributeur.

L'indicateur PRG par atelier est présenté ici pour l'atelier Etch (figure 5.9) :

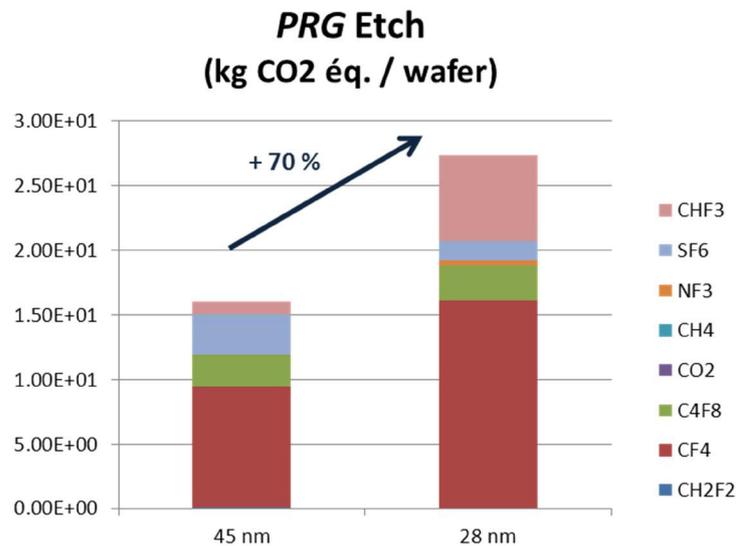


Figure 5. 9 Indicateur PRG pour un atelier de production (Etch), pour les technologies microélectroniques 45 et 28 nm.

Nous constatons sur ce graphe une augmentation de 70 % de l'indicateur PRG entre les technologies 45 et 28 nm. Il s'agit d'une augmentation des quantités de GES consommés, puisque les calculs de l'indicateur PRG sont basés sur les recettes de production des steps contributeurs à cet impact, ce qui ne

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

reflète pas nécessairement les quantités de GES rejetées à l'atmosphère par le site. Cependant, afin de prévenir le réchauffement climatique, il est important de réduire la consommation de produits chimiques contribuant à cet impact. Cet indicateur permettra donc de suivre l'évolution de consommation de GES avec les avancées technologiques, et d'anticiper les impacts environnementaux qui en découlent si cette tendance à l'augmentation se confirme.

Afin d'avoir des informations plus précises sur les steps contributeurs à la consommation de GES, nous pouvons calculer l'indicateur *PRG* par brique. Pour l'atelier Etch, cet indicateur a la forme suivante (figure 5.10) :

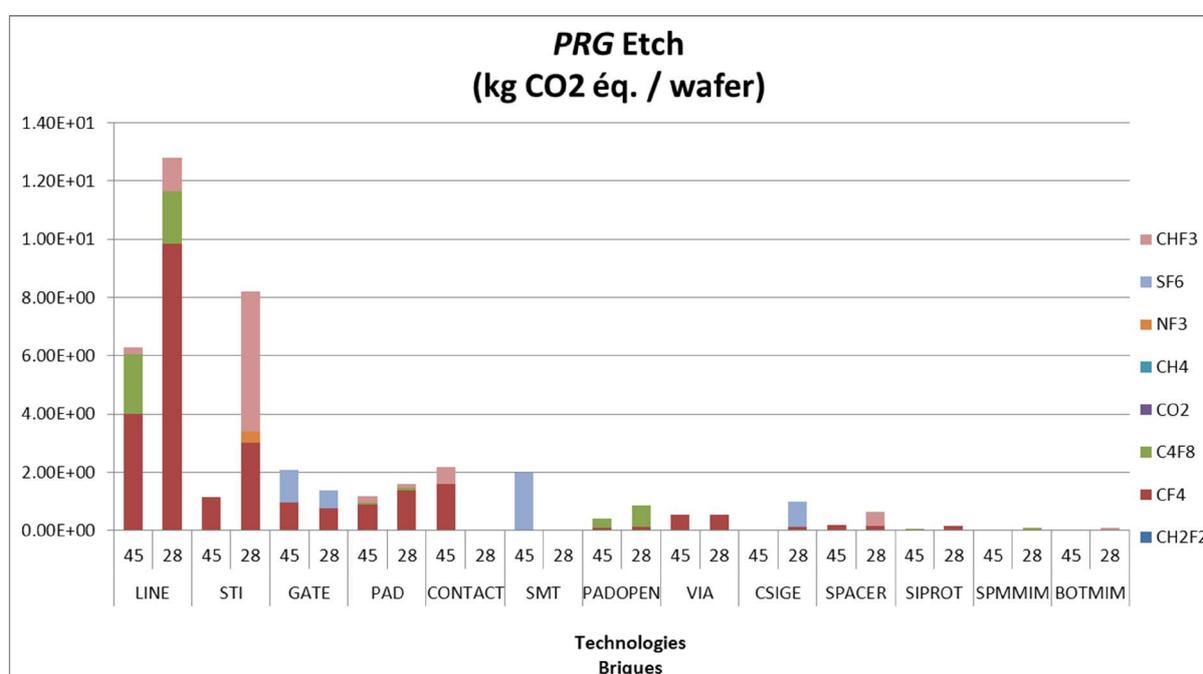


Figure 5. 10 Indicateur PRG détaillé pour un atelier de production (Etch), pour les technologies microélectroniques 45 et 28 nm.

De nombreuses étapes de procédé de l'atelier Etch consommant des GES, il est plus facile de les regrouper par brique pour comparer les technologies entre elles. Cette formalisation par brique pourra être retenue dans d'autres cas, si cela facilite la compréhension des indicateurs environnementaux.

Pour cet indicateur, nous n'avons pas pu accéder à toutes les recettes pour la technologie 28 nm : deux steps de la brique LINE n'ont pas été exploités, ainsi que les étapes de la brique CONTACT.

L'indicateur PRG a augmenté pour la plupart des briques que nous avons étudiées entre les technologies 45 et 28 nm. Seule la brique « GATE » a vu sa consommation de GES diminuer. Nous voyons également que la brique « LINE » est celle qui consomme le plus de GES, et que les quantités consommées ont doublé entre les technologies 45 et 28 nm. La brique STI a quant à elle vu une augmentation de plus de

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

600 % de la quantité de GES utilisés, notamment en raison de l'introduction du trifluorométhane en 28 nm. Quant à la brique « CSIGE », elle n'existait pas pour la technologie 45 nm.

Ce graphe permet par ailleurs de comparer l'architecture des technologies : des briques différentes d'une technologie à l'autre. Ce type d'informations ne fait pas partie des données que maîtrise le service ESH, alors que les évolutions techniques vont jouer dans les évolutions d'impacts environnementaux des technologies. Ceci constitue donc un autre intérêt de l'indicateur PRG.

✓ Consommation d'EDI

Dans le chapitre précédent, nous avons identifié les étapes de procédé qui consomment de l'EDI, et nous avons estimé que chacune de ces étapes en consomme 16,6 dm³. L'indicateur *Consommation d'EDI* est basé sur la différence du nombre de steps consommant de l'EDI entre les technologies.

L'indicateur *Consommation d'EDI* est présenté ci-dessous pour les technologies 45 et 28 nm (figure 5.11). Le premier graphe correspond à l'indicateur global, c'est-à-dire pour l'intégralité des technologies, et le second graphe montre le détail par atelier contributeur à la consommation d'EDI :

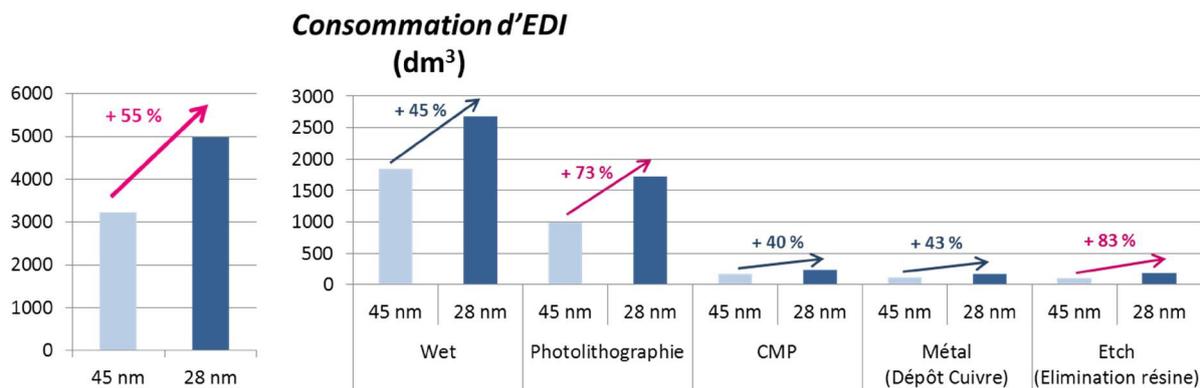


Figure 5. 11 Indicateur Consommation d'EDI, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.

L'indicateur *Consommation d'EDI* a augmenté de 55 % entre les technologies 45 et 28 nm. Tous les ateliers contributeurs ont vu leur indicateur *Consommation d'EDI* augmenter entre ces technologies. Les augmentations les plus importantes sont dans les ateliers Etch (+ 83 %) et Photolithographie (+ 73 %).

Rappelons que le nombre total d'étapes de procédé n'a quant à lui augmenté que de 42 % entre ces deux technologies. Grâce à cet indicateur, nous constatons donc que la proportion d'étapes consommant de l'EDI par rapport au nombre total d'étapes est plus élevée pour la technologie 28 nm que pour la technologie 45 nm. Suivre l'indicateur *Consommation d'EDI* permettra donc de voir si une tendance à l'augmentation de la consommation d'EDI avec les évolutions technologiques se confirme.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

L'hypothèse sur laquelle est basé l'indicateur *Consommation d'EDI*, à savoir que toutes les étapes de procédé contributrices ont le même impact sur ce paramètre, reste cependant à affiner. En effet, en fonction du type de step et des équipements dans lesquels ils sont réalisés, des différences significatives existent entre leurs contributions à la consommation d'EDI.

✓ Rejets liquides

Nous ne présenterons ici que l'indicateur pour les rejets liquides d'Azote en sortie de la station de traitement. Les autres indicateurs (rejets de Fluorure et de Cuivre) apparaissent en annexe [Annexe A.4.2.1].

• Rejet d'Azote

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, chaque step contribuant à la charge d'Azote dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels est responsable du rejet de 0,5 gramme d'Azote.

L'indicateur *Rejet d'Azote* est présenté sur la figure 5.12 ci-dessous pour les produits majoritaires des technologies 45 et 28 nm :

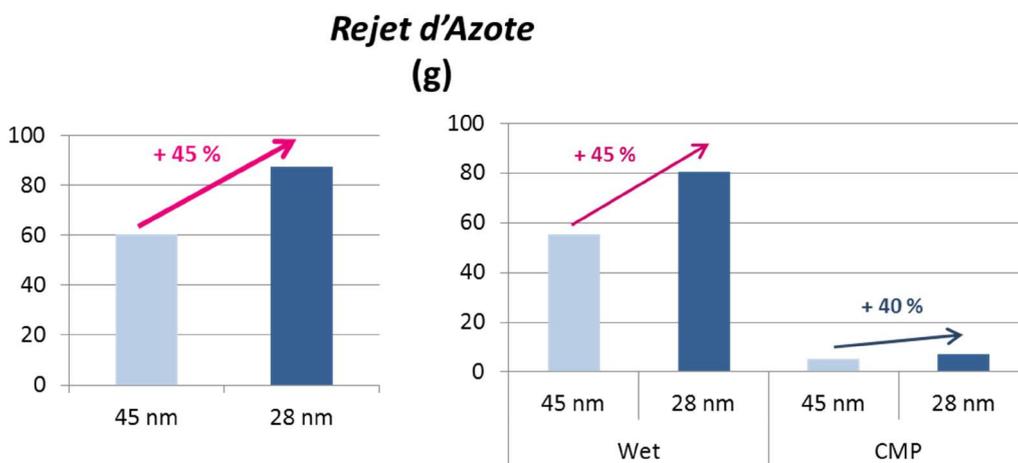


Figure 5. 12 Indicateur Rejet d'Azote, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.

D'après cet indicateur, la technologie 28 nm contribue davantage à la charge d'Azote dans les rejets aqueux de la station de traitement que la technologie 45 nm (+ 45 %). Entre ces deux technologies, le nombre d'étapes de Wet et de CMP, les deux ateliers identifiés comme contributeurs à ce paramètre, ont en effet augmenté.

Cependant, nous avons fait l'hypothèse que tous les steps des ateliers identifiés comme contributeurs à la charge d'Azote dans les rejets liquides de la station de traitement participaient à ce paramètre. Or

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

nous savons qu'en réalité, toutes les étapes de procédé des ateliers Wet et CMP n'impactent pas les rejets liquides d'Azote. Cet indicateur est donc intéressant à suivre pour maîtriser l'évolution du nombre de steps des ateliers influençant la charge d'Azote dans les rejets liquides, mais il devra être affiné pour identifier précisément les steps contributeurs, et estimer leur impact.

✓ Rejets atmosphériques

Nous ne présenterons ici que l'indicateur pour les rejets atmosphériques d'Ammoniac. Les autres indicateurs (rejets de Chlorure d'Hydrogène, de Fluor et de COV) apparaissent en annexe [Annexes A.4.2.2].

• Rejet d'Ammoniac

Les étapes de procédé contribuant aux rejets atmosphériques d'Ammoniac ont un impact de 10 mg sur ce paramètre.

La figure 5.13 présente l'indicateur *Rejet d'Ammoniac* pour les produits majoritaires des technologies 45 et 28 nm :

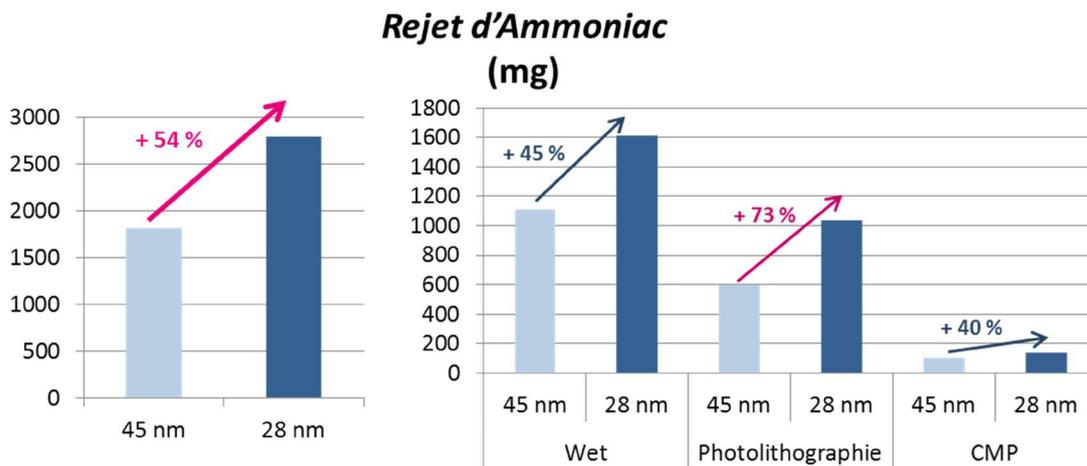


Figure 5.13 Indicateur Rejet d'Ammoniac, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.

Le nombre de steps des ateliers Wet, Photolithographie et CMP, que nous avons identifiés comme étapes contributrices aux rejets atmosphériques d'Ammoniac, a augmenté de 54 % entre les technologies 28 et 45 nm : l'indicateur *Rejet d'Ammoniac* a donc augmenté pour la technologie 28 nm par rapport à la technologie 45 nm, dans chaque atelier concerné influant ce paramètre.

Pour cet indicateur encore, toutes les étapes de procédé des trois ateliers contributeurs n'impactent en réalité pas de la même façon les rejets atmosphériques d'Ammoniac. Cet indicateur permet de suivre l'évolution du nombre de steps des ateliers influençant la quantité d'Ammoniac en sortie du site, mais

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

doit être affiné pour déterminer les steps réellement contributeurs au sein des ateliers Wet, Photolithographie et CMP, et pour évaluer leur impact sur ce paramètre.

Acteurs et utilisation

Les indicateurs Environnement seront gérés par le service ESH. Selon la disponibilité des informations nécessaires, les équipes des Opérations seront sollicitées afin de communiquer les données manquantes au service ESH.

Les indicateurs Environnement seront calculés deux fois au cours de la vie d'une nouvelle technologie, pour le produit majoritaire de la technologie au moment où les données sont collectées. Nous proposons de calculer une première fois les indicateurs Environnement quand chaque nouvelle technologie passe en production. Ils seront de nouveau calculés après six mois d'industrialisation, période à partir de laquelle nous pouvons considérer que les technologies ne verront pas de changements majeurs. En cas de changement important de process au-delà de cette période, les indicateurs environnementaux seront recalculés.

Les indicateurs Environnement, pilotés par le service ESH, devront être accessibles par les équipes des Opérations. Nous proposons que les indicateurs Environnement calculés lors du passage de chaque nouvelle technologie de la R&D en production soient intégrés au rapport écrit accompagnant l'industrialisation d'une nouvelle technologie.

Il est également important que les indicateurs Environnement soient mis à jour par le service ESH dans une application sur le portail intranet du site, accessible par les équipes de R&D et de support à la Production.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Les échanges entre les différents acteurs du site pour la mise en œuvre des indicateurs Environnement sont présentés sur la figure 5.14 suivante :

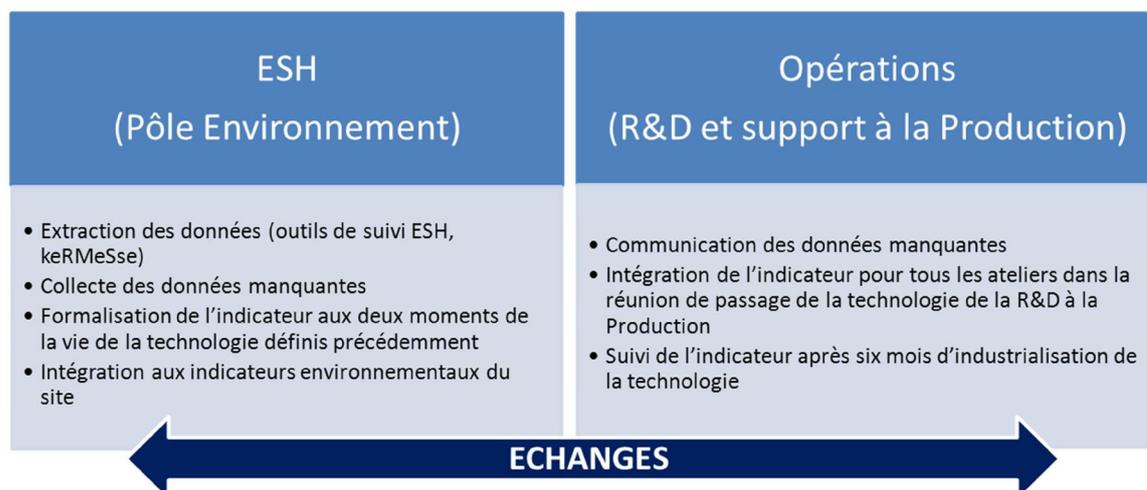


Figure 5. 14 Suggestion d'utilisation des indicateurs Environnement par les différents acteurs du site.

Le service ESH pilote l'ensemble des indicateurs Environnement : il collecte les données, formalise les indicateurs et s'assure de leur communication et de leur visibilité. Ces indicateurs seront intégrés aux indicateurs environnementaux déjà suivis sur le site.

Les équipes des Opérations participent à la formalisation des indicateurs, et pourront suivre ces indicateurs *via* une application dédiée sur le site intranet.

Synthèse sur les indicateurs Environnement

Le but des indicateurs Environnement est d'évaluer la contribution de chaque étape de procédé d'une technologie à des paramètres environnementaux. Pour certains paramètres, nous pouvons distinguer les steps contributeurs des autres. Lorsque ce n'est pas le cas, nous considérons que tous les steps de la technologie influent sur les paramètres. C'est sur cette différence que se base le découpage des indicateurs Environnement en micro- et macro-indicateurs. Le tableau 5.3 ci-dessous rappelle les caractéristiques des indicateurs Environnement.

Chapitre 5 – Définition d’indicateurs et d’outils environnementaux pour l’aide à l’éco-conception des futures technologies microélectroniques

STEP	PRG	Consommation d’EDI	Rejet d’Azote	Rejet de Fluorure	Rejet de Cuivre	Rejet d’Ammoniac	Rejet de Chlorure d’Hydrogène	Rejet de Fluor	Rejet de COV	Consommation d’électricité	Consommation de réactifs de la station de traitement des effluents aqueux industriels
Step 1	X	X	-	X	X	-	-	-	X	X	X
Step 2	-	X	-	-	X	X	X	-	-	X	X
...
Step n	X	-	X	-	-	-	X	X	-	X	X

Micro-indicateurs
Macro-indicateurs

Tableau 5. 3 Synthèse des caractéristiques des indicateurs Environnement.

Pour les micro-indicateurs, nous pouvons cependant remarquer que l’augmentation des impacts environnementaux n’est pas nécessairement proportionnelle à l’augmentation du nombre de steps des technologies. Pour les indicateurs qui ne sont pas basés sur les recettes de production (tous sauf l’indicateur PRG), leur valeur dépend en effet :

- du nombre de steps contributeurs aux paramètres de consommation et de rejet, qui augmente avec les avancées technologiques,
- de la contribution moyenne d’une étape de procédé, que l’on a calculée pour la technologie 45 nm et que l’on considère stable.

Ces indicateurs vont donc augmenter, mais pas forcément dans les mêmes proportions que le nombre de steps.

Nous pouvons calculer le rapport :

$$\frac{\Delta NS_{c,p}}{\Delta NS_{total}} \quad (5.4)$$

Avec :

- $\Delta NS_{c,p}$ la variation du nombre de steps contributeurs au paramètre p entre deux technologies,
- ΔNS_{total} la variation du nombre de steps total entre deux technologies.

Si ce rapport est égal à 1, cela signifie que les impacts environnementaux ont autant augmenté que le nombre de steps entre deux technologies.

Si le rapport est inférieur à 1, cela montre que les impacts environnementaux ont augmenté moins fortement que le nombre de steps.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Enfin si ce rapport est supérieur à 1, cela signifie que les impacts environnementaux ont augmenté plus fortement que le nombre de steps.

Les résultats de ce calcul sont présentés pour les différents paramètres de consommation et de rejet, entre les technologies 45 et 28 nm, dans le tableau 5.4 ci-dessous :

Paramètres	Rapport $\frac{\Delta NS_{c,p}}{\Delta NS_{total}}$
Consommation d'EDI	0,7
Rejets aqueux d'Azote	0,4
Rejets aqueux de Fluorure	0,5
Rejets aqueux de Cuivre	0,05
Rejets atmosphériques d'Ammoniac	0,7
Rejets atmosphériques de Chlorure d'Hydrogène	0,4
Rejets atmosphériques de Fluor	0,6
Rejets atmosphériques de COV	0,3

Tableau 5. 4 Rapport $\frac{\Delta NS_{c,p}}{\Delta NS_{total}}$ pour les paramètres de consommation et de rejet du site.

Nous constatons donc que pour l'ensemble de ces paramètres, l'augmentation des impacts environnementaux associés entre les technologies 45 et 28 nm est moins importante que l'augmentation du nombre d'étapes de procédé total de ces technologies.

Lorsque les steps contributeurs sont identifiés, il faudrait par ailleurs pouvoir mesurer leur contribution aux paramètres de consommation et de rejet, de manière à classer les steps en fonction de leur participation aux impacts environnementaux.

5.3.3 Indicateurs Chimie

L'industrie microélectronique consomme de nombreux produits chimiques. L'utilisation de ces produits est réglementée par les législations locales et européennes. De plus, STMicroelectronics classe les produits chimiques en plusieurs catégories, et identifie les produits chimiques dangereux dont elle gère l'utilisation : produits chimiques interdits, ou autorisés dans une certaine mesure.

Nous proposons donc un outil Chimie permettant d'impliquer davantage les équipes de R&D dans la gestion des risques liés à la consommation de produits chimiques sur le site. Cet outil sera utilisé lors du processus de demande d'entrée d'un nouveau produit chimique sur le site.

Processus d'entrée d'un nouveau produit chimique sur site

La demande d'entrée d'un nouveau produit chimique sur le site doit suivre un processus de validation défini dans la procédure *Achat / Entrée de nouveaux produits chimiques*. Cela concerne les produits

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

chimiques jusqu'alors non utilisés sur le site, mais également les produits dont l'utilisation est modifiée (nouvel équipement, nouveau volume, nouveau mode de distribution). Le processus de validation se déroule de la façon suivante (figure 5.15) :

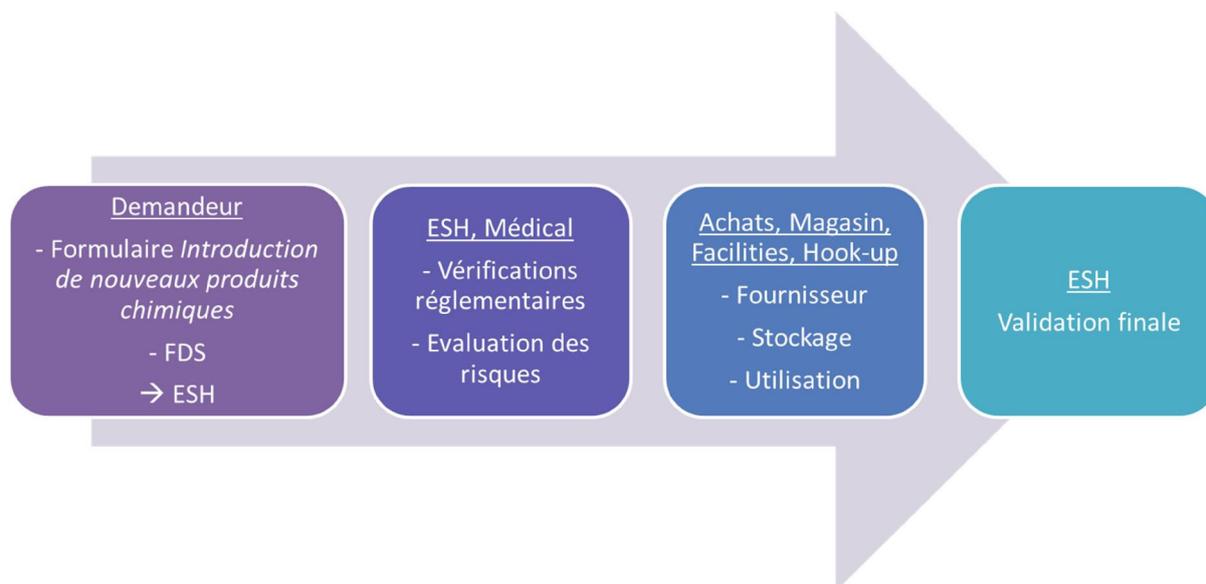


Figure 5. 15 Processus de demande d'entrée de nouveaux produits chimiques sur le site.

Lorsqu'une personne souhaite introduire un nouveau produit chimique sur le site, elle doit, en tant que demandeur, composer un dossier à transmettre au service ESH : ce dossier contient des informations relatives au produit chimique, dont sa Fiche de Données de Sécurité (FDS) obtenue par un fournisseur.

Un premier niveau de validation de l'introduction d'un nouveau produit chimique sur le site est réalisé par le service ESH et le service médical : les risques liés à la présence et à l'utilisation du produit sont évalués, le maintien de la conformité réglementaire du site en cas d'entrée du produit chimique est vérifié, et le service médical s'assure que les conditions d'utilisation du produit sont adaptées à la classe de danger.

La demande d'entrée d'un nouveau produit chimique passe alors par un deuxième niveau de validation, auquel participent les services achats (qui approuvent ou non le fournisseur proposé par le demandeur), le Magasin (qui vérifie les conditions de stockage prévues), les services Facilities et le Hook-up (qui étudient les moyens de distribution du produit, ainsi que les moyens de collecte et de traitement des rejets issus de l'utilisation du produit).

En fonction des conclusions des parties prenantes du cycle de validation, le service ESH approuve ou non l'entrée du nouveau produit chimique sur le site.

En cas de difficultés de validation au cours de ce processus, le Comité de Management des Produits Chimiques peut intervenir. Ce comité se réunit régulièrement afin de contrôler l'utilisation des produits

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

chimiques sur le site et d'en maîtriser les risques, tant pour la santé et la sécurité des personnes, que pour l'environnement.

Indicateurs Chimie

Les indicateurs Chimie sont regroupés dans un outil Chimie. Le but de cet outil est d'investir les équipes techniques, et particulièrement la R&D, dans les démarches de validation pour l'entrée de nouveaux produits chimiques sur le site. Il est important que les personnes qui conçoivent les nouvelles technologies aient conscience des risques et des contraintes liés à l'utilisation de certains produits chimiques.

Nous proposons donc d'ajouter une étape à la demande d'entrée d'un nouveau produit chimique sur le site : un tableau Excel sera intégré au dossier que le demandeur doit constituer pour le service ESH. Cet outil a été créé à partir du système de gestion des produits chimiques de STMicroelectronics, notamment les documents suivants :

- Liste des substances interdites, exemptées et soumises à déclaration
- Chemical Risk Assessment (CRA) = Analyse du risque chimique
- Arrêté préfectoral

Ces documents sont présentés dans les paragraphes ci-dessous.

Listes des substances interdites, exemptées et soumises à déclaration.

Le but de ce document est de réglementer l'utilisation de certaines substances ou de certains produits chimiques en définissant une classification des substances dangereuses. Une substance est définie comme un élément chimique, un composé ou un polymère identifié par un numéro CAS¹ ou un numéro EINECS². Elle peut être à l'état naturel ou être produite industriellement.

Cette procédure établit les listes des substances interdites sur les sites de STMicroelectronics, des substances exemptées sous certaines conditions, et des substances à déclarer.

¹ Numéro attribué par les Chemical Abstracts Services à chaque entité chimique. Le numéro CAS permet d'identifier les espèces chimiques sans aucune ambiguïté [INRS]

² European INventory of Existing Commercial chemical Substances : inventaire des substances chimiques existantes commercialisées sur le marché européen entre le 1^{er} Janvier 1971 et le 18 septembre 1981 [INRS]

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Le tableau 5.5 présente les définitions des différentes catégories de substances concernées par ce document :

Catégorie de substances dangereuses	Définition	Exemples
Banned substances = Substances interdites	Ne doivent pas être utilisées ou contenues dans les matières achetées par STMicroelectronics, sauf si elles ne sont pas détectables au-dessus des seuils définis	- Substances interdites par la réglementation, - Substances avec des propriétés CMR (cancérigènes, mutagènes, toxiques pour la reproduction), - Substances participant à la diminution de la couche d'ozone (d'après le Protocole de Montréal)
Exempted substances = Substances exemptées	Substances interdites présentes, au-dessus des seuils définis, dans les préparations et articles achetés, et autorisés à titre d'exception	- Substances qui devraient être interdites d'après la procédure, mais qui sont autorisées à STMicroelectronics pour un usage particulier en raison de la preuve d'un manque d'alternative technique
	Substances interdites et autres substances dont l'utilisation est strictement réglementée, soumise à des restrictions, et autorisées pour des applications spécifiques, dans des conditions précises	
Declarable substances = Substances soumises à déclaration	Substances dangereuses dont la présence doit être déclarée à STMicroelectronics en raison de potentielles restrictions futures, ou de demandes spécifiques de clients	- Substances dont au moins un client refuse la présence dans les produits

Tableau 5. 5 Différentes catégories de substances définies par la liste des substances interdites, exemptées et soumises à déclaration.

Ce classement des substances en substances interdites, exemptées et soumises à déclaration est un classement interne effectué par STMicroelectronics.

Le Chemical Risk Assessment (CRA)

La procédure sur l'analyse du risque chimique établit la classification des produits chimiques dangereux en plusieurs catégories de risque. Cette classification est basée sur plusieurs critères liés à la santé et la sécurité, au risque, et à l'environnement. Son objectif est d'identifier les propriétés physico-chimiques, toxicologiques et éco-toxicologiques des substances et préparations qui peuvent générer un risque lors d'une utilisation normale.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Pour ces critères, six niveaux de danger sont définis en fonction des phrases de risque R mentionnées dans la FDS :

- Banned (Interdit)
 - Produits chimiques interdits sur le site, pour tout usage
- Catégorie IV = Exempted (Exempté)
 - Produits chimiques remplissant les critères des produits interdits, mais autorisés pour une application donnée en raison d'un manque prouvé d'alternative technique
- Catégorie III = Restricted (Restreint)
 - Produits chimiques autorisés, mais que STMicroelectronics incite à ne pas utiliser si une solution alternative adaptée existe
- Catégories II et I = Controlled (Contrôlé)
 - Produits chimiques dont l'utilisation doit être connue, signalée et évaluée.
 - Catégorie II : produits chimiques à haut niveau de contrôle
 - Catégorie I : produits chimiques contrôlés
- Catégorie 0 = Produits chimiques non classés

Arrêté préfectoral

Le site STMicroelectronics de Crolles est une ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) soumise à autorisation. Il doit donc respecter un arrêté préfectoral élaboré avec la préfecture de Grenoble, et qui comporte des dispositions techniques précises adaptées à l'activité du site.

Cela concerne notamment la nature et la quantité des produits chimiques stockés sur le site, problématiques importantes dans le cadre de la gestion des risques. L'arrêté préfectoral définit, en accord avec le site, des quantités de produits chimiques pouvant être stockées, en fonction de leur nature. Les phrases R caractérisant les produits chimiques sont associées à des rubriques pour lesquelles des prescriptions sur les volumes stockés sont données.

Ce paramètre influence le classement du site par la directive Seveso : STMicroelectronics Crolles est actuellement Seveso seuil bas, mais pourrait passer en Seveso seuil haut si les quantités totales de matières dangereuses présentes sur le site augmentaient.

Outil Chimie

Nous proposons donc un outil intégrant le classement, par STMicroelectronics, des produits chimiques en fonction des risques qu'ils impliquent pour la santé, la sécurité et l'environnement, ainsi que les contraintes sanitaires et réglementaires liées au stockage de ces produits sur le site.

Chapitre 5 – Définition d’indicateurs et d’outils environnementaux pour l’aide à l’éco-conception des futures technologies microélectroniques

L’outil se présente sous la forme suivante (tableau 5.6) :

Technologie	Nom nouveau produit chimique	Mélange/Substance	Numéro-CAS	Classe	Phrases R	Combinaison Phrases R	Rubrique ICPE
				-			-
				-			-
				-			-
				-			-

Tableau 5. 6 Extrait de l’outil Chimie.

Les intitulés des colonnes de ce tableau et les informations à y inscrire sont:

- Technologie : dimension de la technologie pour laquelle la demande d’entrée du nouveau produit chimique est effectuée (ex : 14 nm)
- Nom nouveau produit chimique : nom du produit chimique tel qu’il apparaît dans la fiche de données de sécurité (FDS) obtenue par le fournisseur proposé par le demandeur
- Mélange/Substance : menu déroulant permettant de préciser si le produit chimique concerné est un mélange ou une substance (un mélange étant composé de plusieurs substances)
- Numéro-CAS : numéro d’identification CAS du produit chimique, mentionné dans la FDS
- Classe : cette cellule se remplit automatiquement en fonction du numéro-CAS. Elle informe le demandeur de la catégorie de danger du produit chimique, d’après la liste des substances interdites, exemptées et soumises à déclaration, éditée par STMicroelectronics.
Si le numéro-CAS est référencé comme une substance dangereuse interdite, la valeur de la cellule sera « B » pour Banned. S’il est associé à une substance exemptée, la valeur sera « E » pour Exempted, et s’il s’agit d’une substance soumise à déclaration, la valeur de la cellule sera « D » pour Declarable.
Si le numéro-CAS n’appelle aucune substance dangereuse listée par STMicroelectronics, la cellule prendra la valeur « - ».
- Phrases R : menu déroulant permettant au demandeur de mentionner les phrases de risque R caractérisant le nouveau produit chimique, d’après la FDS.
- Combinaison Phrases R : menu déroulant permettant au demandeur de mentionner les combinaisons de phrases R caractérisant le nouveau produit chimique, d’après la FDS.
- Rubrique ICPE : cette cellule se remplit automatiquement en fonction des phrases R et des combinaisons de phrases R. Elle fait référence aux rubriques ICPE mentionnées dans l’arrêté préfectoral du site.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Code couleur

L'outil Chimie comporte également un code couleur sur certains critères : classe de la substance, phrase R, combinaison de phrases R, rubrique ICPE.

Classe de la substance

La cellule mentionnant la classe des substances prend différentes couleurs (tableau 5.7) :

Classe	Valeur de la cellule	Format de la cellule
Banned	B	B
Exempted	E	E
Declarable	D	D
-	-	-

Tableau 5. 7 Code couleur des cellules dans lesquelles est mentionnée la classe de chaque substance, dans l'outil Chimie.

La classe des substances interdites (banned) apparaît en rouge. Celle des substances exemptées (exempted) apparaît en orange : sauf accord exceptionnel, ces substances ne doivent pas être utilisées sur le site.

La classe des substances soumises à déclaration (declarable) apparaît en jaune : ces substances font l'objet d'une surveillance particulière.

Les substances non classées apparaissent sans affichage particulier.

Phrase R

La cellule où le demandeur indique les phrases R caractérisant le produit chimique prend différentes couleurs (tableau 5.8) :

Catégorie (d'après le CRA)	Phrases R et format de la cellule
- Banned - Catégorie IV (Exempted)	R1, R3, R4, R39, R40, R45, R46, R49, R59, R60, R61, R62, R63, R64, R68
- Catégorie III (Restricted)	R2, R6, R9, R11, R12, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R26, R27, R28, R30, R32, R33, R41, R44, R48
Autres catégories	R5, R7, R8, R10, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R29, R31, R34, R35, R36, R37, R38, R42, R43, R50, R51, R52, R53, R54, R55, R56, R57, R58, R65, R66, R67

Tableau 5. 8 Code couleur des cellules dans lesquelles sont mentionnées les phrases R de chaque substance, dans l'outil Chimie.

Le CRA est basé sur les phrases R : différentes catégories de risque sont définies en fonction des phrases R caractérisant les produits chimiques. Pour les substances interdites et de catégorie IV, la cellule mentionnant la phrase R sera rouge. Pour les substances de catégorie III, cette cellule sera orange. Les substances appartenant aux autres catégories ou non classées, la cellule dans laquelle apparaît la phrase R sera sans couleur.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Combinaison de phrases R

Le code couleur pour les combinaisons de phrases R est identique à celui des phrases R (tableau 5.9).

Catégorie (d'après le CRA)	Phrases R et format de la cellule
- Banned - Catégorie IV (Exempted)	R39/23, R39/23/24, R39/23/24/25, R39/23/25, R39/24, R39/24/25, R39/25, R39/26, R39/26/27, R39/26/27/28, R39/26/28, R39/27, R39/27/28, R39/28, R68/20, R68/20/21, R68/20/21/22, R68/20/22, R68/21, R68/21/22, R68/22
- Catégorie III (Restricted)	R14/15, R15/29, R26/27, R26/27/28, R26/28, R27/28, R48/20, R28/20/21, R48/20/21/22, R48/20/22, R48/21, R48/21/22, R48/22, R48/23, R48/23/24, R48/23/24/25, R48/23/25, R48/24, R48/24/25, R48/25, R50/53, R51/53, R52/53
Autres catégories	R20/21, R20/21/22, R20/22, R21/22, R23/24, R23/24/25, R23/25, R24/25, R36/37, R36/37/38, R36/38, R37/38, R42/43

Tableau 5. 9 Code couleur des cellules dans lesquelles sont mentionnées les combinaisons de phrases R de chaque substance, dans l'outil Chimie.

Rubrique ICPE

Les couleurs des cellules mentionnant les rubriques ICPE pour les substances classées (tableau 5.10) sont établies en fonction des quantités de produits chimiques stockés sur le site et des limites fixées par l'arrêté préfectoral du site.

Ce code couleur a été défini avec la personne responsable du Pôle Chimie au sein du service ESH du site.

Appréciation de l'écart entre la situation sur site et les conditions de l'arrêté préfectoral	Format de la cellule
Très faible : risque d'atteindre les limites sur les quantités stockées	1131, 1111
Faible : à surveiller	1611, 1432
Important : le site peut augmenter les quantités stockées	1200, 1172, 1173, 1630, 1151, 1138, 1136

Tableau 5. 10 Code couleur des cellules dans lesquelles est mentionnée la rubrique ICPE de chaque substance classée, dans l'outil Chimie.

Les rubriques ICPE des produits chimiques classés pour lesquels le site est déjà très proche des conditions fixées par l'arrêté préfectoral en termes de quantités stockées apparaissent en rouge. Celles pour lesquelles le site doit surveiller particulièrement les quantités stockées apparaissent en orange. Les rubriques ICPE des produits chimiques classés pour lesquels les quantités stockées sur site sont encore très inférieures aux prescriptions de l'arrêté préfectoral sont en vert.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

5.4 Conclusion

Le tableau 5.11 résume les différents indicateurs et outils environnementaux que nous proposons de mettre en place :

Catégorie d'indicateurs	Indicateur / Outil par technologie	Période d'utilisation	Type d'indicateur et perspectives
Indicateurs Procédés	Nombre de steps	- Changement de maturité de la technologie - Passage de la technologie en production - Six mois après l'industrialisation de la technologie	- Basés sur les recettes de production - Perspective : automatiser l'exploitation des recettes
	Volumes de produits chimiques consommés pendant les steps	- Passage de la technologie en production - Six mois après l'industrialisation de la technologie	
Macro-indicateurs Environnement	Consommation d'électricité	- Passage de la technologie en production - Six mois après l'industrialisation de la technologie	- Basé sur les données site, en supposant une égale contribution de tous les steps - Perspective : affiner par des mesures pour identifier les steps les plus contributeurs
	Consommation de réactifs de la station de traitement des effluents aqueux industriels		- Hypothèse d'une égale contribution de tous les steps à la consommation de tous les réactifs - Perspective : identifier les steps contributeurs à la consommation de chaque réactif
Micro-indicateurs Environnement	Potentiel de Réchauffement Global	- Passage de la technologie en production - Six mois après l'industrialisation de la technologie	- Basé sur les recettes de production - Perspective : automatiser l'exploitation des recettes
	Consommation d'EDI		- Basés sur les données site, en supposant que les steps identifiés comme contributeurs ont tous le même impact - Perspective : identifier les steps contributeurs ayant le plus d'impact
	Rejets aqueux (Azote, Fluorure, Cuivre) Rejets atmosphériques (Ammoniac, Chlorure d'Hydrogène, Fluor, COV)		
Outil Chimie	Identification des risques liés à l'entrée d'un nouveau produit chimique sur le site	- Demande d'entrée d'un nouveau produit chimique sur le site	-

Tableau 5. 11 Bilan des indicateurs d'aide à l'éco-conception proposés.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Grâce à l'étude des procédés de fabrication microélectronique, qui nous a permis de modéliser une technologie et d'identifier les principaux flux entrants et sortants, nous avons proposé des indicateurs environnementaux permettant d'aider les équipes de R&D à éco-concevoir les futures technologies. Ces indicateurs seront utiles aux acteurs de l'éco-conception des procédés de fabrication puisqu'ils les aideront à prendre des décisions pour diminuer les impacts environnementaux des technologies, en cherchant ainsi à associer les évolutions technologiques à une amélioration des performances environnementales. Nous les avons définis de manière à ce qu'ils soient manipulables par les différents acteurs, notamment par le choix des données sur lesquelles ils sont basés.

Un autre intérêt majeur de la mise en place de ces indicateurs est qu'ils renforceront les échanges entre les différents services du site : les équipes des Opérations, qui disposent d'informations techniques sur les procédés, pourront avoir accès à des données environnementales, et le service ESH disposera de données spécifiques sur les technologies afin de mieux maîtriser leurs impacts sur l'environnement. Les équipes des Opérations pourront ainsi participer à l'amélioration des performances environnementales des technologies après leur industrialisation, et les impacts environnementaux du site seront connus plus finement grâce au suivi d'indicateurs environnementaux spécifiques aux technologies.

Un des intérêts de ce travail était par ailleurs de tenter de répondre à la question suivante : les avancées technologiques impliquent-elles une amélioration ou une dégradation des impacts environnementaux ? Les indicateurs que nous avons proposés, tels qu'ils sont formalisés, ne permettent pas de répondre directement à cette question. Ils sont en effet uniquement basés sur des nombres d'étapes de procédé, et ne tiennent pas compte de l'augmentation du nombre de produits par wafer d'une technologie à la suivante.

Les évolutions des indicateurs environnementaux entre les technologies 45 et 28 nm sont rappelées dans le tableau 5.12 ci-dessous :

Indicateurs	Evolution entre les technologies 45 et 28 nm
Nombre de steps	+ 42 %
Consommation d'électricité	+ 42 %
Consommation de réactifs à la station de traitement	+ 42 %
Consommation d'EDI	+ 55 %
Rejet d'Azote	+ 45 %
Rejet de Fluorure	+ 32 %
Rejet de Cuivre	+ 50 %
Rejet d'Ammoniac	+ 54 %
Rejet de Chlorure d'Hydrogène	+ 38 %
Rejet de Fluor	+ 38 %
Rejet de COV	+ 69 %

Tableau 5. 12 Evolution des indicateurs environnementaux entre les technologies 45 et 28 nm.

Chapitre 5 – Définition d'indicateurs et d'outils environnementaux pour l'aide à l'éco-conception des futures technologies microélectroniques

Les indicateurs augmentent entre 32 et 69 % entre les technologies étudiées.

Or pour un produit de la compagnie avec laquelle nous avons travaillé, le nombre de grilles par mm² de wafer a augmenté de 150 % entre les technologies 45 et 28 nm, comme nous le voyons sur la figure 5.16 ci-dessous :

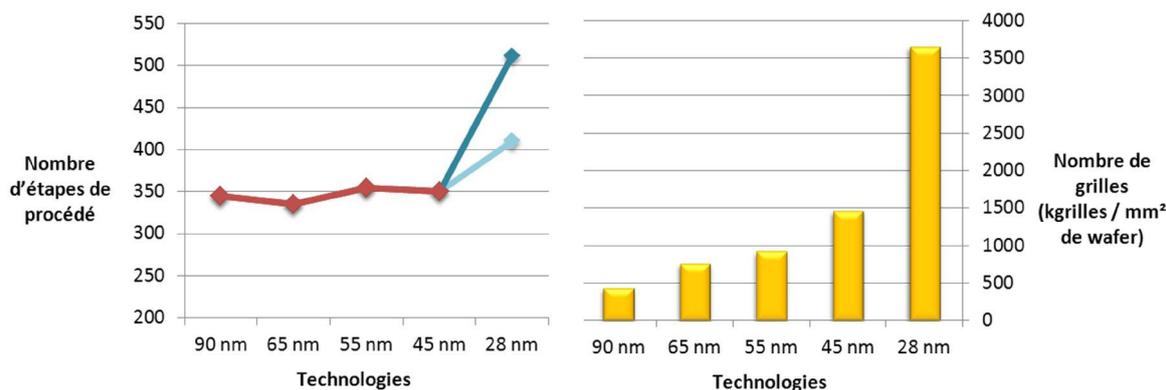


Figure 5. 16 Evolution du nombre d'étapes de procédé et du nombre de grilles avec la diminution de la dimension des technologies.

Le coût et les impacts environnementaux des technologies microélectroniques dépendent en grande partie du nombre d'étapes de procédés. Les évolutions technologiques sont cependant motivées par le gain très important en termes de quantité de produits par wafer (représentée sur la figure 5.16 par le nombre de grilles).

Si l'on rapporte les indicateurs à un produit, nous constatons donc que les impacts environnementaux par produit de la technologie 28 nm sont inférieurs à ceux d'un produit de la technologie 45 nm. Globalement, pour un produit microélectronique, les impacts environnementaux diminuent. Les outils proposés ont pour but de suivre les évolutions de paramètres environnementaux avec les avancées technologiques, et de permettre aux concepteurs de développer des technologies plus performantes.

Remarque : les outils et indicateurs environnementaux présentés dans ce chapitre ne sont actuellement pas déployés sur le site, car ils nécessitent encore des ajustements pour être industrialisables.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

6.1 Conclusions

Le rapport de l'industrie à l'environnement n'a cessé d'évoluer, depuis les premières mesures curatives sur les sites de production, jusqu'à l'éco-conception. L'éco-conception consiste à anticiper les futurs impacts environnementaux des produits ou procédés sur tout leur cycle de vie en intégrant la prise en compte de l'environnement dès leurs phases de conception. L'enjeu sociétal de cette thèse est d'introduire les réflexes d'éco-conception dans les équipes qui développent les nouvelles technologies de la microélectronique.

Les composants électroniques ont des impacts environnementaux sur tout leur cycle de vie. Le nombre d'étapes de procédé augmentant avec la réduction en dimension des composants, certains impacts environnementaux de la phase de fabrication semblent s'intensifier avec les évolutions technologiques. Il est donc nécessaire de chercher à améliorer les performances environnementales des technologies microélectroniques. Ces impacts résultant des décisions prises pendant leur développement, il est indispensable d'intégrer des paramètres environnementaux dans la conception des procédés de fabrication, et donc de les éco-concevoir. Notre question de recherche peut alors se résumer ainsi : comment déterminer les principales caractéristiques environnementales des procédés de fabrication microélectronique, et comment aider les concepteurs à les prendre en compte dans le processus de conception des technologies ?

Nous avons construit notre connaissance autour des procédés de fabrication du site de Crolles 300 de la société STMicroelectronics, le chiffre 300 rappelant le diamètre des tranches de Silicium de 300 mm. Nous nous sommes ainsi intéressés à ce qui se passe dans une usine « Front-End ». La démarche serait identique pour la mise en boîtier du composant (« Back-End »), mais n'est pas discutée dans ce travail.

Notre premier apport a été de décrire en détail le phasage du développement d'une technologie : notion de maturités, puis de route. Une route se compose d'un enchaînement de briques, se décomposant elles-mêmes en étapes de procédés. Ces étapes sont réalisées sur des équipements de production répartis dans différents ateliers intégrés dans une salle blanche. La réalisation de chacune de ces étapes induit des flux entrants et sortants que nous avons caractérisés : consommation de ressources, rejets liquides et gazeux. Parmi ces flux, nous avons sélectionné les paramètres dont il faut tenir compte lors de la conception pour anticiper et diminuer leurs impacts sur l'environnement : la consommation d'énergie, de produits chimiques liquides et gazeux, d'eau ultra-pure, et la charge en certaines substances dans les rejets aqueux et atmosphériques.

Nous avons alors travaillé sur la technologie 45 nm industrialisée depuis le début de l'année 2010. Pour cela, nous avons utilisé deux méthodes complémentaires : une méthode de remontée des informations globalisées au niveau du site, et une méthode analytique à partir des recettes de production. Nous avons montré l'intérêt de cette dernière, beaucoup plus précise pour les consommations de produits chimiques liquides et gazeux. La collecte des données nous a notamment permis d'avoir une première

Chapitre 6 – Conclusions et perspectives

estimation des consommations de gaz et produits chimiques liquides dans la plupart des ateliers de l'usine. Concernant les autres paramètres, nous avons corrélé les échanges de flux au nombre d'étapes de la technologie, puis affiné notre modèle en introduisant la notion d'étapes contributrices, paramètre plus précis. Les méthodes proposées pour le site de Crolles sont facilement transposables à d'autres organisations, ou d'autres sites de production. La collecte des informations ayant été l'un des points durs de notre travail (pas de base de données centralisée fiable), nous verrons dans les perspectives que cela a permis de motiver plusieurs organisations du site à développer un outil industriel de remontée des paramètres clés des recettes.

Notre second apport dans l'aide à l'éco-conception des futures technologies a été de définir des indicateurs à suivre par les différents acteurs : ingénieurs R&D, service ESH, services support à la production, service de gestion. Nous avons défini trois types d'indicateurs : « Procédés », « Environnement », « Chimie ». Les indicateurs « Procédés » reflètent la complexité de la technologie : il s'agit du nombre d'étapes et des volumes de produits chimiques liquides et gazeux consommés pour chaque étape. Notons que par le passé, l'indicateur Corporate pour suivre l'évolution des technologies était le seul nombre de masques, largement insuffisant pour caractériser les technologies d'aujourd'hui. Les indicateurs « Environnement » (consommation d'électricité, d'eau désionisée, de réactifs de la station de traitement, rejets aqueux et atmosphériques), sont les paramètres de consommation et de rejet du site suivis par le service ESH en faisant l'approximation que toutes les étapes de procédé (ou toutes les étapes contributrices, selon les paramètres) ont les mêmes impacts environnementaux. Enfin, l'indicateur « Chimie » concerne la dangerosité et la législation des produits chimiques liquides et gazeux. La définition des indicateurs d'aide à l'éco-conception est accompagnée de préconisations d'utilisation pendant la conception des technologies microélectroniques, et après leur industrialisation.

La figure 6.1 ci-dessous présente les apports des indicateurs environnementaux à différents moments de la vie des technologies microélectroniques :



Figure 6. 1 Apports des indicateurs environnementaux d'aide à l'éco-conception des technologies micro-électroniques

6.2 Perspectives

Les principales perspectives qui se dégagent de ce travail se résument de la façon suivante :

- Amélioration de la collecte et de l'analyse des recettes de production
- Plan de réduction des produits chimiques liquides et gazeux
- Mesures ciblées sur des paramètres globaux
- Action en amont sur les sites concepteurs
- Etude du transfert de notre méthode sur d'autres sites de fabrication microélectronique

Amélioration de la collecte et de l'analyse des recettes de production

L'accès aux détails des recettes de production, et donc aux consommations de produits chimiques, est une difficulté largement relatée dans la littérature et à laquelle nous avons été confrontés lors de ce travail à ST Crolles. Des initiatives individuelles ont permis de collecter des informations pour certains équipements mais pas pour d'autres. Dans la même période, le service de support à la production ("Industrial Engineering"), qui a comme premier objectif d'éviter les ruptures d'approvisionnement et donc l'arrêt de la production, s'est intéressé à cette question. Etant donnée l'orientation du site de Crolles vers une valorisation des filières R&D, cette problématique d'anticipation est devenue une des priorités du site. Un groupe de travail multi-organisationnel incluant les équipes de développement des procédés, de maintenance, de contrôle des coûts, et d'assistance du système de gestion informatique de la production, s'est mis en place récemment pour adresser cette question. Deux ateliers en sont actuellement au stade du pilote avant le déploiement à l'ensemble des ateliers. Le résultat de ce travail d'envergure, dont le service ESH bénéficiera bien évidemment, n'est pas attendu avant 18 mois.

Plan de réduction des produits chimiques liquides et gazeux

Une fois le travail de collecte des données achevé, les experts de chaque atelier pourront définir avec précision les étapes les plus contributrices et mettre en évidence d'éventuelles anomalies par comparaison avec la théorie, avant d'envisager des plans de réduction ciblés dans chaque atelier. Cette méthodologie a été suivie lors d'une thèse à Rousset, conduisant à des réductions significatives des consommations de gaz toxiques associés à des gains de productivité et de coûts sur une étape critique : la gravure des grilles submicroniques.

Mesures ciblées sur des paramètres globaux

Les méthodes d'allocation des flux globaux sur le nombre d'étapes se basent sur l'hypothèse d'une égale participation des étapes contributrices à un impact environnemental. Cette première approximation donne une première idée de la réalité, mais demande à être affinée, paramètre par paramètre. Par exemple concernant l'électricité, il serait pertinent de confronter des mesures de consommation effectuées sur les équipements de l'atelier Traitement Thermique, par définition très consommateur d'électricité, aux données des fournisseurs. La même démarche est à appliquer à l'atelier Wet pour l'eau désionisée.

Action en amont sur les sites concepteurs

Nos outils permettent des analyses et des décisions à partir du démarrage d'une filière sur le site de Crolles. En amont, les technologies sont généralement développées dans des Alliances internationales, hors du site. Il serait donc pertinent de partager les outils et les indicateurs décrits dans ce travail avec ces équipes amont. Concernant l'aspect « gestion des produits chimiques », cela pourrait par exemple consister en l'intégration des contraintes réglementaires les plus strictes des pays dans lesquels les technologies développées seront transférées.

Etude du transfert de notre méthode sur d'autres sites de fabrication microélectronique

Le modèle défini à partir de ce travail est a priori suffisamment générique pour répondre au problème de l'ensemble de l'industrie de la microélectronique. Les technologies sont en effet toutes définies par un enchaînement d'étapes de procédé, réalisées dans des ateliers de production similaires. Il serait cependant intéressant de transférer notre modèle sur d'autres sites, afin d'étudier les ajustements nécessaires à l'implémentation des indicateurs environnementaux proposés.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [ADEME, données 2010] ADEME – Equipements électriques et électroniques. Collection Repères, données 2010.
www.adec.fr/UserFiles/File/Publications_non_ADEC/7439_EquipementsD_EEE2012.pdf
Consultation le 30/05/2013
- [Baudry, 2012] I. Baudry, A. Lelah, D. Brissaud – Data Collection of Chemicals used in Microelectronic Manufacturing Processes for Environmental Studies. In 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 521-526, Berkeley, 2012.
- [Baumann, 2002] H. Baumann, F. Boons, A. Bragd – Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. In Journal of Cleaner Production, 10 : 409-425, 2002.
- [Berkhout, 2001] F. Berkhout, J. Hertin – Impacts of Information and Communication Technologies on Environmental Sustainability: speculations and evidence. Report to the OECD, 2001.
- [Bhamra, 1999] T.A. Bhamra, S. Evans – An Ecodesign Model based on Industry Experience. In IEE Seminar on Engineering and the Environment, London, 1999.
- [Bonvoisin, 2012] J. Bonvoisin, A. Lelah, F. Mathieux, D. Brissaud – An environmental assessment method for wireless sensor networks. In Journal of Cleaner Production, 33 : 145-154, 2012.
- [Boyd, 2010] S.B. Boyd, A. Horvath, D.A. Dornfeld – Life-cycle assessment of computational logic produced from 1995 through 2010. In Environmental Research Letters, 5, 2001.
- [Brundtland, 1987] G.H. Brundtland – Our common future. Oxford University Press, 1987, ISBN 019282080X, 400 pages.
- [BSI, 2007] BS OHSAS 18001: British Standard Occupational Health and Safety Assessment Series. 2007.
- [Carnegie Mellon University] EIO-LCA: Economic Input-Output Life Cycle Assessment.
www.eiolca.net
Consultation le 07/06/2013
- [Commission Européenne, 1996] Directive n°96/82 du 09/12/96 concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses.

Références bibliographiques

- [Commission Européenne, 2006] Règlement (CE) n°1907/2006 du Parlement Européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) n°793/93 du Conseil et le règlement (CE) n°1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission. 2006.
- [Commission Européenne, 2009] Directive 2009/125/CE du Parlement Européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie. 2009.
- [Commission Européenne, 2009] Règlement (CE) n°1221/2009 du Parlement Européen et du Conseil du 25 novembre 2009 concernant la participation volontaire des organisations à un système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS), abrogeant le règlement (CE) n°761/2001 et les décisions de la Commission 2001/681/CE et 2006/193/CE. 2009.
- [Commission Européenne, 2011] Directive 2011/65/UE du Parlement Européen et du Conseil du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (RoHS). 2011.
- [Commission Européenne, 2012] Directive 2012/19/UE du Parlement Européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). 2012.
- [CREDOC, 2010] S. Hoibian (CREDOC) – Enquête « Conditions de vie et Aspirations des Français » n°270, novembre 2010 : « Enquête sur les attitudes et comportements des Français en matière d'environnement, édition 2010 ».
- [Etat Français, 2005] Code de l'Environnement. 2005.
- [Etat Français, 2007] Code de l'Environnement. Article R543-172, version en vigueur au 16 octobre 2007.
- [Etat Français, 2013] Code de l'Environnement. Article L110-1, version en vigueur au 10 juin 2013.
- [GIEC, 2007] Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation de Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Equipe de redaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.
- [Gossart, 2011] C. Gossart (Telecom Business School) – StEP GreenPaper on E-waste Indicators. ISSN : 2219-6560, 15/09/2011.

Références bibliographiques

- [Griese, 2004] H. Griese, K. Schischke, H. Reichl, L. Stobbe – Sustainable Development of Microelectronic Technology Processes, Integration of EcoDesign. In Proceedings of the 6th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, 154-159, 2004.
- [Gutowski, 2007] T. Gutowski, J. Dahmus, A. Thiriez, M. Branham, A. Jones – A Thermodynamic Characterization of Manufacturing Processes. In Proceedings of IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, Orlando, 137-142, 2007.
- [ISO, 2002] ISO/TR 14062:2002 : Management environnemental – Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit. 2002.
- [ISO, 2004] ISO 14001:2004 : Systèmes de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation. 2004.
- [ISO, 2006] ISO 14040 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre. 2006.
- [ITRS, 2011] International Technology Roadmap for Semiconductors, 2011.
- [Krishnan, 2004] N. Krishnan, S. Raoux, D. Dornfeld – Quantifying the Environmental Footprint of Semiconductor Equipment Using the Environmental Value Systems Analysis (EnV-S). In IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 17 (4) : 554-561, 2004.
- [Krishnan, 2008] N. Krishnan, S. Boyd, A. Somani, D. Dornfeld – A Hybrid Life Cycle Inventory of Nano-Scale Semiconductor Manufacturing. In Environmental Science and Technology, 42 : 3069-3075, 2008.
- [Lindahl, 2006] M. Lindahl – Engineering designers' experience of design for environment methods and tools – Requirement definitions from an interview study. In Journal of Cleaner Production, 14 : 487-496, 2006.
- [Liu, 2010] C.H. Liu, S.J. Lin, C. Lewis – Life cycle assessment of DRAM in Taiwan's semiconductor industry. In Journal of Cleaner Production, 18 : 419-425, 2010.
- [Lofthouse, 2006] V. Lofthouse – Ecodesign tools for designers: defining the requirements. In Journal of Cleaner Production, 14 : 1386-1395, 2006.
- [Meadows, 1972] D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens III – The Limits to Growth. Universe Books, 1972, ISBN: 0-87663-165-0, 205 pages.
- [Meadows, 2004] D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers – Limits to Growth: The 30-Year Update. Chelsea Green Publishing Company, 2004, ISBN: 978-1931498586, 338 pages.
- [Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2011 – A] Les prélèvements en eau de l'industrie.
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/333/1200/prelevements-eau-lindustrie.html
Mis à jour le 23/11/2011
Consultation le 29/05/2013

Références bibliographiques

- [Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2011 – B] La consommation d'énergie de l'industrie.
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/333/1200/consommation-denergie-lindustrie.html
Mis à jour le 23/11/2011
Consultation le 29/05/2013
- [Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2011 – C] La production de déchets industriels.
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/333/1200/production-dechets-industriels.html
Mis à jour le 23/11/2011
Consultation le 29/05/2013
- [Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2011 – D] Les investissements de l'industrie pour la protection de l'environnement.
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/333/1200/investissements-lindustrie-protection-lenvironnement.html
Mis à jour le 23/11/2011
Consultation le 05/06/2013
- [Moore, 1965] G.E. Moore – Cramming more components onto integrated circuits. In *Electronics*, 38 (8), 1965.
- [Murphy, 2003 – A] C.F. Murphy, G.A. Kenig, D.T. Allen, J-P. Laurent, D.E. Dyer – Development of Parametric Material, Energy, and Emission Inventories for Wafer Fabrication in the Semiconductor Industry. In *Environmental Science and Technology*, 37 : 5373-5382, 2003.
- [Murphy, 2003 – B] C.F. Murphy, J.-P. Laurent, D.T. Allen – Life Cycle Inventory Development for Wafer Fabrication in Semiconductor Manufacturing. In *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 276-281, 2003.
- [ONU, 1987] Organisation des Nations Unies – Protocole de Montréal du 16 septembre 1987 relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Montréal, 1987.
- [ONU, 1992] Organisation des Nations Unies – Agenda 21 de Rio, programme d'actions pour le 21^{ème} siècle orienté vers le développement durable. Rio, 1992.
- [ONU, 1997] Organisation des Nations Unies – Protocole de Kyoto à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. Kyoto, 1997.
- [Pascual, 2003] O. Pascual, C. Boks, A. Stevels – Electronics Ecodesign Research Empirically Studied. In *Proceedings of 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 89-94, Tokyo, 2003.
- [Plepys, 2004] A. Plepys – The environmental impacts of electronics. Going beyond the walls of semiconductor fabs. In *Proceedings of IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 159-165, 2004.

Références bibliographiques

- [Poudelet, 2012] V. Poudelet, J.-A. Chayer, M. Margni, R. Pellerin, R. Samson – A process-based approach to operationalize life cycle assessment through the development of an eco-design decision-support system. In *Journal of Cleaner Production*, 33 : 192-201, 2012.
- [Schischke, 2001] K. Schischke, M. Stutz, J.-P. Ruelle, H. Griese, H. Reichl – Life Cycle Inventory Analysis and Identification of Environmentally significant aspects in Semiconductor Manufacturing. In *Proceedings of IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 145-150, Denver, 2001.
- [Schmidt, 2011] M. Schmidt, H. Hottenroth, M. Schottler, G. Fetzer, B. Schlüter – Life cycle assessment of silicon wafer processing for microelectronic chips and solar cells. In *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17 : 126-144, 2012.
- [Scharnhorst, 2008] W. Scharnhorst – Life Cycle Assessment in the Telecommunication Industry: A Review. In *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13 (1) : 75-86, 2008.
- [STMicroelectronics Crolles, 2011] Déclaration environnementale 2012 du site de Crolles, 2011.
- [Wenzel, 2000] H. Wenzel, M.Z. Hauschild, L. Alting – *Environmental Assessment of Products: Volume 1: Methodology, Tools and Case Studies in Product Development*. Springer, 2000, ISBN-13: 978-0792378594.
- [Williams, 2002] E.D. Williams, R.U. Ayres, M. Heller – The 1.7 Kilogram Microchip: Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices. In *Environmental Science and Technology*, 36 (24) : 5504-5510, 2002.
- [Williams, 2004] E.D. Williams – Environmental impacts of microchip manufacture. In *Thin Solid Films*, 461 : 2-6, 2004.
- [Yao, 2004] M.A. Yao, A.R. Wilson, T.J. McManus, F. Shadman – Comparative Analysis on the Manufacturing and Consumer Use Phases of Two Generations of Semiconductors. In *Proceedings of IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 97-103, 2004.

ANNEXES

A.1 Consommation de produits chimiques liquides et gazeux du produit majoritaire de la technologie 45 nm, par étape de procédé et par wafer, pour tous les ateliers de production

Nous présentons dans ce paragraphe les consommations de produits chimiques liquides et gazeux, par atelier de production, obtenues à partir des recettes des steps du produit majoritaire de la technologie 45 nm. Ces résultats montrent le classement des étapes de procédé en fonction des quantités de produits chimiques consommés, avec le détail des produits utilisés.

Afin d'améliorer la clarté des graphiques, lorsque certains steps sont beaucoup plus consommateurs que les autres, nous présenterons plusieurs figures.

Pour tous les ateliers dans lesquels des steps sont répétés plusieurs fois, ceux-ci ont été regroupés. Lors de l'interprétation des graphes, il faudra donc tenir compte de la route de la technologie étudiée : une grosse consommation de produit chimique pour une étape de procédé peut s'expliquer par le fait que celle-ci a lieu plusieurs fois au cours de la fabrication du produit.

Nous préciserons les steps pour lesquels nous n'avons pas pu accéder aux recettes. Par ailleurs, nous n'avons aucune donnée issue des recettes pour l'atelier Implantation Ionique.

A.1.1 Atelier Photolithographie

Nous avons vu que les équipements de l'atelier Photolithographie se composaient de deux modules permettant de réaliser des procédés différents : le track et le scanner. Nous n'avons pu obtenir que les consommations des tracks, les données sur les scanners n'étant pas facilement accessibles.

Les étapes de procédé réalisées dans l'atelier Photolithographie sont les suivantes :

Steps (1/2)	Steps (2/2)
H01A	K21D+C045/L450TA/CPLD-E0-A0
A30A+C045/L450TA/ACTI-E0-A0	K25B
H02A	K21D+C045/L450TA/CNLD-E0-A0
K05E+C045/L450TA/NISO-E0-A0	K25B
K28A+C045/L450TA/1NWE-E0-A0	K21D+C045/L450TA/1PSD-E0-A0
K28A+C045/L450TA/1PWE-E0-A0	K25B
K28A+C045/L450TA/2PWE-E0-A0	K21D+C045/L450TA/1NSD-E0-A0
K08C+C045/L450TA/GOX2-E0-A0	K08C+C045/L450TA/SIPR-E0-A0
H01A	A78A+C045/L450TA/CNT1-E0-A0
A30A+C045/L450TA/GATE-E0-A0	A80A+C045/L450TA/LIN1-E0-A0[GATE-0]
H02A	A80A+C045/L450TA/LIX1-E0-A0[LIX1-0]
A77B+C045/L450TA/GATD-E0-A0	A78B+C045/L450TA/VIX1-E0-A0[LIX1-0]
K25B	A80A+C045/L450TA/LIX2-E0-A0[LIX1-0]
K21D+C045/L450TA/2NLD-E0-A0	A78B+C045/L450TA/VIX2-E0-A0[LIX2-0]
K25B	A80A+C045/L450TA/LIX3-E0-A0[LIX2-0]
K21D+C045/L450TA/2PLD-E0-A0	A78B+C045/L450TA/VIX3-E0-A0[LIX3-0]
K25B	A80A+C045/L450TA/LIX4-E0-A0[LIX3-0]
K21D+C045/L450TA/SNLD-E0-A0	A78B+C045/L450TA/VIX4-E0-A0[LIX4-0]
K25B	K53A+C045/L450TA/VIZ1-E0-A0[LIX4-0]
K21D+C045/L450TA/LNLD-E0-A0	K52C+C045/L450TA/LIZ1-E0-A0[LIX4-0]
K25B	K53A+C045/L450TA/VIZ2-E0-A0[LIZ1-0]
K21D+C045/L450TA/SPLD-E0-A0	K52C+C045/L450TA/LIZ2-E0-A0[LIZ1-0]
K25B	K59C+C045/L450TA/PADO-E0-A0[LIZ2-0]
K21D+C045/L450TA/LPLD-E0-A0	K67A+C045/L450TA/ALCA-E0-A0[PADO-0]
K25B	K54E+C045/L450TA/BPAD-E0-A0[PADO-0]

Tableau A. 1 Etapes de procédé de l'atelier Photolithographie pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.

Dans le tableau A.1, les noms des steps sont composés de deux parties : les termes en bleu foncé correspondent aux recettes de track, et ceux en bleu clair aux recettes de scanner.

Les recettes que nous n'avons pas pu obtenir sont celles des étapes suivantes :

- H01A
- H02A

Ces étapes apparaissent chacune deux fois dans la route du produit majoritaire de la technologie 45 nm.

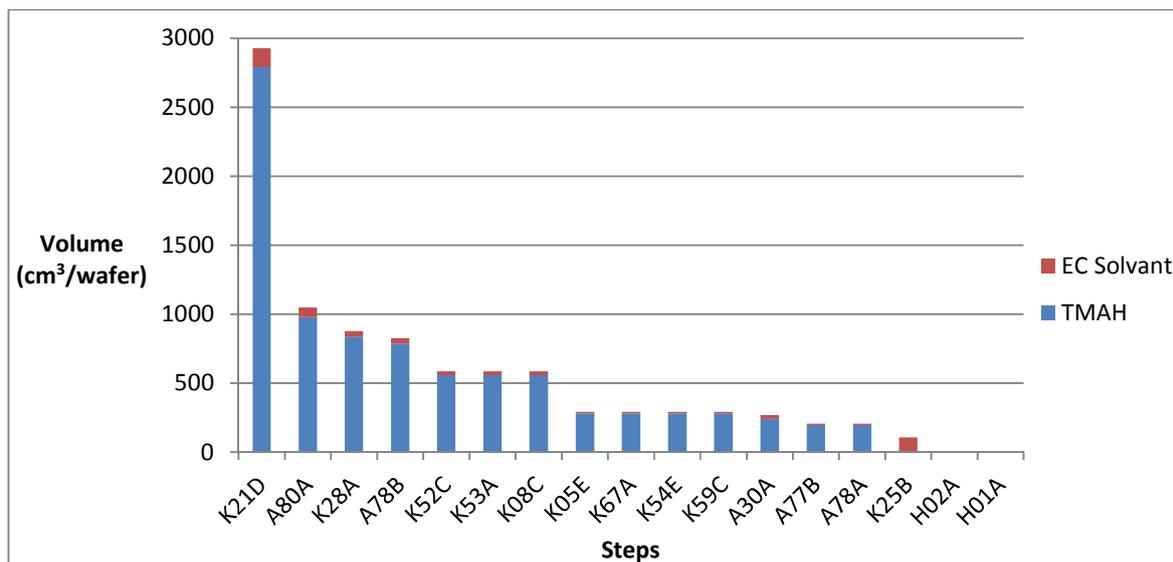


Figure A. 1 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques liquides dans l'atelier Photolithographie, pour les deux produits les plus consommés, pour la technologie 45 nm.

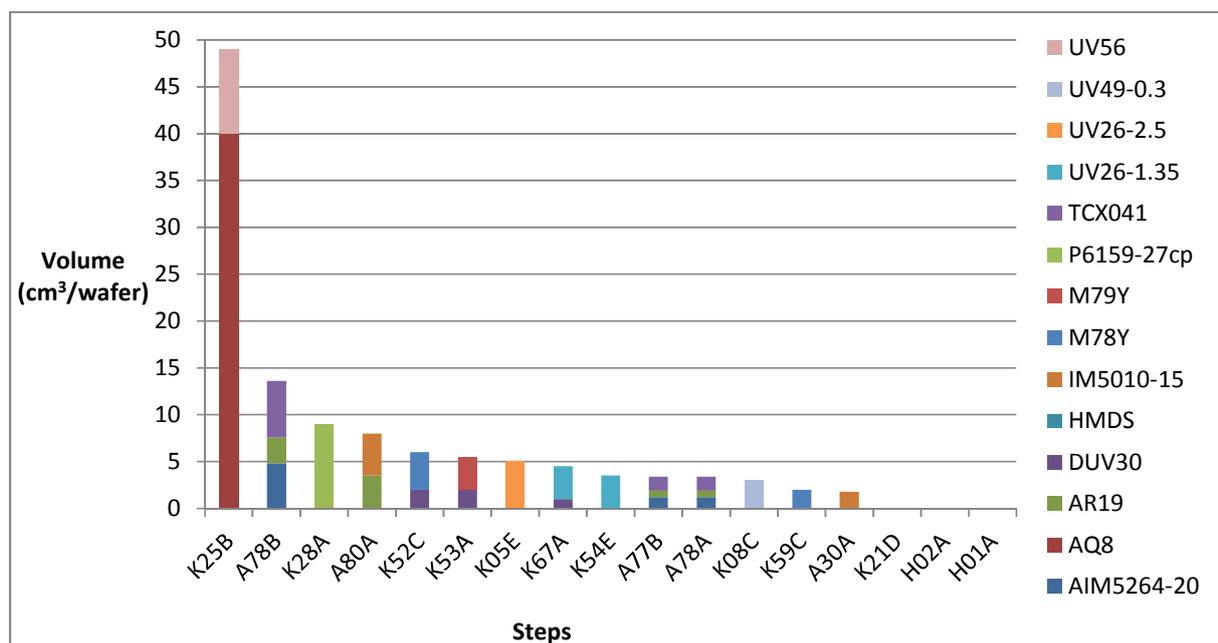


Figure A. 2 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques liquides dans l'atelier Photolithographie, hormis les deux produits les plus consommés, pour la technologie 45 nm.

A.1.2 Atelier Wet

Les étapes de procédé réalisées dans l’atelier Wet sont les suivantes :

Steps (1/2)	Steps (2/2)
B_HFRCAFOR_37	B_AS_TIN_HM
B_POSTNIT_90	B_DHF21_CU-A
B_HF30AM_MOFF_C045	BH2O2HF_NS_C65-A
B_O30_N50	B_AS_POSTHM-A
B_HF35AM_MOFF_C045	BGLYHF_ONLY_40S-A
B_RCAFSSR_MON	BGLYHF_ONLY_40S-A
B_O100_N800	B_NJS_KEITHLEYX3_90
B_HFRCAFOR_90	B_AS_PTEOS-A
B_SS_BACKSIDE-A	B_AS_TIN_HM
BSPM95APM75-FC	B_DHF21_CU-A
B_SS_BACKSIDE-A	BH2O2HF_NS_C65-A
BSPM95APM75-FC	B_AS_POSTHM-A
B_SS_BACKSIDE-A	BGLYHF_ONLY_40S-A
BSPM95APM75-FC	BGLYHF_ONLY_40S-A
BSPM95APM75-FC	B_NJS_KEITHLEYX3_90
B_RCAFSSR_MON	B_AS_PTEOS-A
B_HFRCAFOR_90_C045	B_AS_TIN_HM
B_HFBS_SC1BS_32NS120	B_DHF21_CU-A
B_HF90A_16SPM_20SC1_32NS120_30HCL_C045	BH2O2HF_NS_C65-A
B_SPMSC1_NS40_C045	B_AS_POSTHM-A
B_HF50AM_MOFF_GATEC045	BGLYHF_ONLY_40S-A
B_RCA25RSSR_MOFF	BGLYHF_ONLY_40S-A
B_SPM16S_SC1_5S_NS40_C45	B_NJS_KEITHLEYX3_90
B_SPM16S_SC1_5S_NS40_C45	B_AS_PTEOS-A
B_SPM16S_SC1_5S_NS40_C45	B_AS_TIN_HM
B_SPM16S_SC1_5S_NS40_C45	B_DHF21_CU-A
BSPMRCA75-FC	BH2O2HF_NS_C65-A
B_SPM16S_SC1_5S_NS40_C45	B_AS_POSTHM-A
B_SPM16S_SC1_5S_NS40_C45	BGLYHF_ONLY_40S-A
B_SPM16S_SC1_5S_NS40_C45	BGLYHF_ONLY_40S-A
B_SPM16S_SC1_5S_NS40_C45	B_NJS_KEITHLEYX3_90
B_STRIPW_SPAC_C045	B_AS_SIN_BAR-A
B_STRIP_SD_C045	BHFCONTACU-A
B_STRIP_SD_C045	B_AS_SIN_BAR-A
B_CLEAN_SPIKE_C045	B_AS_BACKSIDE-A
BPASH_SIPROT_C45	BGLY-HF_LZ_C45-B
BPASH_SIPROT_C45	B_NJS_KEITHLEYX3_90
B_CLEAN_SIPROT_C045	B_AS_SIN_BAR-A
B_DESOX_SIPROT_C045	BHFCONTACU-A
B_NIPT_SE-C45	B_AS_SIN_BAR-A
B_FS_ETCHNI_50	B_AS_BACKSIDE-A
B_FS_POSTNIT_60	BGLY-HF_LZ_C45-B
B_CLEAN_PMD_C045	B_NJS_KEITHLEYX3_90
BPE045COSI-A	BHFCONTACU-A
B_SS_POSTCMPW-A	B_AS_SIN_BAR-A
B_AS_PTEOS-A	BHF_FSG-A
B_AS_TIN_HM	B_EDGE_ALU65-6S
B_DHF21_CU-A	B_BR_BSALUCAP-A
BH2O2HF_NS_C65-A	BDS_ALU-A-360S
B_AS_POSTHM-A	BHFCONTACU-A
BGLYHF_ONLY_40S-A	B_LASER_PASSIV
BGLYHF_ONLY_40S-A	BPAD_SAPM-A
B_NJS_KEITHLEYX3_90	BPAD_DS4-A
B_AS_PTEOS-A	

Tableau A. 2 Etapes de procédé de l’atelier Wet pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.

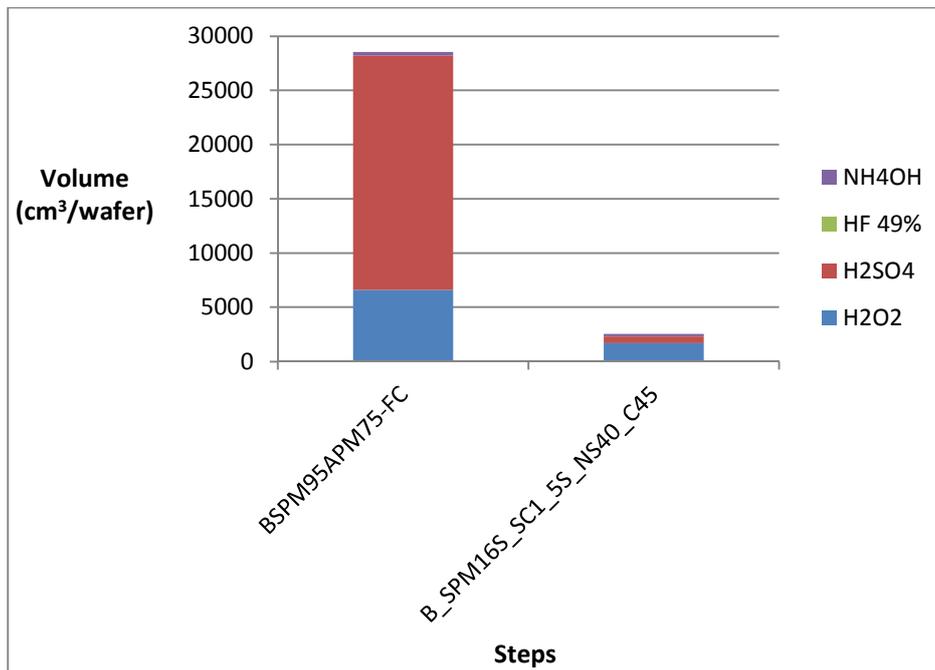


Figure A. 3 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques liquides dans l'atelier Wet, pour les deux étapes les plus consommatrices, pour la technologie 45 nm.

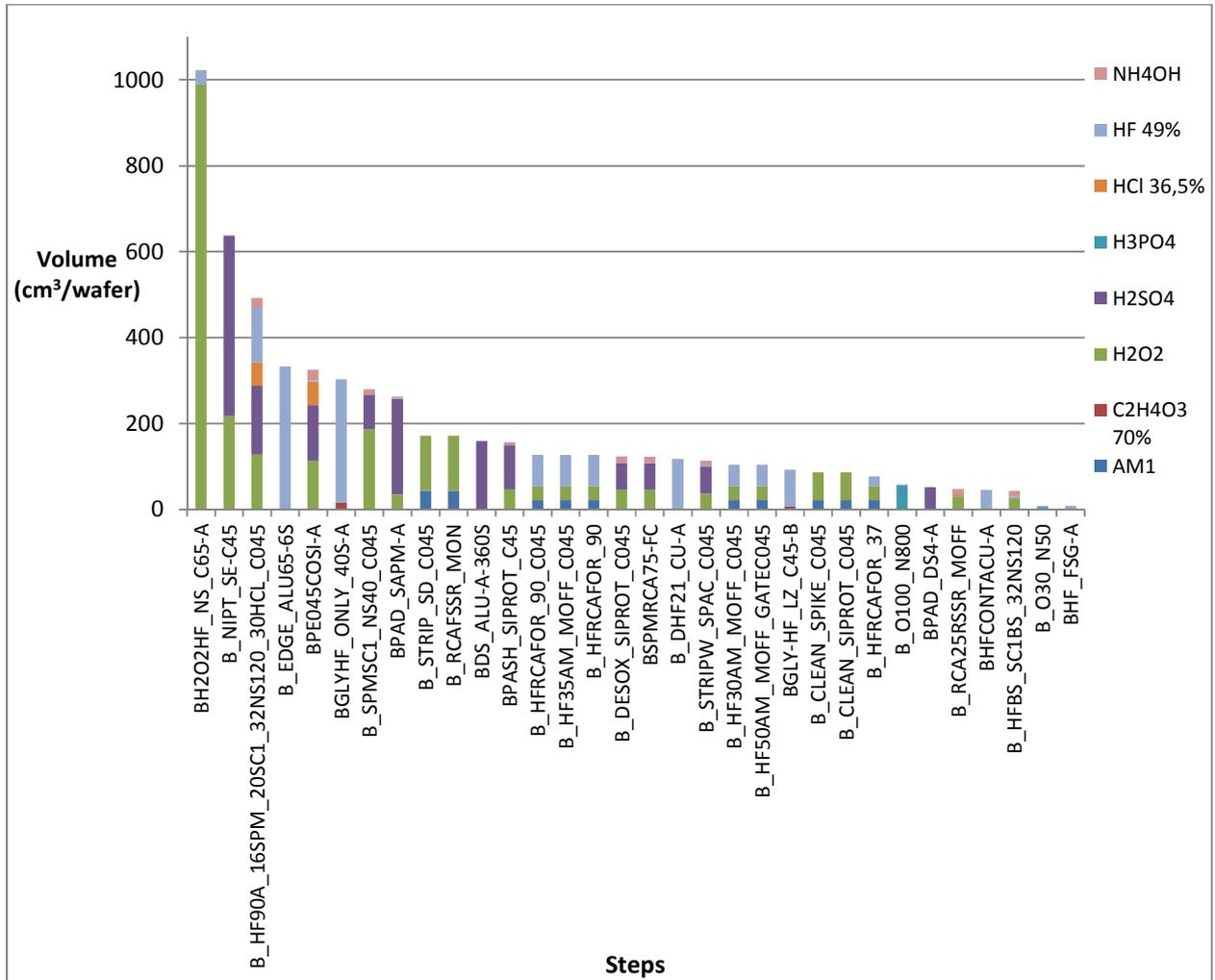


Figure A. 4 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques liquides dans l'atelier Wet, pour les étapes suivantes, pour la technologie 45 nm.

A.1.3 Atelier Etch

Les étapes de procédé réalisées dans l’atelier Etch sont les suivantes :

Steps (1/2)	Steps (2/2)
BSTI-B-C045-A2	BHMLX-B-C045-D7
BEDGE-STI-C45-D0	BVLX-I-C045-X14
BHMGA-B-C045-B6-R	BHMLX-B-C045-D7
BGATD-B-C045-A3	BVLX-I-C045-X14
BEDGE-GATE-C45-D0	BHMLX-B-C045-D7
BSPAZ-N-C045-A0	BVLX-I-C045-X14
BSPAC-D-C045-D5	BVTOP-I-C045-D0
BSMT-E-C045-D0	BLTOP-I-C045-D0
BSIPR-E-C045-C2	BVTOP-I-C045-D0
BCON00-I-C045-D7	BLTOP-I-C045-D0
BHML1-B-C045-D6	BPADO-I-ALL-A2
BLIN1-E-C045-D6	BALCP-B-ALL-N4
BHMLX-B-C045-D7	BPLOT-I-TOS-A0
BVLX-I-C045-X14	

Tableau A. 3 Etapes de procédé de l’atelier Etch pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.

Pour l’atelier Etch, nous avons analysé l’ensemble des recettes correspondant aux steps présentés dans le tableau A.3 ci-dessus.

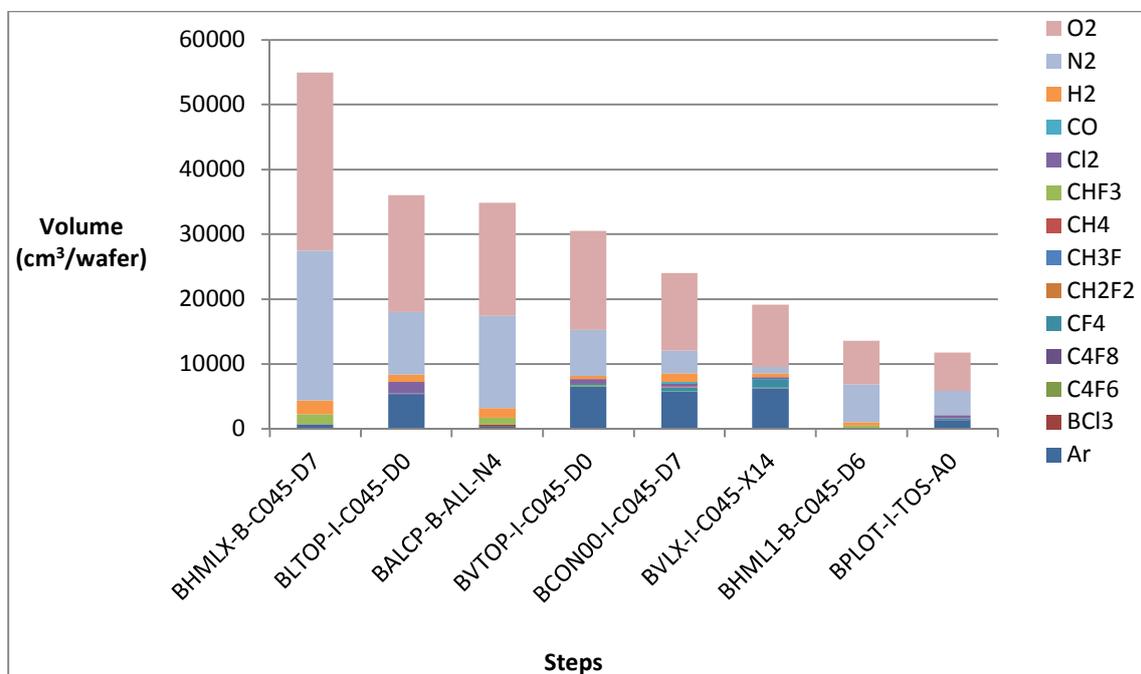


Figure A. 5 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l’atelier Etch, pour les huit étapes les plus consommatrices, pour la technologie 45 nm.

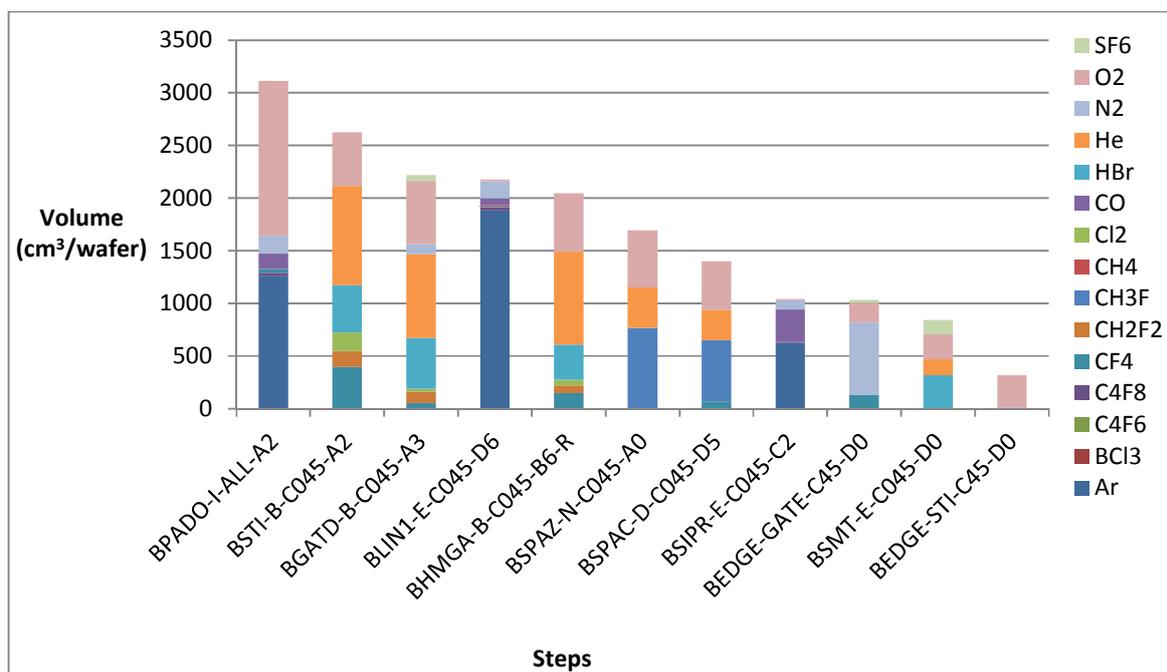


Figure A. 6 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Etch, pour les étapes les moins consommatrices, pour la technologie 45 nm.

A.1.4 Atelier Dry Stripping

Les étapes de procédé réalisées dans l'atelier Etch sont les suivantes :

Steps (1/2)	Steps (2/2)
BDRYS-STI-A0	BDS-LDDSRAM-045-A0
BDESC-A0-20S	BDRYS-ASH-D0
BDRYS-C45L-A1	BDESC-STD-A0
BDRYS-C45L-A1	BDRYS-C45SD-A0
BDRYS-C45L-A1	BDRYS-ASH-D0
BDRYS-C45L-A1	BDESC-STD-A0
BDS-LREOX-C45-A0	BDRYS-C45SD-A0
BDRYS-C45L-A1	BDRYS-ACL-A0
BDRYS-C45L-A1	BDRYS-SIPR-A0
BDS-LDDSRAM-045-A0	BDRYS-PNOF-A0

Tableau A. 4 Etapes de procédé de l'atelier Dry Stripping pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.

Pour l'atelier Dry Stripping, nous avons analysé l'ensemble des recettes correspondant aux steps présentés dans le tableau A.4 ci-dessus.

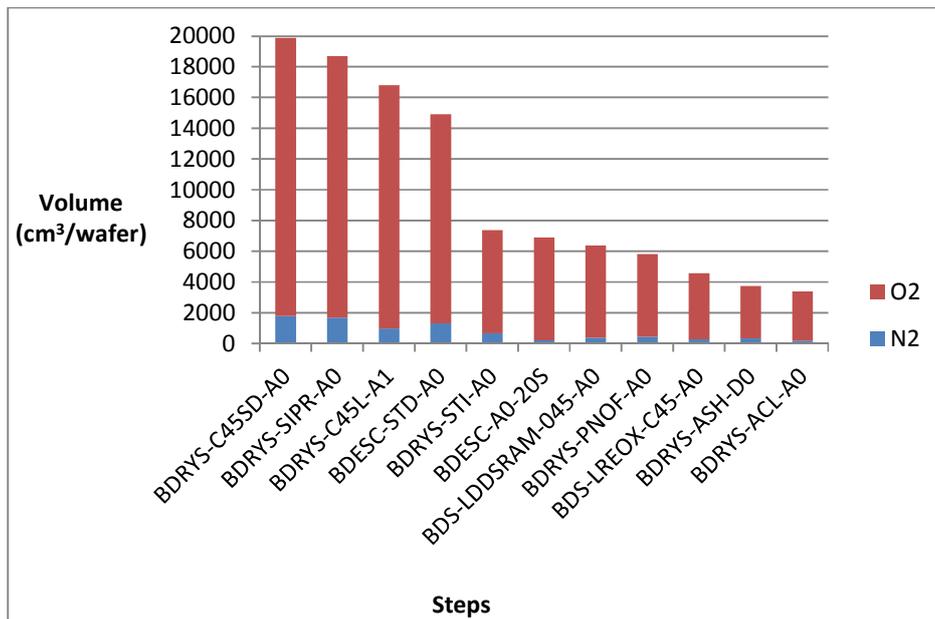


Figure A. 7 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Dry Stripping, pour les deux produits chimiques les plus consommés, pour la technologie 45 nm.

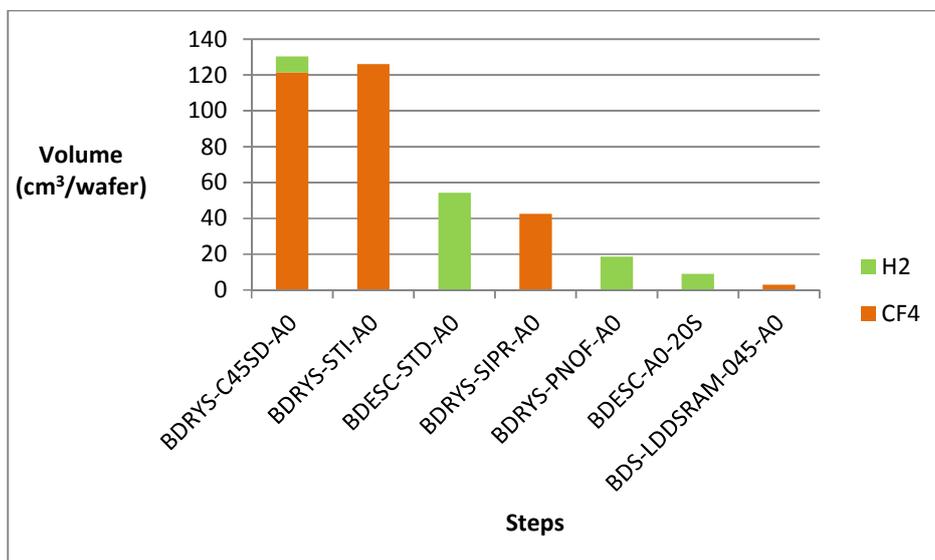


Figure A. 8 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Dry Stripping, pour les autres produits chimiques, pour la technologie 45 nm.

A.1.5 Atelier Métal

Les étapes de procédé réalisées dans l'atelier Métal sont les suivantes :

Steps (1/2)	Steps (2/2)
BNPTNA120PSCF	BTIN15XX0A
BTITN1X30C0450A	BTAB13CU50MXONPA
BW15C065XB1B	BCU055XEA2C
BTIN25XX0A	BTIN15XX0A
BTAB10CU40M1OPPC	BTAB13CU50MXONPA
BCU055XEA2C	BCU055XEA2C
BTIN15XX0A	BTAB13CU90MXOPNA
BTAB13CU50MXONPA	BCU140XEA1C
BCU055XEA2C	BTAB13CU90MXOPNA
BTIN15XX0A	BCU140XEA1C
BTAB13CU50MXONPA	BTAB050XR0B
BCU055XEA2C	BAL14500NOTIN

Tableau A. 5 Etapes de procédé de l'atelier Métal pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.

Les recettes que nous n'avons pas pu obtenir sont celles des steps suivants :

- BW15C065XB1B (apparaît une seule fois dans la route du produit majoritaire de la technologie 45 nm)
- BCU055XEA2C (apparaît cinq fois dans la route)
- BCU140XEA1C (apparaît deux fois dans la route)

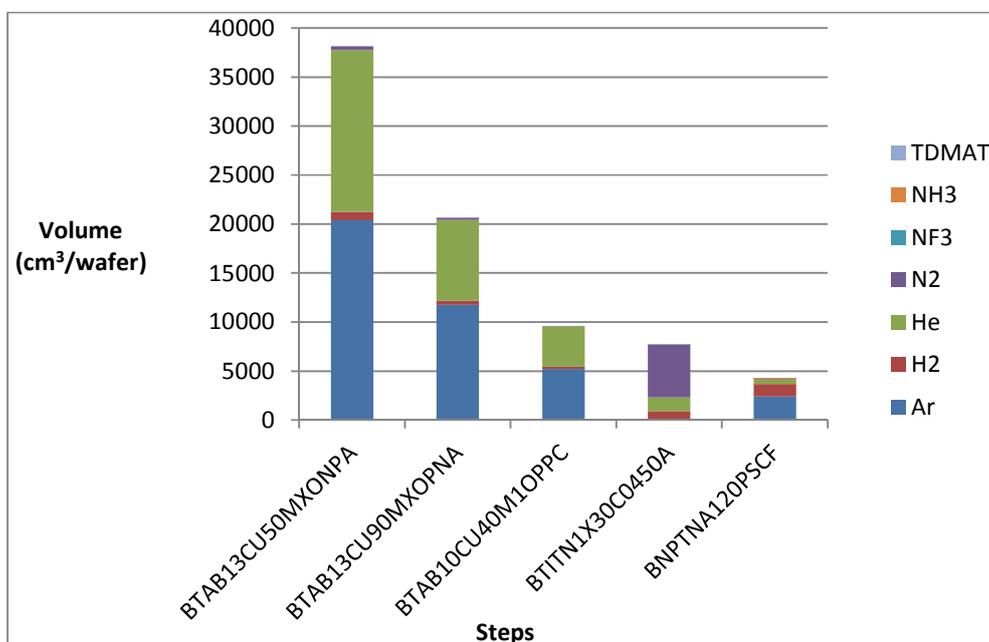


Figure A. 9 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Métal, pour les cinq étapes les plus consommatrices, pour la technologie 45 nm.

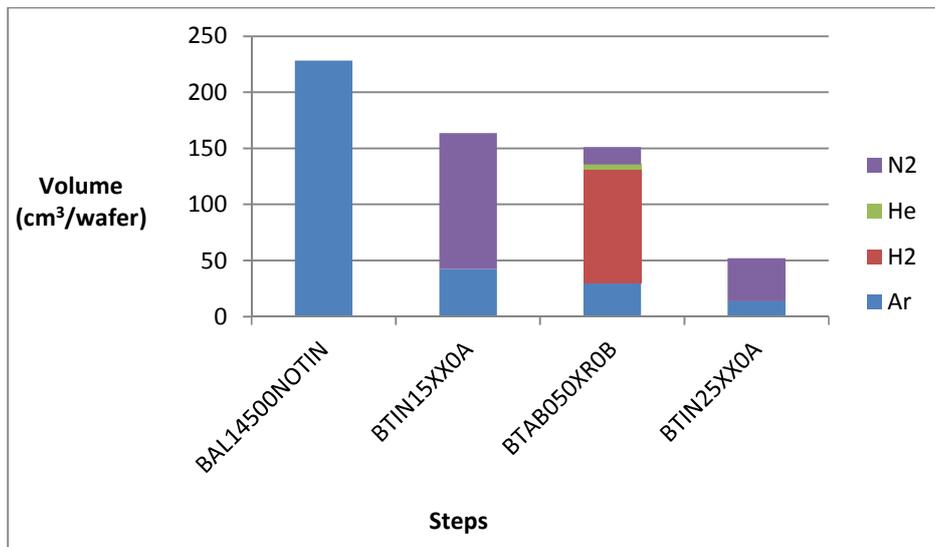


Figure A. 10 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Métal, pour les quatre étapes les moins consommatrices, pour la technologie 45 nm.

A.1.6 Atelier Traitement Thermique

Les étapes de procédé réalisées dans l'atelier Traitement Thermique sont les suivantes :

Steps (1/2)	Steps (2/2)
B_I1050_75A-F	B_TEO004_625ST-B
B_NIT_080_778ST-A	B_N2_060_750-A
B_I850_40A-C	B_HCD_006_590-B2
BWETSTIA	B_HCD_037_590-D
B_I900_75A-C	B_S1000_OFFSET-A
B_A1030_15S-A	B_DSA1130-B
B_I850_30A8-C	B_A280_60S-C
B_C045_LPDGO-E	B_A390_30S-C
B_POL1_080_ST-A	B_MARK_PASS
B_TEO035_675ST-B	B_SIA_020_400-B

Tableau A. 6 Etapes de procédé de l'atelier Métal pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.

Les recettes que nous n'avons pas pu obtenir sont celles des steps suivants :

- B_POL1_080_ST-A
- B_TEO035_675ST-B
- B_TEO004_625ST-B
- B_N2_060_750-A
- B_MARK_PASS
- B_SIA_020_400-B

Ces étapes ne passent chacun qu'une fois au cours de la fabrication du produit étudié.

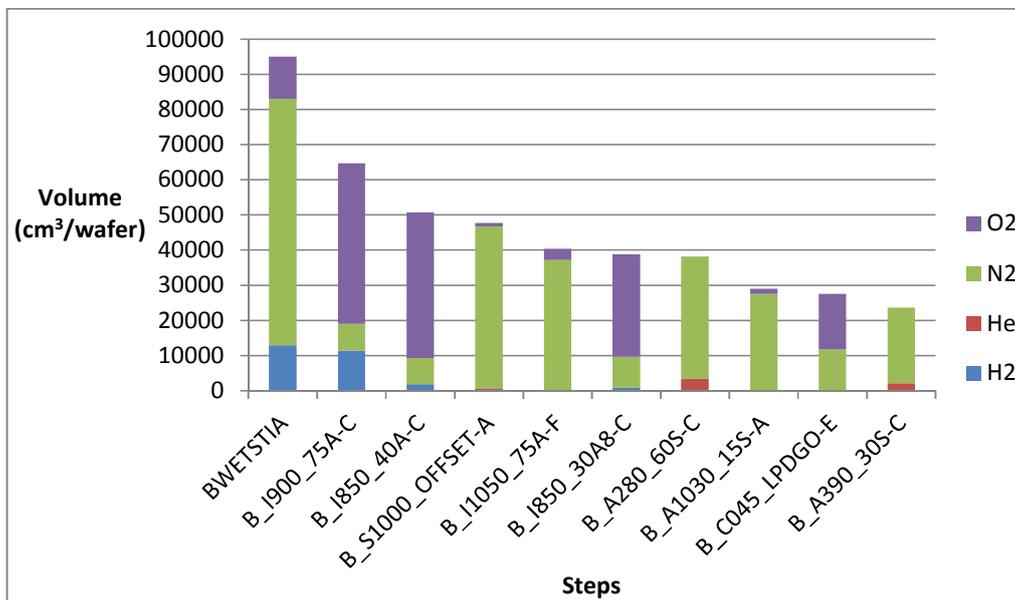


Figure A. 11 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Traitement Thermique, pour les dix étapes les plus consommatrices, pour la technologie 45 nm.

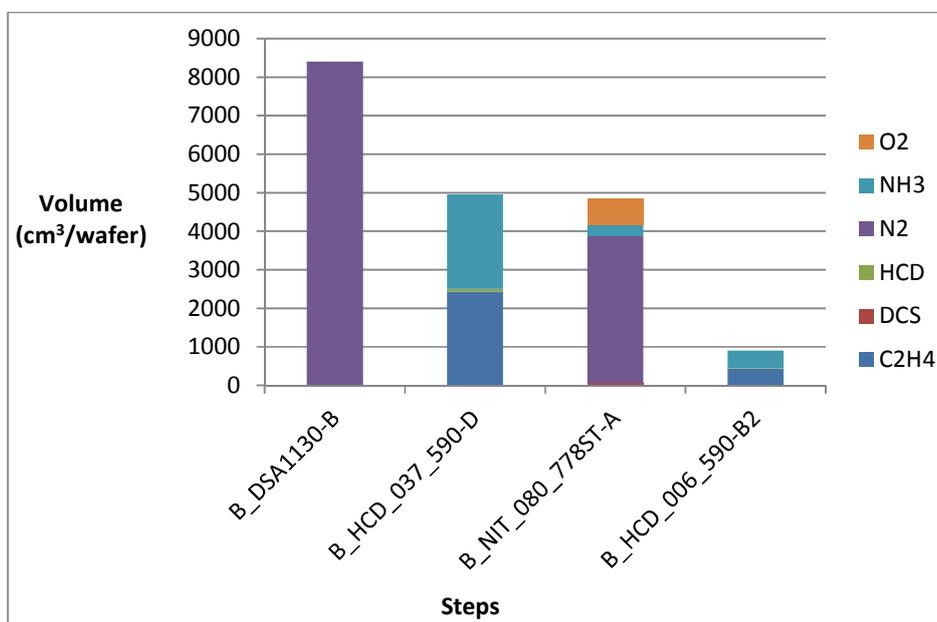


Figure A. 12 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques gazeux dans l'atelier Traitement Thermique, pour les quatre étapes les moins consommatrices, pour la technologie 45 nm.

A.1.7 Atelier Diel

Les étapes de procédé réalisées dans l'atelier Diel sont les suivantes :

Steps (1/2)	Steps (2/2)
BAC_400RFP_300	BUV400_A1_230
BOX_DD1T2_35	BCAP_A1_60
B_H2_60_375	BTEOS_HEA3_40
BSTI_H45B_570	BSICN350_NHA1_42
BAC_400RFP_60	BULKUV_A1_270
BOX_DD1T2_35	BUV400_A1_230
BUSG_LINER_9	BCAP_A1_60
BSIN_SMT2_36	BTEOS_HEA3_40
BAC_550C_440	BSICN350_NHA1_42
BTEOS_V2LDR_27	BULKUV_A1_270
BSIN_UV2X5_46	BUV400_A1_230
BPMD_H45B_70	BCAP_A1_60
BPMD_45A_640	BTEOS_HEA3_40
BAC_400RFP_200	BSICN350_NHA1_63
BOX_10ASI_20	BUSG_STR_600
BSICN_A1_20	BSIN_60
BULKUV_A1_70	BUSG_STR_940
BUV400_A1_60	BSICN_NHA2_60
BCAP_A1_60	BUSG_STR_600
BTEOS_HEA3_40	BSIN_60
BSICN350_NHA1_42	BUSG_STR_940
BULKUV_A1_270	BSIN_NH_40
BUV400_A1_230	BUSG_STR_600
BCAP_A1_60	BTEOS_25
BTEOS_HEA3_40	BPSG_PASS_500
BSICN350_NHA1_42	BSINPASSTR_600
BULKUV_A1_270	

Tableau A. 7 Etapes de procédé de l'atelier Diel pour le produit majoritaire de la technologie 45 nm.

Les recettes que nous n'avons pas pu obtenir sont celles des steps suivants :

- BUSG_STR_600 (apparaît trois fois dans la route du produit majoritaire de la technologie 45 nm)
- BUSG_STR_940 (apparaît deux fois dans la route du produit majoritaire de la technologie 45 nm)

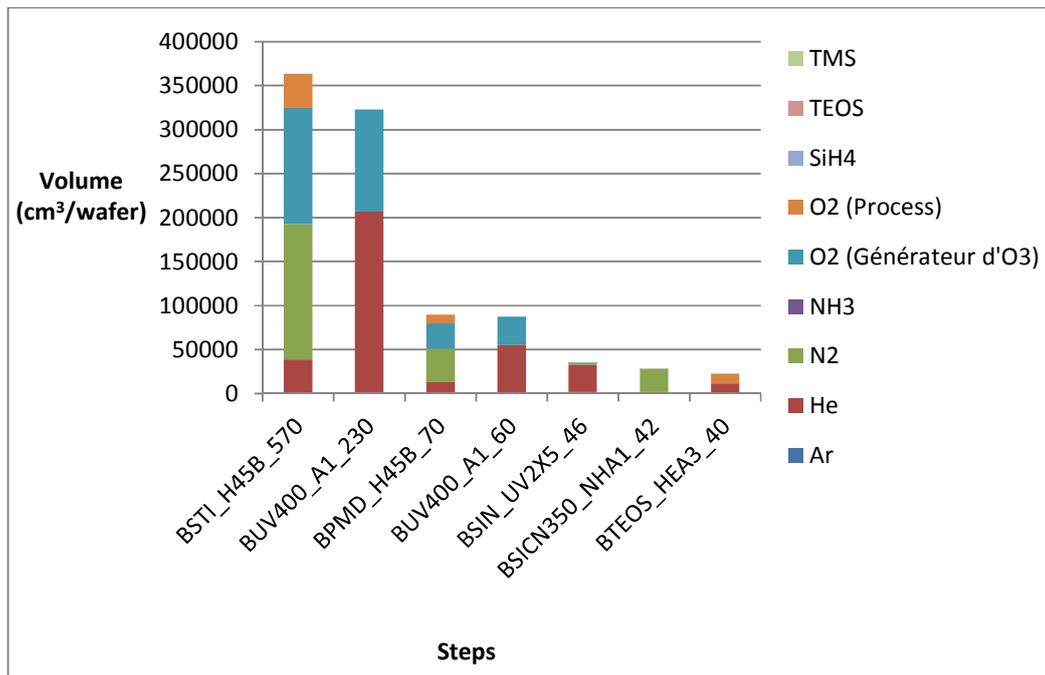


Figure A. 13 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques dans l'atelier Diel, pour les sept étapes les plus consommatrices, pour la technologie 45 nm.

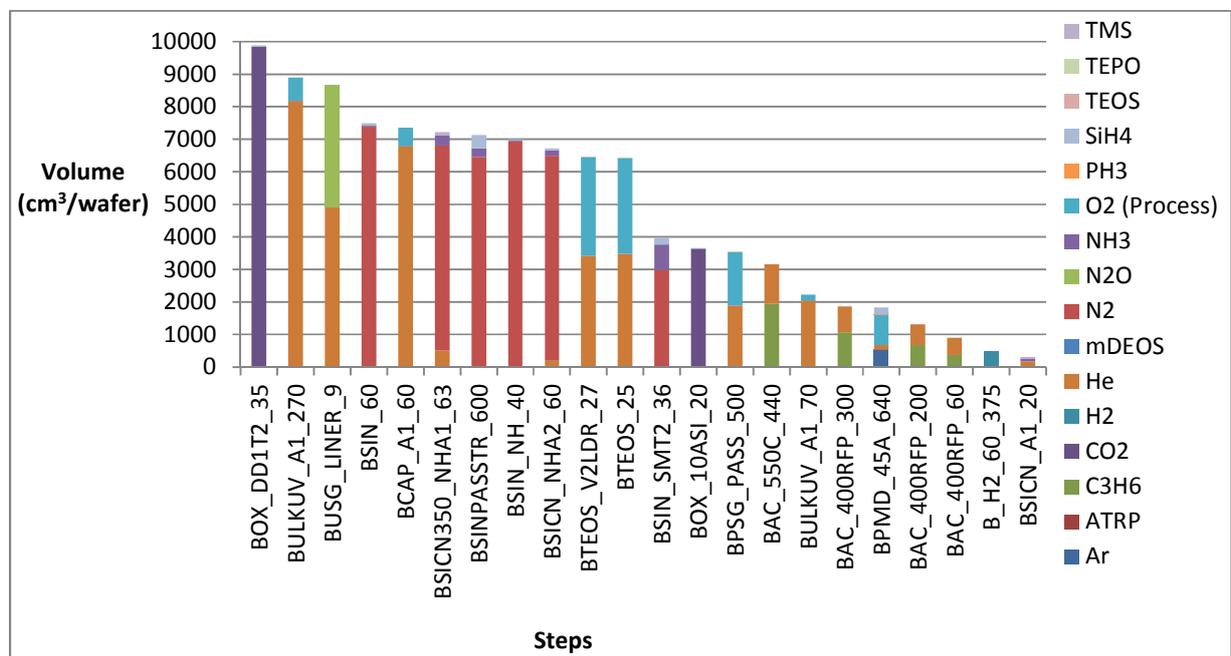


Figure A. 14 Classement des étapes de procédé en fonction de leur consommation de produits chimiques dans l'atelier Diel, pour les sept étapes les moins consommatrices, pour la technologie 45 nm.

A.2 Détail des valeurs mensuelles ou trimestrielles des autres paramètres de consommation et de rejet du site pour l'année 2011

A.2.1 Consommation d'EDI pour l'année 2011

Période	EDI_Site (m ³)	EDI_45 (m ³)	Rapport
Janvier 2011	47595	2372	4,98 %
Février 2011	45653	2937	6,43 %
Mars 2011	45268	3180	7,03 %
Avril 2011	49878	6582	13,20 %
Mai 2011	45630	4507	9,88 %
Juin 2011	46723	6262	13,40 %
Juillet 2011	57651	7632	13,24 %
Août 2011	49560	7985	16,11 %
Septembre 2011	49028	12809	26,12 %
Octobre 2011	60733	14165	23,32 %
Novembre 2011	43844	9212	21,01 %
Décembre 2011	44787	7166	16,00 %
Année 2011	586350	79689	13,59 %

Tableau A. 8 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation d'EDI du site pour l'année 2011.

A.2.2 Consommation de gaz naturel pour l'année 2011

Période	Gaz_Site (m ³)	Gaz_45 (m ³)	Rapport
Janvier 2011	120150	5987	4,98 %
Février 2011	88518	5695	6,43 %
Mars 2011	108164	7599	7,03 %
Avril 2011	136252	17981	13,20 %
Mai 2011	100451	9922	9,88 %
Juin 2011	94424	12655	13,40 %
Juillet 2011	117899	15607	13,24 %
Août 2011	93989	15143	16,11 %
Septembre 2011	94700	24740	26,12 %
Octobre 2011	224319	52320	23,32 %
Novembre 2011	299820	62997	21,01 %
Décembre 2011	181166	28988	16,00 %
Année 2011	1659852	225586	13,59 %

Tableau A. 9 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation de gaz naturel du site pour l'année 2011.

A.2.3 Consommation d'acide sulfurique H₂SO₄ pour l'année 2011

Période	H ₂ SO ₄ _Site (t)	H ₂ SO ₄ _45 (t)	Rapport
Janvier 2011	8,7	0,43	2,49 %
Février 2011	8,7	0,56	3,22 %
Mars 2011	10,4	0,73	3,51 %
Avril 2011	11,9	1,57	6,60 %
Mail 2011	10,9	1,08	4,94 %
Juin 2011	11,0	1,47	6,70 %
Juillet 2011	15,9	2,10	6,62 %
Août 2011	8,5	1,36	8,06 %
Septembre 2011	11,8	3,08	13,06 %
Octobre 2011	13,9	3,24	11,66 %
Novembre 2011	11,9	2,50	10,51 %
Décembre 2011	11,8	1,89	8,00 %
Année 2011	135	18,39	6,80 %

Tableau A. 10 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation d'Acide sulfurique de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

A.2.4 Consommation d'Hydroxyde de Sodium NaOH pour l'année 2011

Période	NaOH_Site (t)	NaOH_45 (t)	Rapport
Janvier 2011	27	1,35	2,49 %
Février 2011	24,3	1,56	3,22 %
Mars 2011	26,6	1,87	3,51 %
Avril 2011	30,1	3,97	6,60 %
Mail 2011	25,9	2,56	4,94 %
Juin 2011	24,4	3,27	6,70 %
Juillet 2011	25,7	3,40	6,62 %
Août 2011	21,0	3,38	8,06 %
Septembre 2011	22,9	5,98	13,06 %
Octobre 2011	23,3	5,42	11,66 %
Novembre 2011	15,2	3,20	10,51 %
Décembre 2011	18	2,87	8,00 %
Année 2011	284	38,63	6,80 %

Tableau A. 11 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation d'Hydroxyde de Sodium de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

A.2.5 Consommation de Chlorure de Calcium CaCl_2 pour l'année 2011

Période	$\text{CaCl}_2_{\text{Site}}$ (t)	CaCl_2_{45} (t)	Rapport
Janvier 2011	22,7	1,13	2,49 %
Février 2011	22,1	1,42	3,22 %
Mars 2011	25,8	1,81	3,51 %
Avril 2011	24,0	3,17	6,60 %
Mai 2011	27,3	2,70	4,94 %
Juin 2011	24,8	3,33	6,70 %
Juillet 2011	24,4	3,22	6,62 %
Août 2011	23,3	3,75	8,06 %
Septembre 2011	21,5	5,61	13,06 %
Octobre 2011	22,1	5,15	11,66 %
Novembre 2011	20,6	4,33	10,51 %
Décembre 2011	18,3	2,92	8,00 %
Année 2011	277	37,61	6,80 %

Tableau A. 12 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation de Chlorure de Calcium de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

A.2.6 Consommation de chaux Ca(OH)_2 pour l'année 2011

Période	$\text{Ca(OH)}_2_{\text{Site}}$ (t)	Ca(OH)_2_{45} (t)	Rapport
Janvier 2011	24,2	1,21	2,49 %
Février 2011	27,9	1,80	3,22 %
Mars 2011	25,4	1,78	3,51 %
Avril 2011	27,0	3,57	6,60 %
Mai 2011	25,8	2,55	4,94 %
Juin 2011	26,8	3,59	6,70 %
Juillet 2011	28,1	3,72	6,62 %
Août 2011	26,7	4,30	8,06 %
Septembre 2011	27,2	7,10	13,06 %
Octobre 2011	29,2	6,80	11,66 %
Novembre 2011	21,3	4,48	10,51 %
Décembre 2011	20,5	3,28	8,00 %
Année 2011	310	42,15	6,80 %

Tableau A. 13 Contribution de la technologie 45 nm à la consommation de chaux de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

A.2.7 Charge d'Azote dans les rejets liquides pour l'année 2011

Période	Azote_Site (kg)	Azote_45 (kg)	Rapport
Janvier 2011	944	47,02	2,49 %
Février 2011	865	55,65	3,22 %
Mars 2011	826	58,00	3,51 %
Avril 2011	868	114,48	6,60 %
Mai 2011	786	77,64	4,94 %
Juin 2011	815	109,16	6,70 %
Juillet 2011	1012	133,90	6,62 %
Août 2011	720	116,00	8,06 %
Septembre 2011	798	208,48	13,06 %
Octobre 2011	921	214,70	11,66 %
Novembre 2011	1437	301,94	10,51 %
Décembre 2011	1470	235,21	8,00 %
Année 2011	11459	1557,36	6,80 %

Tableau A. 14 Contribution de la technologie 45 nm à la charge d'Azote dans les rejets aqueux de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

A.2.8 Charge de Fluorure dans les rejets liquides pour l'année 2011

Période	Fluorures_Site (kg)	Fluorures_45 (kg)	Rapport
Janvier 2011	675	33,61	2,49 %
Février 2011	604	38,86	3,22 %
Mars 2011	676	47,49	3,51 %
Avril 2011	684	90,27	6,60 %
Mai 2011	665	65,64	4,94 %
Juin 2011	651	87,25	6,70 %
Juillet 2011	665	87,96	6,62 %
Août 2011	570	91,83	8,06 %
Septembre 2011	620	161,97	13,06 %
Octobre 2011	612	142,74	11,66 %
Novembre 2011	377	79,11	10,51 %
Décembre 2011	402	64,24	8,00 %
Année 2011	7199	978,33	6,80 %

Tableau A. 15 Contribution de la technologie 45 nm à la charge de Fluorures dans les rejets aqueux de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

A.2.9 Charge de Cuivre dans les rejets liquides pour l'année 2011

Période	Cuivre_Site (kg)	Cuivre_45 (kg)	Rapport
Janvier 2011	10	0,50	2,49 %
Février 2011	10	0,61	3,22 %
Mars 2011	10	0,67	3,51 %
Avril 2011	9	1,19	6,60 %
Mai 2011	9	0,84	4,94 %
Juin 2011	7	0,94	6,70 %
Juillet 2011	6	0,79	6,62 %
Août 2011	4	0,64	8,06 %
Septembre 2011	4	1,04	13,06 %
Octobre 2011	5	1,17	11,66 %
Novembre 2011	7	1,47	10,51 %
Décembre 2011	5	0,80	8,00 %
Année 2011	85	11,48	6,80 %

Tableau A. 16 Contribution de la technologie 45 nm à la charge de Cuivre dans les rejets aqueux de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

A.2.10 Flux massique de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques pour l'année 2011

Période	Chlorure d'Hydrogène_Site (kg)	Chlorure d'Hydrogène_45 (kg)	Rapport
1 ^{er} trimestre 2011	22,41	1,35	6,04 %
2 ^{ème} trimestre 2011	56,45	6,87	12,17 %
3 ^{ème} trimestre 2011	133,47	24,27	18,18 %
4 ^{ème} trimestre 2011	69,50	14,13	20,33 %
Année 2011	281,83	38,30	13,59 %

Tableau A. 17 Contribution de la technologie 45 nm au flux massique de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.

A.2.11 Flux massique de Fluor dans les rejets atmosphériques pour l'année 2011

Période	Fluor_Site (kg)	Fluor_45 (kg)	Rapport
1 ^{er} trimestre 2011	41,44	2,50	6,04 %
2 ^{ème} trimestre 2011	106,11	12,92	12,17 %
3 ^{ème} trimestre 2011	90,55	16,46	18,18 %
4 ^{ème} trimestre 2011	44,19	8,98	20,33 %
Année 2011	282,29	38,37	13,59 %

Tableau A. 18 Contribution de la technologie 45 nm au flux massique de Fluor dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.

A.2.12 Flux massique d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques pour l'année 2011

Période	Ammoniac_Site (kg)	Ammoniac_45 (kg)	Rapport
1 ^{er} trimestre 2011	164,04	9,91	6,04 %
2 ^{ème} trimestre 2011	96,48	11,75	12,17 %
3 ^{ème} trimestre 2011	36,84	6,70	18,18 %
4 ^{ème} trimestre 2011	241,36	49,06	20,33 %
Année 2011	538,72	73,22	13,59 %

Tableau A. 19 Contribution de la technologie 45 nm au flux massique d'Ammoniac dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.

Nous observons une augmentation importante des rejets d'Ammoniac entre le troisième et le quatrième trimestre 2011. De nouveaux équipements ont été installés à la fin de l'année 2011, notamment dans l'atelier Wet, ce qui explique l'augmentation de la charge d'Ammoniac en amont des laveurs, et donc après traitement (les rejets restant toujours inférieurs aux seuils réglementaires).

A.2.13 Flux massique de COV dans les rejets atmosphériques pour l'année 2011

Période	COV_Site (kg)	COV_45 (kg)	Rapport
1 ^{er} trimestre 2011	72	4,35	6,04 %
2 ^{ème} trimestre 2011	78	9,50	12,17 %
3 ^{ème} trimestre 2011	48	8,73	18,18 %
4 ^{ème} trimestre 2011	73	14,84	20,33 %
Année 2011	271	36,83	13,59 %

Tableau A. 20 Contribution de la technologie 45 nm au flux massique de COV dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.

A.3 Contribution moyenne d'une étape de procédé de la technologie 45 nm aux paramètres de consommation et de rejet du site

A.3.1 Consommation d'Hydroxyde de Sodium (NaOH) de la station de traitement

Pour les réactifs consommés à la station de traitement des effluents aqueux industriels, nous considérons que tous les steps réalisés sur le site sont également contributeurs.

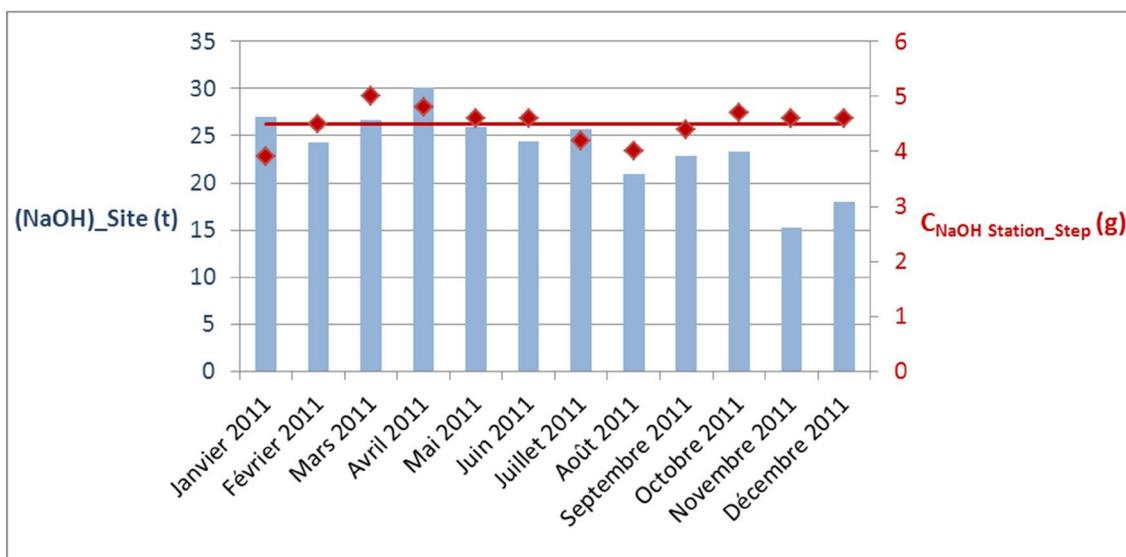


Figure A. 15 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation d'Hydroxyde de Sodium de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

Sur cette figure, (NaOH)_Site représente la consommation d'hydroxyde de sodium de la station de traitement utilisé pour le traitement des effluents aqueux industriels du site.

Les valeurs de $C_{NaOH\ Station_Step}$ varient de 3,9 à 5 g.

Les écarts à la moyenne varient de 0 à 12 %, avec un écart moyen de 5 %.

Nous retiendrons donc la valeur suivante pour la contribution d'un step à la consommation d'hydroxyde de sodium de la station de traitement des effluents aqueux industriels :

$$C_{NaOH\ Station_Step,moyen} = 4,5\ g \quad (A.1)$$

A.3.2 Consommation de Chlorure de Calcium (CaCl_2) de la station de traitement

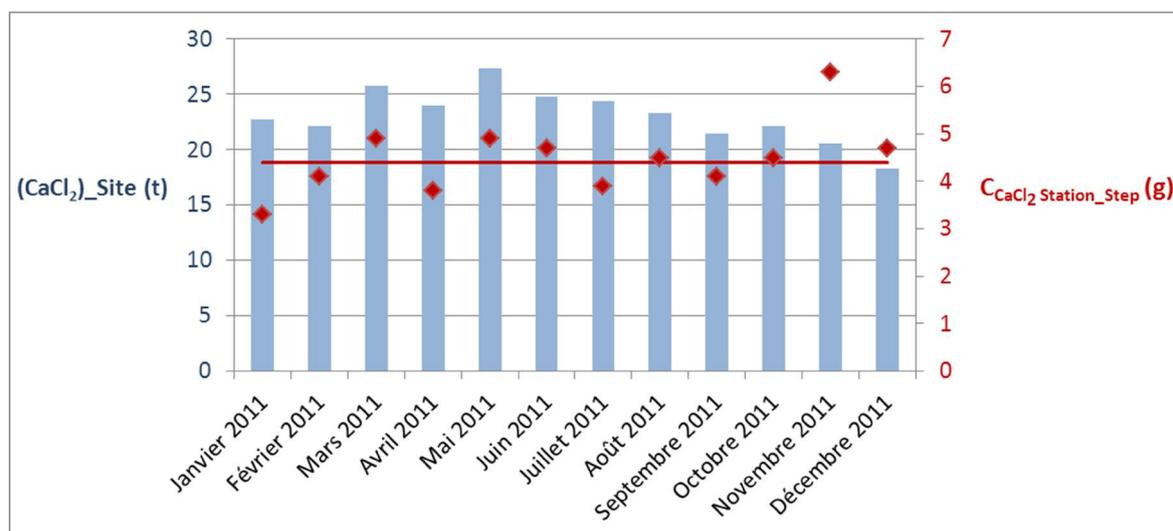


Figure A. 16 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation de chlorure de calcium de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

Sur cette figure, $(\text{CaCl}_2)_{\text{Site}}$ représente la consommation de chlorure de calcium de la station de traitement utilisé pour le traitement des effluents aqueux industriels du site.

Les valeurs de $C_{\text{CaCl}_2 \text{ Station_Step}}$ varient de 3,1 à 6,3 g.

Les écarts à la moyenne varient de 2 à 44 %, avec un écart moyen de 12 %.

Nous retiendrons donc la valeur suivante pour la contribution d'un step à la consommation de Chlorure de Calcium de la station de traitement des effluents aqueux industriels :

$$C_{\text{CaCl}_2 \text{ Station_Step, moyen}} = 4,4 \text{ g} \quad (\text{A.2})$$

A.3.3 Consommation de chaux (Ca(OH)_2) de la station de traitement

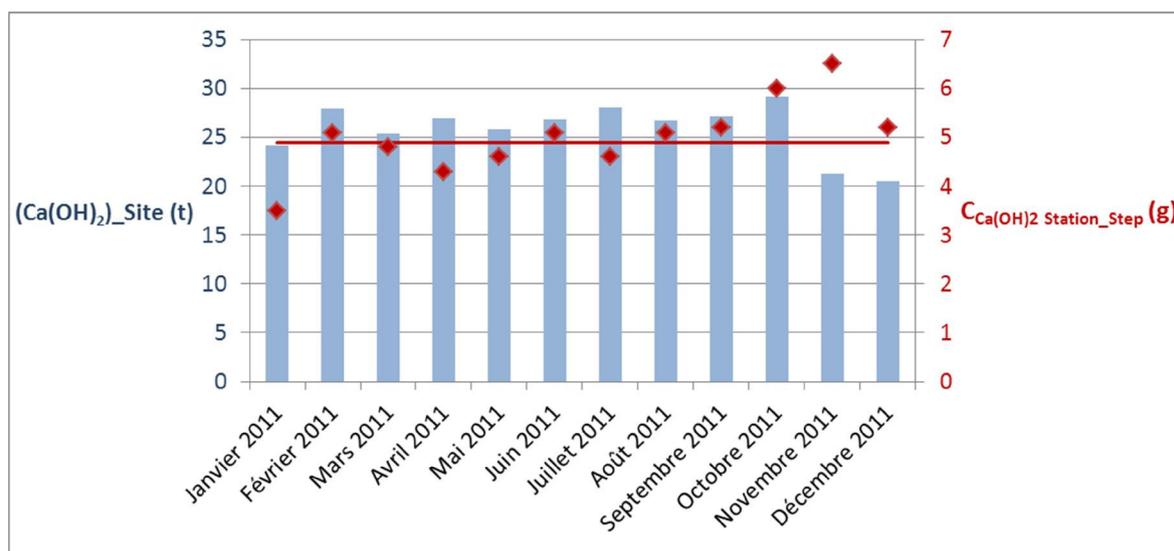


Figure A. 17 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la consommation de chaux de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

Dans ce tableau, $(\text{Ca(OH)}_2)_{\text{Site}}$ représente la consommation de chaux de la station de traitement utilisé pour le traitement des effluents aqueux industriels du site.

Les valeurs de $C_{\text{Ca(OH)}_2 \text{ Station_Step}}$ varient de 3,5 à 6,5 g.

Les écarts à la moyenne varient de 2 à 33 %, avec un écart moyen de 11 %.

Nous retiendrons donc la valeur suivante pour la consommation de chaux à la station de traitement d'un step réalisé sur le site :

$$C_{\text{Ca(OH)}_2 \text{ Station_Step, moyen}} = 4,9 \text{ g} \quad (\text{A.3})$$

A.3.4 Charge de Fluorure dans les rejets aqueux de la station de traitement

Tout comme l'Azote, les fluorures sont présents dans les effluents en sortie de la station de traitement parce qu'ils sont utilisés dans les procédés de fabrication, sous forme d'Acide Fluorhydrique (HF). Nous pouvons alors supposer que la quantité de Fluorures présente dans les rejets aqueux de la station de traitement est uniquement dépendante de l'activité, et donc du nombre de steps réalisés sur le site.

Nous cherchons donc à déterminer la contribution d'une étape de procédé à la charge de Fluorure dans les rejets aqueux de la station de traitement des effluents aqueux industriels.

Annexes

Les ateliers de production dans lesquels sont réalisés des steps ayant un impact sur la charge de fluorures en sortie de la station de traitement sont présentés dans le tableau suivant :

Ateliers de production	Steps
Diel	Tous les steps
Wet	Tous les steps
Traitement Thermique	Tous les steps
Etch	Tous les steps
Métal	Steps de dépôt de Tungstène

Tableau A. 21 Etapes de procédé des technologies du site rejetant des fluorures, par atelier de production.

Les steps des technologies du site ayant un impact sur la charge de Fluorure dans les rejets de la station de traitement sont les suivants :

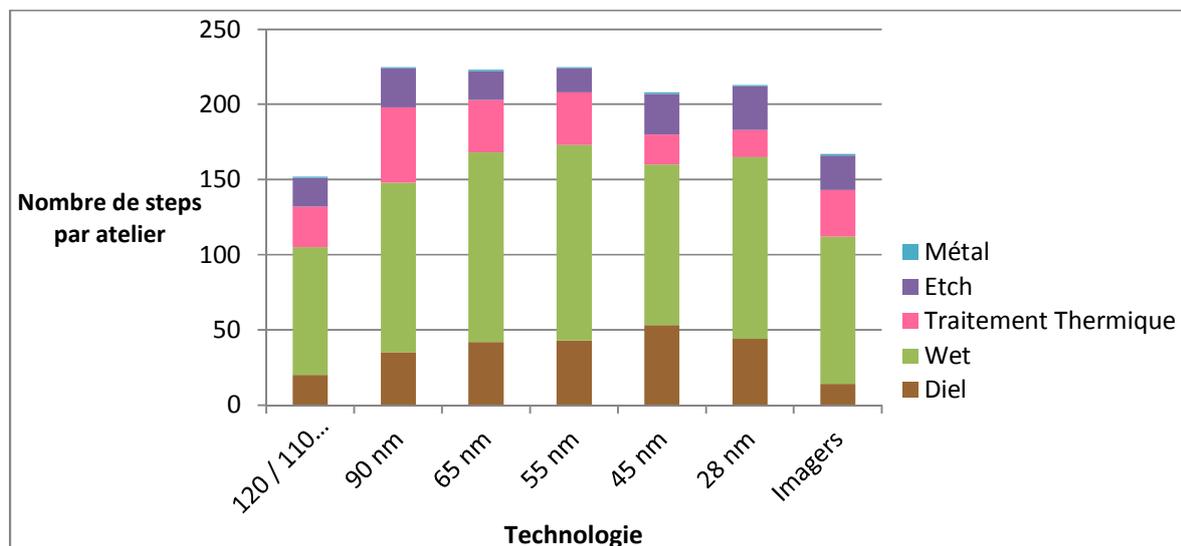


Figure A. 18 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge de fluorure dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels.

Nous pouvons constater que sur cinq ateliers dans lesquels des steps contribuent à la charge de fluorures dans les rejets de la station de traitement, quatre sont des ateliers où les procédés sont presque tous gazeux (Diel, Traitement Thermique, Etch et Métal). Dans ces cas, c'est la partie POU des équipements de ces ateliers qui est connectée au drain liquide ESAFPD. En effet, ces équipements sont munis de systèmes de traitement des PFC, qui consistent en un brûleur-laveur : les substances fluorées passent en phase liquide et doivent donc être dirigées vers la station de traitement.

Par ailleurs, dans le cas des ateliers Diel et Traitement Thermique, ce ne sont pas à proprement parler des étapes de procédé qui consomment des gaz fluorés, et qui ont donc un impact sur la charge de

Fluorures des rejets liquides de la station de traitement, mais des étapes de nettoyage (Clean) liées aux steps.

Nous remarquons que seule une étape de Métal est réalisée dans un équipement connecté à l'ESAFPD : il s'agit d'un step de dépôt de Tungstène.

Les équipements de l'atelier Wet sont quant à eux connectés à l'ESAFPD parce que les procédés de cet atelier utilisent de l'acide fluorhydrique (HF).

Précisons toutefois qu'une partie des Fluorures en sortie d'équipement est trop concentrée pour aller dans le drain ESAFPD, et est donc orientée vers le drain ESAFC (Effluents Ségrégués Acides Fluorés Concentrés) puis stockée en cuve avant d'être évacuée en tant que déchet. L'analyse de la charge des effluents issus de l'ESAFD étant compliquée, nous ne considérons que les fluorures issus du drain ESAFPD : nous obtiendrons donc des valeurs de contribution des steps à la charge de Fluorures pouvant être inférieures à leur contribution réelle.

Nous pouvons alors calculer la contribution de chaque étape de procédé $C_{\text{Fluorure_Step}}$ impactant la charge de Fluorure dans les rejets de la station.

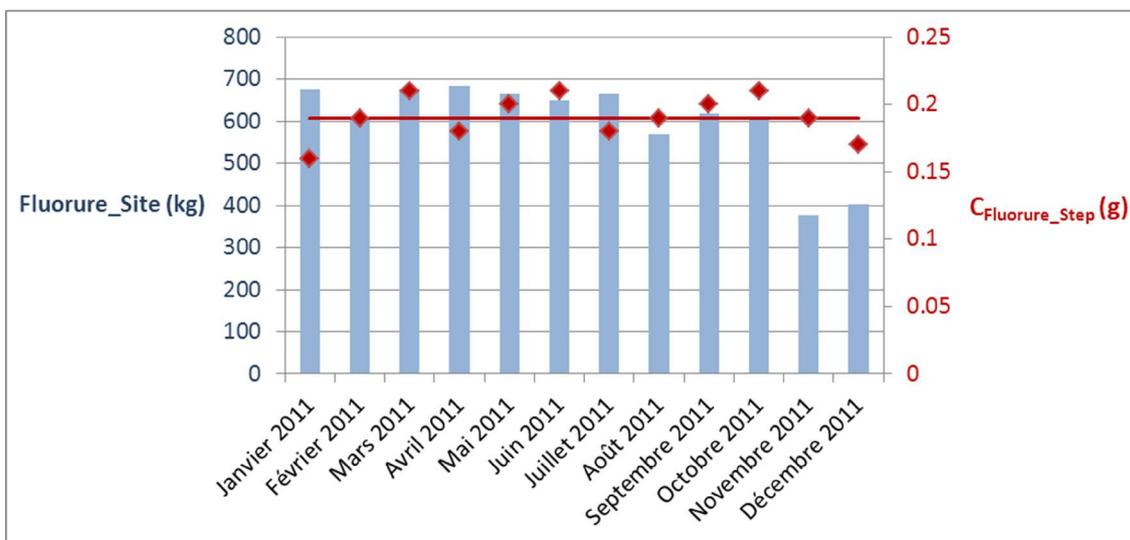


Figure A. 19 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la charge de Fluorure dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

En moyenne sur l'année 2011, un step réalisé sur le site rejette donc 0,19 g de Fluorures dans le milieu naturel.

Les valeurs de $C_{\text{Fluorure_Step}}$ varient de 0,16 à 0,21 g.

Les écarts à la moyenne varient de 1 à 15 %, avec un écart moyen de 7 %.

Les écarts entre les différentes valeurs de $C_{\text{Fluorure_Step}}$ sont assez faibles, et peuvent s'expliquer par une mauvaise ségrégation des effluents en sortie d'équipements : des fluorures présents dans le rejet final

viennent parfois du fait qu'une partie des substances fluorées ne passent pas par le traitement adapté dans la station de traitement.

Nous retiendrons donc la valeur suivante pour la contribution d'un step à la charge en Fluorures dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels :

$$C_{\text{Fluorure Step,moyen}} = 0,19 \text{ g} \quad (\text{A.4})$$

Limites de la méthode

Nous avons considéré que tous les steps réalisés dans l'atelier Wet du site contribuaient à la charge de Fluorure dans les rejets liquides de la station de traitement. En réalité, certaines étapes de procédé n'impactent pas ce paramètre, puisque toutes les étapes de Wet ne consomment pas de substances fluorées.

De plus, nous avons décidé d'intégrer les steps des ateliers Diel et Traitement Thermique dans les steps contributeurs à ce paramètre, alors que ce sont des étapes de Clean qui consomment des substances fluorées. Mais dans la méthode appliquée, nous avons sélectionné uniquement les étapes de procédé dans les routes des technologies, ces étapes de Clean n'y apparaissant alors pas.

A.3.5 Charge de Cuivre dans les rejets aqueux de la station de traitement

Le Cuivre présent dans les effluents en sortie de la station de traitement vient d'étapes de procédé particulières : les steps de polissage d'une couche de Cuivre (CMP Cuivre), et les steps de dépôt de Cuivre (dans l'atelier Métal).

Les steps ayant un impact sur la charge de Cuivre en sortie de la station de traitement sont réalisés dans les ateliers CMP et Métal (tableau A.22).

Ateliers de production	Steps
CMP	Steps de CMP Cuivre
Métal	Steps de dépôt de Cuivre

Tableau A. 22 Etapes de procédé des technologies du site rejetant du Cuivre, par atelier de production.

Les steps des technologies du site ayant un impact sur la charge de Cuivre dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels sont les suivants :

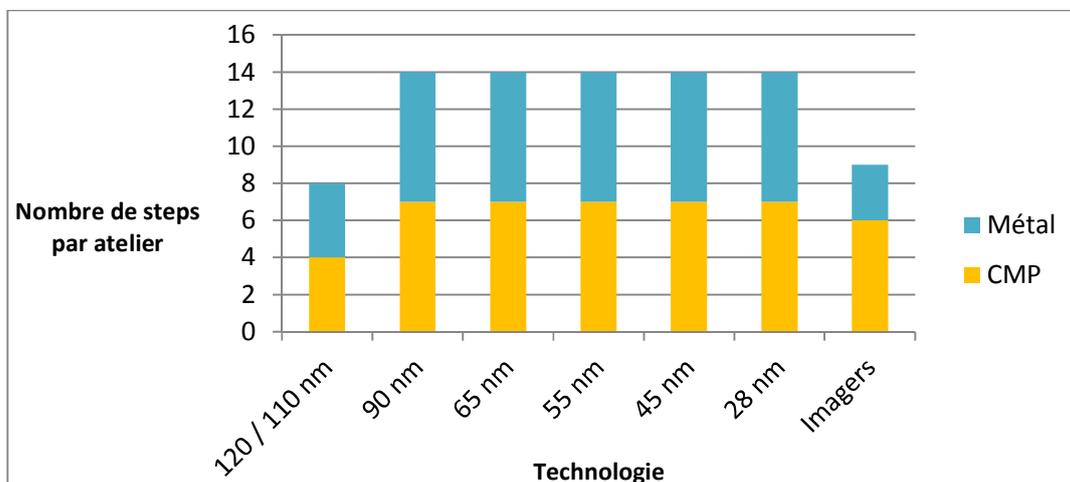


Figure A. 20 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge de Cuivre dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels.

Les steps de l'atelier Métal consomment du gaz, sauf les steps de dépôt de Cuivre qui consistent en dépôt électrolytique humide. Cette étape de dépôt se poursuit dans l'équipement par l'élimination du Cuivre en excès. C'est pourquoi ces étapes influent sur la charge en Cuivre dans les rejets de la station de traitement.

La contribution de chaque étape de procédé $C_{\text{Cuivre_Step}}$ impactant la charge de Cuivre dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels est présentée sur la figure ci-dessous :

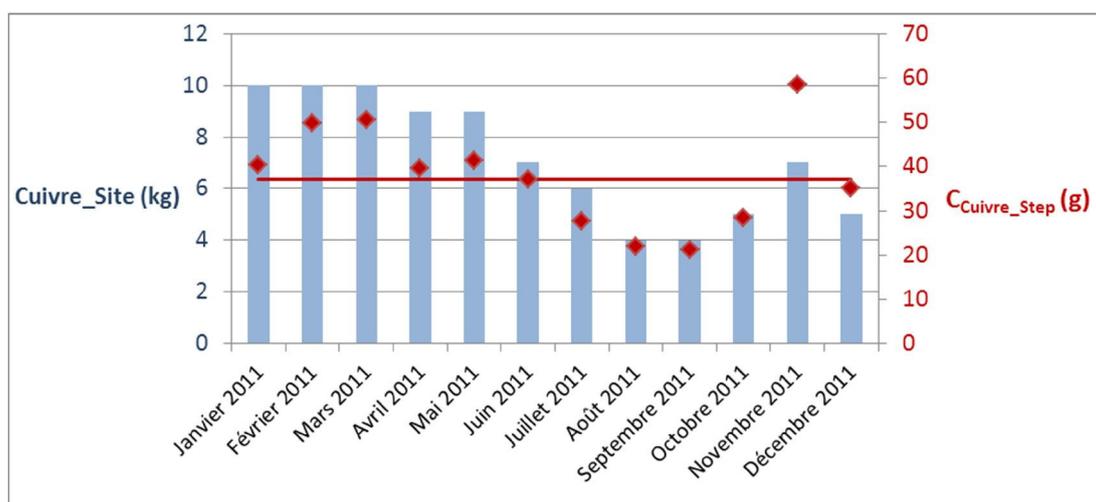


Figure A. 21 Contributions mensuelles d'une étape de procédé à la charge de Cuivre dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels pour l'année 2011.

En moyenne sur l'année 2011, un step réalisé sur le site rejette donc 37,2 mg de Cuivre dans le milieu naturel.

Les valeurs de $C_{\text{Cuivre_Step}}$ varient de 21,2 à 58,4 mg.

Les écarts à la moyenne varient de 0 à 57 %, avec un écart moyen de 24 %.

Les écarts entre les différentes valeurs de $C_{\text{Cuivre_Step}}$ sont relativement importants, alors que le Cuivre présent dans les rejets de la station de traitement ne peut venir que de l'activité du site de Crolles, et plus précisément des steps identifiés comme contributeurs pour ce paramètre.

Nous retiendrons donc la valeur suivante pour la contribution d'une étape de procédé à la charge en Cuivre dans les rejets de la station de traitement des effluents aqueux industriels :

$$C_{\text{Cuivre_Step,moyen}} = 37,2 \text{ mg} \quad (\text{A.5})$$

A.3.6 Charge de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques du site

Le Chlorure d'Hydrogène présent dans les effluents en sortie de la station de traitement a pour origine l'utilisation de substances chlorées pour le process. Les effluents gazeux contenant du Chlore sont ségrégués et dirigés vers des laveurs adaptés via les exhausts Acide (EXA).

L'EXA et les laveurs Acide étant utilisés pour ségréguer et traiter les acides et les toxiques, ils sont connectés à presque tous les équipements du site. Afin d'identifier les steps ayant réellement un impact sur les rejets atmosphériques de Chlorure d'Hydrogène, nous regardons les ateliers dans lesquels, d'après l'étude des recettes de la technologie 45 nm, des substances chlorées sont consommées.

Les étapes de procédé contribuant à la charge de Chlorure d'Hydrogène en sortie des laveurs Acide sont réalisées dans les ateliers suivants :

Ateliers de production	Steps
Traitement Thermique	Tous les steps
Etch	Tous les steps
Wet	Tous les steps

Tableau A. 23 Etapes de procédé des technologies du site rejetant du Chlorure d'Hydrogène, par atelier de production.

L'atelier Traitement Thermique a été identifié comme contributeur au rejet de Chlorure d'Hydrogène car certains steps y consomment du Dichlorosilane et de l'Hexachlorodisilane.

Concernant l'atelier Etch, c'est l'utilisation, pour certaines étapes, de Dichlore (Cl_2) et de Trichlorure de Bore (BCl_3) qui permet de le classer parmi les ateliers contributeurs.

Enfin, de l'acide chlorhydrique (HCl) est consommé dans l'atelier Wet, et provoque des dégagements de gaz chloré.

Annexes

Le nombre d'étapes de procédé ayant un impact sur la charge de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques du site est présenté dans la figure suivante :

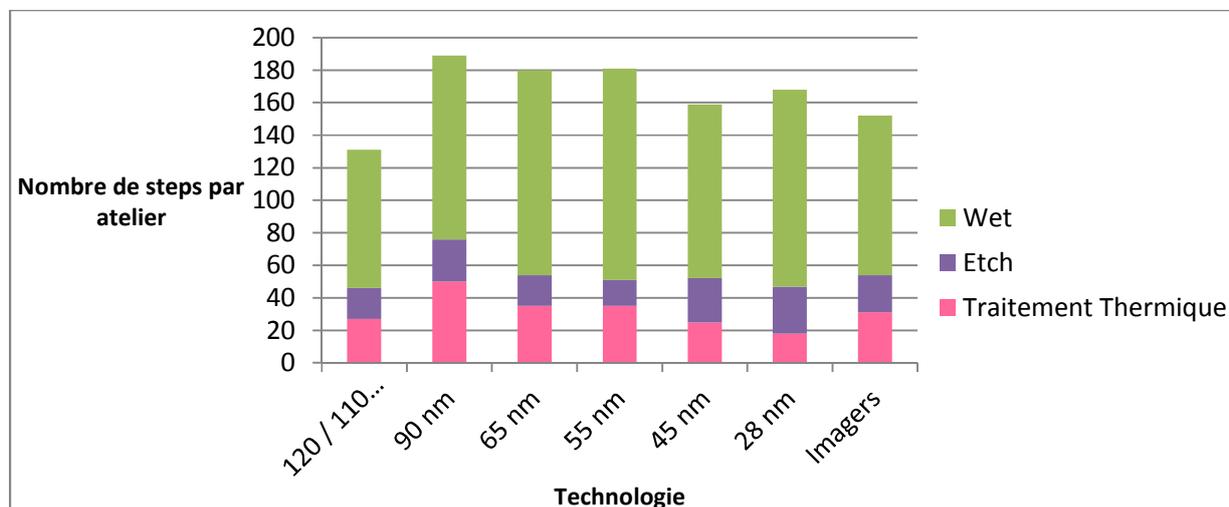


Figure A. 22 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques.

La figure A.23 présente la contribution $C_{\text{Chlorure_Step}}$ de chaque step impactant la charge de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques du site.

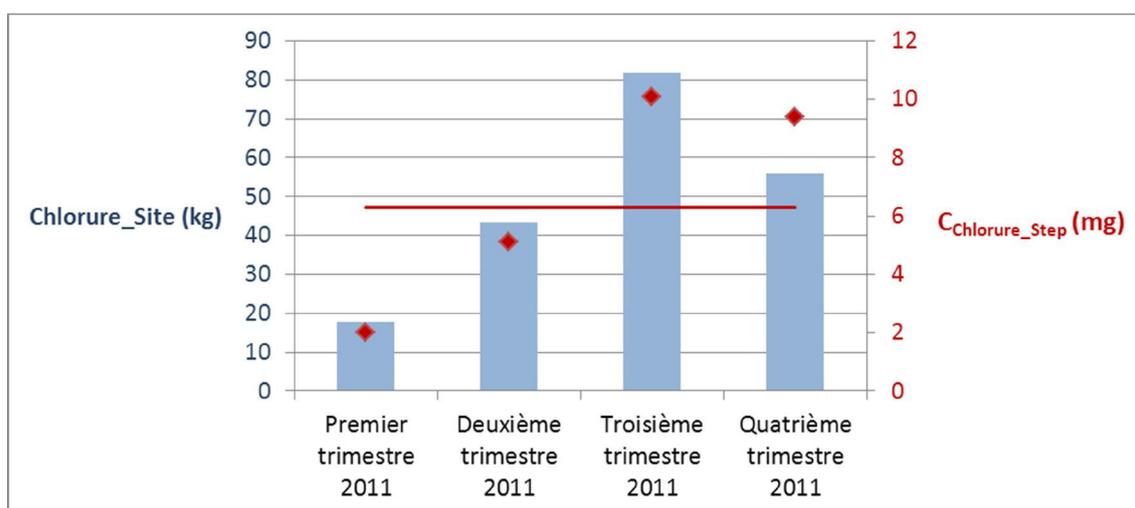


Figure A. 23 Contributions trimestrielles d'une étape de procédé à la charge de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.

En moyenne sur l'année 2011, un step réalisé sur le site rejette donc 6,3 mg de Chlorure d'Hydrogène dans le milieu naturel.

Les valeurs de $C_{\text{Chlorure_Step}}$ varient de 2,0 à 10,1 mg.

Les écarts à la moyenne varient de 20 à 68 %, avec un écart moyen de 49 %.

Les écarts entre les différentes valeurs de $C_{\text{Chlorure_Step}}$ sont importants. Là encore, la précision des données ne permet pas une analyse fine des rejets du site.

Pour ce paramètre, nous n'avons tenu compte que de la charge de Chlorure d'Hydrogène présente dans les rejets en sortie des laveurs Acide, alors qu'il y en a également en sortie des laveurs Ammoniac. Cependant, la majorité du Chlorure d'Hydrogène rejeté dans le milieu naturel par le site de Crolles 300 passe par les EXA et les laveurs Acide.

Nous retiendrons donc la valeur suivante pour la contribution d'une étape de procédé à la charge en Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques du site :

$$C_{\text{Chlorure_Step,moyen}} = 6,3 \text{ mg} \quad (\text{A.6})$$

Limites de la méthode

Pour les trois ateliers dans lesquels nous avons identifié des steps contribuant à la charge de Chlorure d'Hydrogène dans les rejets atmosphériques du site, nous avons tenu compte de tous les steps réalisés. Or certaines étapes de ces ateliers ne consomment pas de substances contenant du Chlore, et n'ont donc *a priori* pas d'impact sur ce paramètre.

A.3.7 Charge de Fluor dans les rejets atmosphériques du site

Le Fluor présent dans les effluents en sortie de la station de traitement vient de l'utilisation de substances fluorées pour le process. Les effluents gazeux contenant du Fluor sont ségrégués et dirigés vers des laveurs adaptés via les exhausts Acide (EXA).

De la même façon que pour le Chlorure d'Hydrogène, pour identifier les étapes de procédé ayant réellement un impact sur les rejets atmosphériques de Fluor, nous regardons les ateliers dans lesquels, d'après l'étude des recettes de la technologie 45 nm, des substances fluorées sont consommées.

Les steps contribuant à la charge de Fluor en sortie des laveurs Acide sont réalisés dans les ateliers suivants :

Ateliers de production	Steps
Métal	Tous les steps
Etch	Tous les steps
Dry Stripping	Tous les steps
Diel	Tous les steps
Wet	Tous les steps
Implantation Ionique	Steps de dopage au Fluor

Tableau A. 24 Etapes de procédé des technologies du site rejetant du Fluor, par atelier de production.

Annexes

Les ateliers Métal, Etch, Dry Stripping, Wet et Implantation Ionique ont été identifiés comme contributeurs au rejet de Fluor car certaines étapes y consomment des espèces fluorées : Trifluorure d'Azote (NF_3) en Métal ; Difluorométhane (CH_2F_2), Trifluorométhane (CHF_3), Fluorométhane (CH_3F), Tétrafluorométhane (CF_4), Hexafluorobutadiène (C_4F_6), Octafluorobutène (C_4F_8), et Hexafluorure de Soufre (SF_6) en Etch ; Tétrafluorométhane (CF_4) en Dry Stripping ; acide fluorhydrique (HF) en Wet et composés fluorés en Implantation Ionique.

Pour les mêmes raisons que lorsque nous avons identifié les steps ayant un impact sur la charge de Fluorures dans les rejets liquides de la station de traitement, nous avons décidé d'intégrer les steps réalisés dans l'atelier Diel comme contributeurs à la charge de Fluor du site. Même si les équipements de cet atelier sont généralement munis de systèmes de POU brûleur-laveur, il est possible qu'une partie du Fluor reste en phase gazeuse, et ait un impact sur la charge de Fluor dans les rejets atmosphériques.

Le nombre d'étapes de procédé ayant un impact sur la charge de Fluor dans les rejets atmosphériques du site figure sur le graphe suivant :

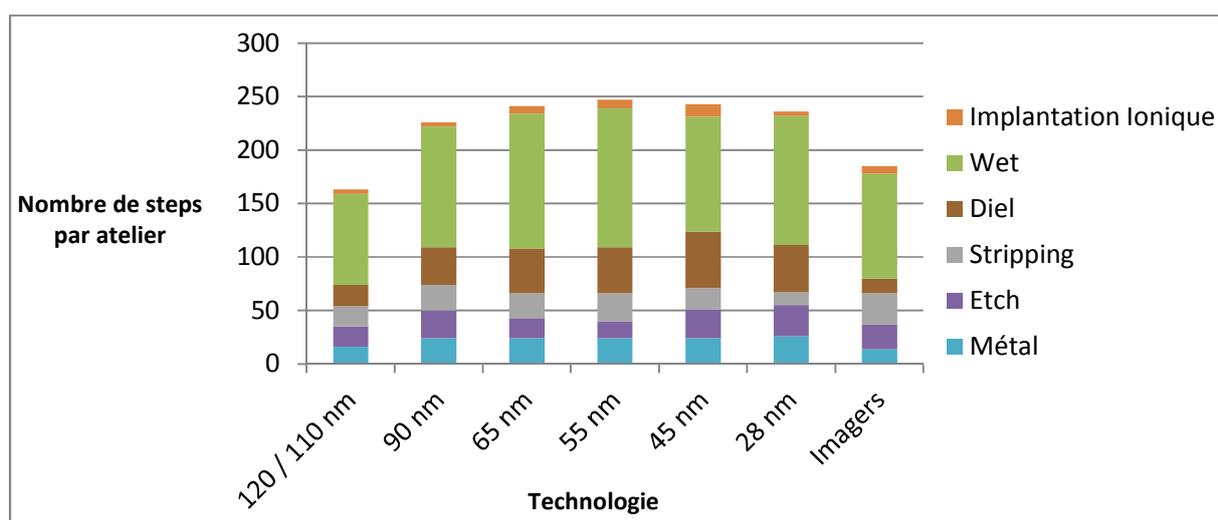


Figure A. 24 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge de Fluor dans les rejets atmosphériques.

La figure A.25 présente la contribution $C_{\text{Fluor_Step}}$ de chaque step impactant la charge de Fluor dans les rejets atmosphériques du site.

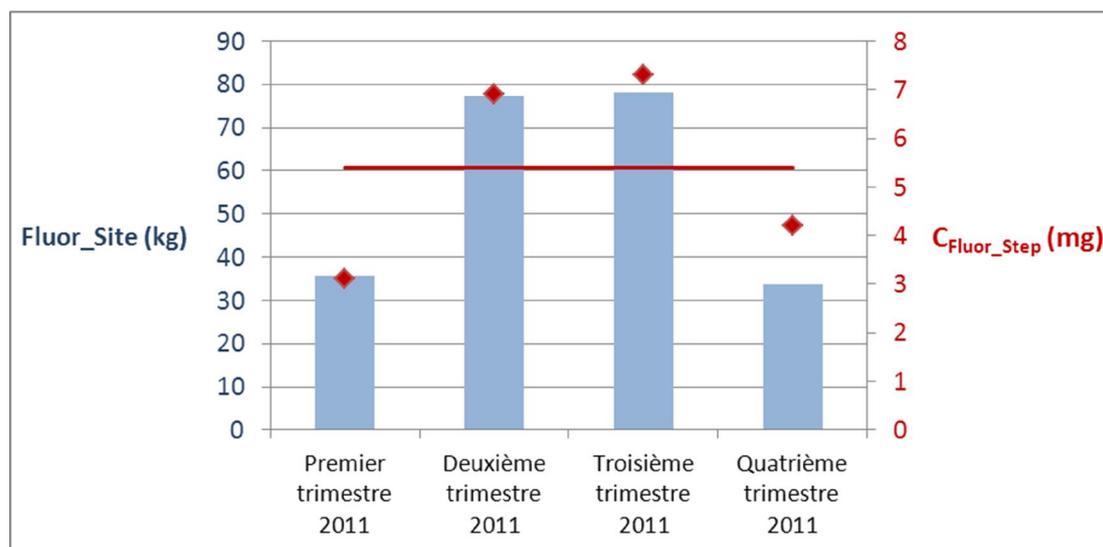


Figure A. 25 Contributions trimestrielles d'une étape de procédé à la charge de Fluor dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.

En moyenne sur l'année 2011, un step réalisé sur le site rejette donc 5,4 mg de Fluor dans le milieu naturel.

Les valeurs de $C_{\text{Fluor_Step}}$ varient de 3,1 à 7,3 mg.

Les écarts à la moyenne varient de 22 à 43 %, avec un écart moyen de 31 %.

Les écarts entre les différentes valeurs de $C_{\text{Fluor_Step}}$ sont relativement importants. Comme pour les autres paramètres de rejet atmosphérique, la précision des données ne permet pas une analyse fine des rejets du site.

Pour ce paramètre, nous n'avons tenu compte que de la charge de Fluor présente dans les rejets en sortie des laveurs Acide, alors qu'il y en a également en sortie des laveurs Ammoniac. Cependant, la majorité du Fluor rejeté dans le milieu naturel par le site passe par les EXA et les laveurs Acide.

Nous retiendrons donc la valeur suivante pour la contribution d'une étape de procédé à la charge en Fluor dans les rejets atmosphériques du site :

$$C_{\text{Fluor_Step,moyen}} = 5,4 \text{ mg} \quad (\text{A.7})$$

Limites de la méthode

Nous avons considéré que tous les steps réalisés dans les ateliers Métal, Etch, Dry Stripping et Wet ont un impact sur la charge de Fluor dans les rejets atmosphériques du site. Or certaines de ces étapes ne consomment pas de substances fluorées et ne contribuent *a priori* pas à ce paramètre.

De plus, comme pour l'identification des steps contribuant à la charge de Fluorures dans les rejets liquides de la station de traitement, nous avons décidé d'intégrer les étapes de procédé des ateliers Diel

dans les steps contributeurs à ce paramètre, alors que ce sont des étapes de Clean qui consomment des substances fluorées.

A.3.8 Charge de COV dans les rejets atmosphériques du site

Nous ne nous intéressons ici qu'aux COV émis en sortie de l'incinérateur de solvants, qui traite les effluents gazeux provenant des exhausts solvants (EXS). Ces effluents sont totalement liés aux salles blanches, et donc aux procédés. Les charges de COV seront donc uniquement liées au nombre de steps réalisés sur le site. En effet, des COV sont également émis en sortie des exhaust Chaleur (EXC), mais ils proviennent d'installations hors process et se trouvent dans l'air ambiant de la salle blanche.

Les étapes de procédé contribuant à la charge de COV en sortie d'incinérateur solvant sont réalisées dans les ateliers suivants :

Ateliers de production	Steps
CMP	Tous les steps
Photolithographie	Tous les steps

Tableau A. 25 Etapes de procédé des technologies du site rejetant des COV, par atelier de production.

Les équipements de CMP sont connectés à l'EXS pour les machines de dernière génération, le séchage dans le Cleaner dégageant des solvants. Nous considérons que tous les steps de CMP ont un impact sur la charge de COV dans les rejets atmosphériques du site, bien que quelques équipements de première génération utilisent encore un procédé différent pour le séchage des wafers.

Les steps réalisés dans l'atelier Photolithographie nécessitent quant à eux l'utilisation de solvants.

La figure A.26 présente le nombre d'étapes de procédé contribuant à la charge de COV dans les rejets atmosphériques du site.

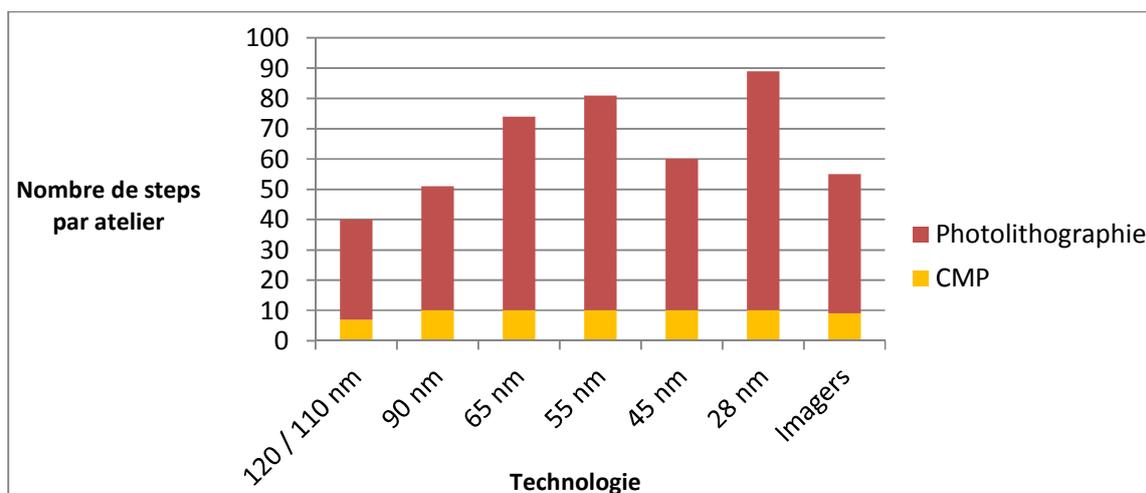


Figure A. 26 Nombre d'étapes de procédé des technologies du site ayant un impact sur la charge de COV dans les rejets atmosphériques.

La figure A.27 présente la contribution C_{COV_step} de chaque step impactant la charge de COV dans les rejets atmosphériques du site.

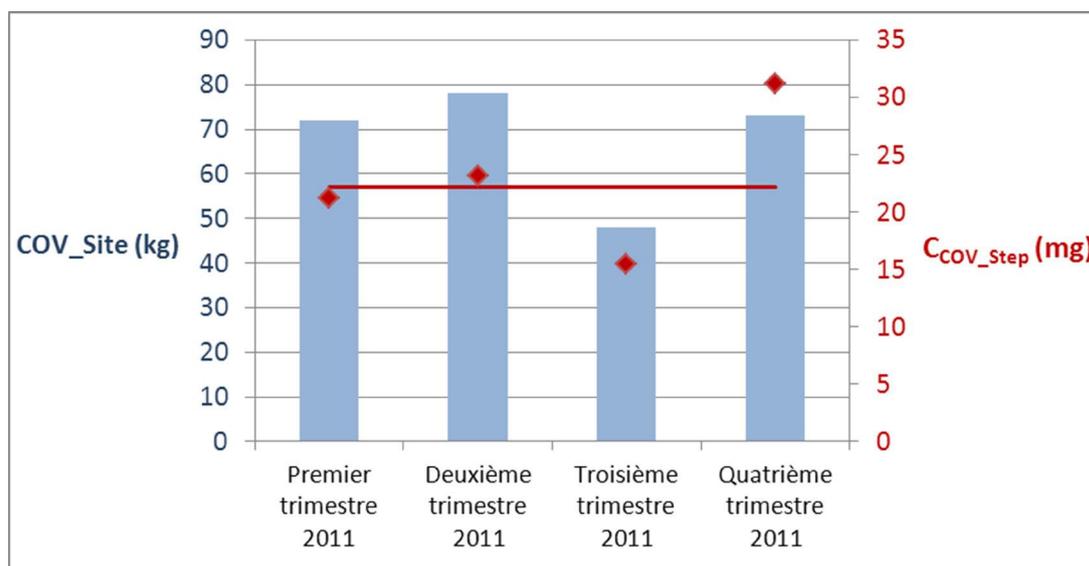


Figure A. 27 Contributions trimestrielles d'une étape de procédé à la charge de COV dans les rejets atmosphériques du site pour l'année 2011.

En moyenne sur l'année 2011, un step réalisé sur le site rejette donc 22,2 mg de COV dans le milieu naturel.

Les valeurs de C_{COV_step} varient de 15,5 à 31,2 mg.

Annexes

Les écarts à la moyenne varient de 4 à 40 %, avec un écart moyen de 20 %.

Comme pour les autres paramètres de rejets atmosphériques, les écarts entre les différentes valeurs de C_{COV_Step} peuvent s'expliquer par le fait que les données sont obtenues grâce à une mesure sur quelques heures chaque trimestre, ce qui n'est sans doute pas assez fin pour notre analyse.

Nous retiendrons donc la valeur suivante pour la contribution d'une étape de procédé à la charge de COV dans les rejets atmosphériques du site :

$$C_{COV_Step,moyen} = 22,2 \text{ mg} \quad (\text{A.8})$$

A.4 Indicateurs Environnement

A.4.1 Macro-indicateurs Environnement : consommation de réactifs de la station de traitement

A.4.1.1 Consommation d'Hydroxyde de Sodium (NaOH)

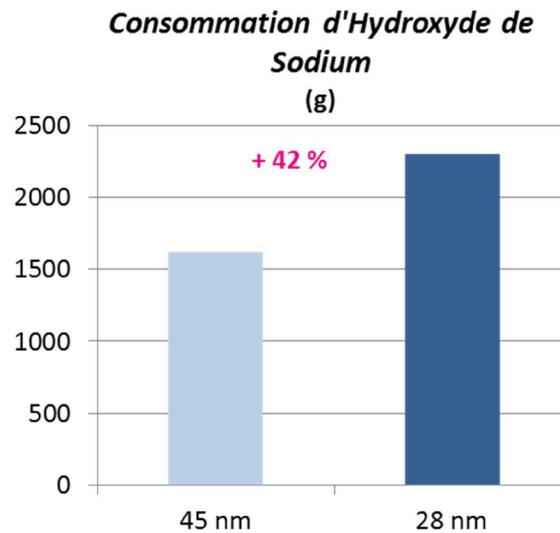


Figure A. 28 Indicateur Consommation d'Hydroxyde de Sodium pour les technologies 45 et 28 nm.

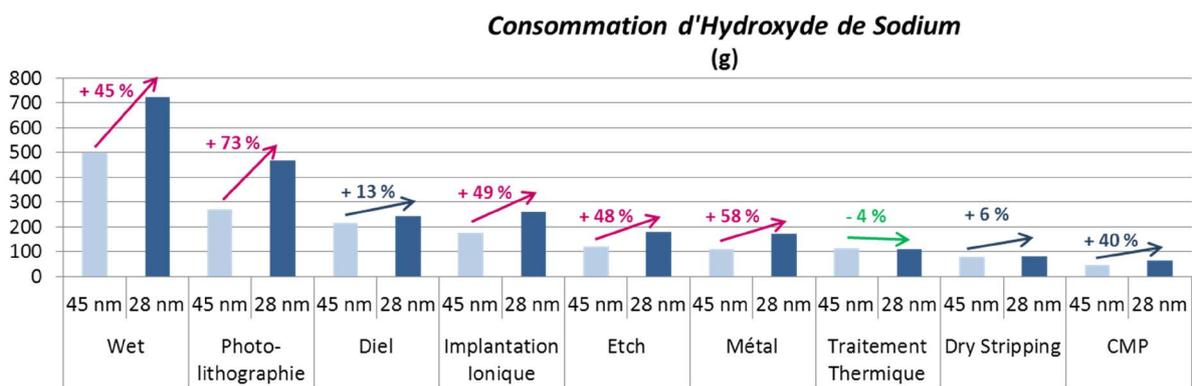


Figure A. 29 Indicateur Consommation d'Hydroxyde de Sodium par atelier pour les technologies 45 et 28 nm.

A.4.1.2 Consommation de Chlorure de Calcium (CaCl₂)

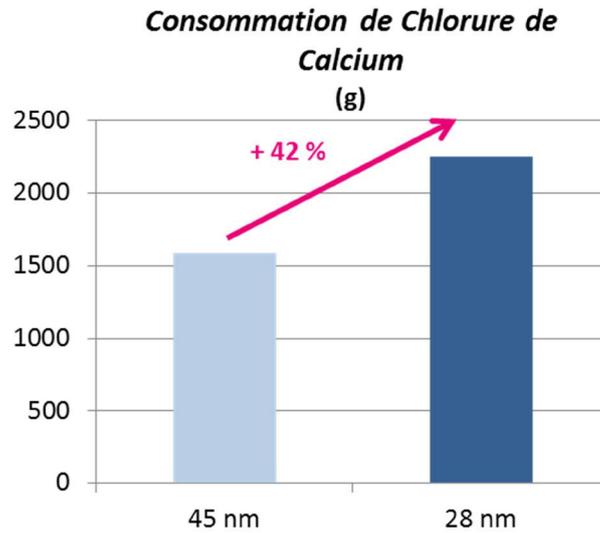


Figure A. 30 Indicateur Consommation de Chlorure de Calcium pour les technologies 45 et 28 nm.

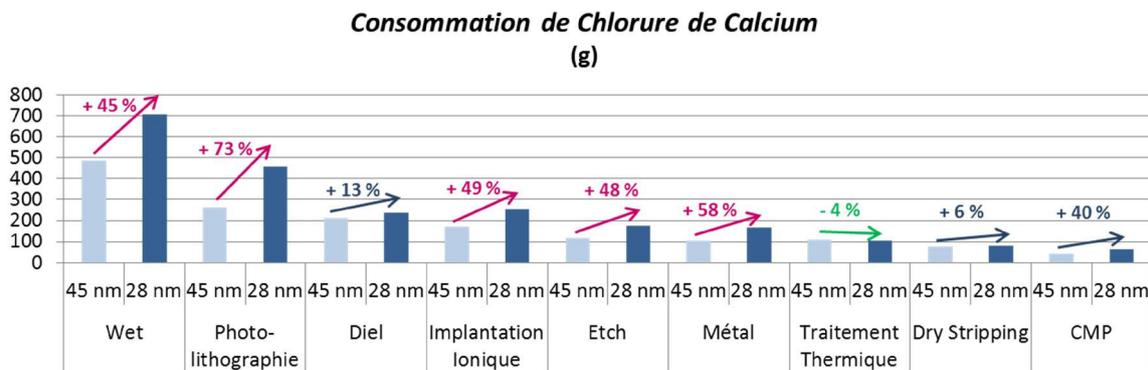


Figure A. 31 Indicateur Consommation de Chlorure de Calcium par atelier pour les technologies 45 et 28 nm.

A.4.1.3 Consommation de Chaux (Ca(OH)₂)

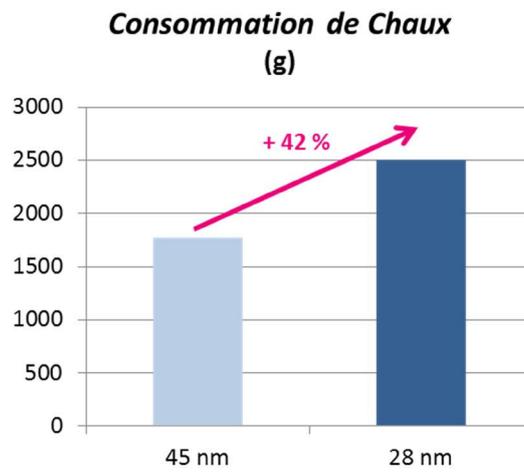


Figure A. 32 Indicateur Consommation de Chaux pour les technologies 45 et 28 nm.

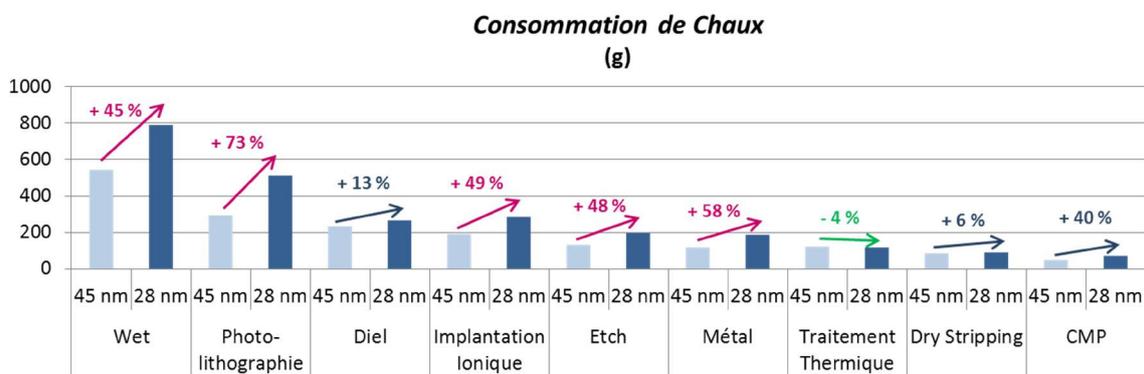


Figure A. 33 Indicateur Consommation de Chaux par atelier pour les technologies 45 et 28 nm.

A.4.2 Micro-indicateurs Environnement

A.4.2.1 Rejets liquides

- Rejet de Fluorure

Dans le chapitre 4, nous avons établi que chaque step contribuant à la charge de Fluorure dans les rejets aqueux du site est responsable du rejet de 0,19 gramme de Fluorure.

Pour les technologies 45 et 28 nm, l'indicateur *Rejet de Fluorure* a la forme suivante :

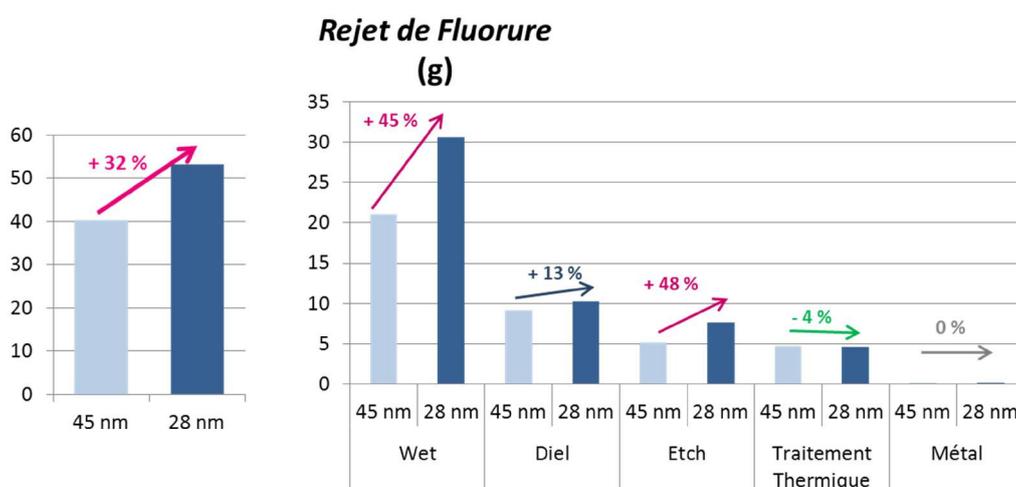


Figure A. 34 Indicateur Rejet de Fluorure, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.

La technologie 28 nm contribue plus que la technologie 45 nm à la charge de Fluorure dans les rejets liquides de la station de traitement (+ 32 %). Ceci est dû au fait que la technologie 28 nm compte plus d'étapes de procédé dans certains ateliers contribuant à ce paramètre : Etch (+ 48 %), Wet (+ 45 %) et Diel (+ 13 %). En revanche, l'atelier Traitement Thermique, dans lequel tous les steps contribuent à la charge de Fluorure, compte une étape de moins en 28 nm qu'en 45 nm. Pour cet atelier, la technologie 45 nm a donc légèrement plus de part à cet impact. Quant à l'atelier Métal, pour lequel seules les étapes de dépôt de Tungstène contribuent à la charge de Fluorure, l'indicateur *Rejet de Fluorure* n'a pas évolué entre les deux technologies étudiées (un step de dépôt de Tungstène dans chaque technologie).

- Rejet de Cuivre

La contribution de chaque step ayant un impact sur la charge de Cuivre dans les rejets liquides de la station de traitement est de 37,2 mg.

L'indicateur *Rejet de Cuivre* est présenté sur la figure ci-dessous pour les technologies 45 et 28 nm :

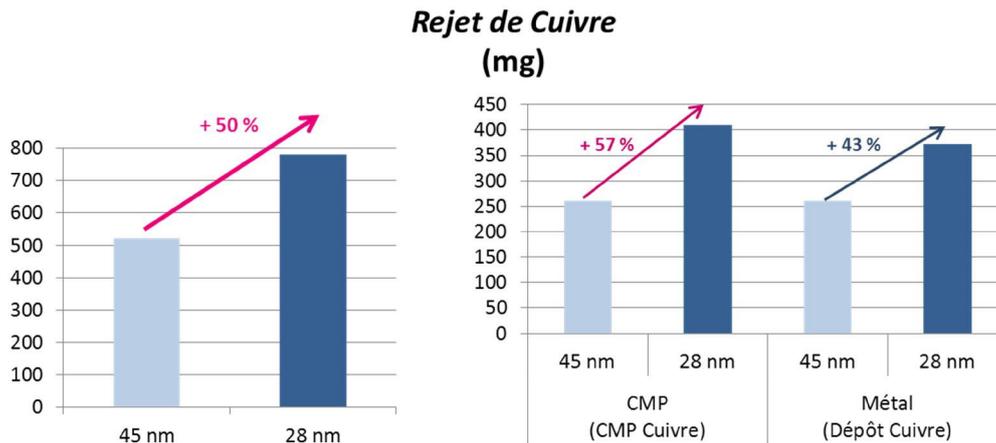


Figure A. 35 Indicateur Rejet de Cuivre, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.

Les étapes de procédé qui contribuent à l'indicateur *Rejet de Cuivre* sont celles de CMP Cuivre, et de dépôt de Cuivre dans l'atelier Métal. Leur nombre dépend du nombre de niveaux de Cuivre des technologies, qui est plus élevé dans la technologie 28 nm que dans la technologie 45 nm : l'indicateur *Rejet de Cuivre* a donc augmenté entre ces deux technologies.

A.4.2.2 Rejets atmosphériques

- Rejet de Chlorure d'Hydrogène

Les étapes de procédé contribuant aux rejets atmosphériques de Chlorure d'Hydrogène ont un impact de 6,3 mg sur ce paramètre.

La figure ci-dessous présente l'indicateur *Rejet de Chlorure d'Hydrogène* pour les produits majoritaires des technologies 45 et 28 nm :

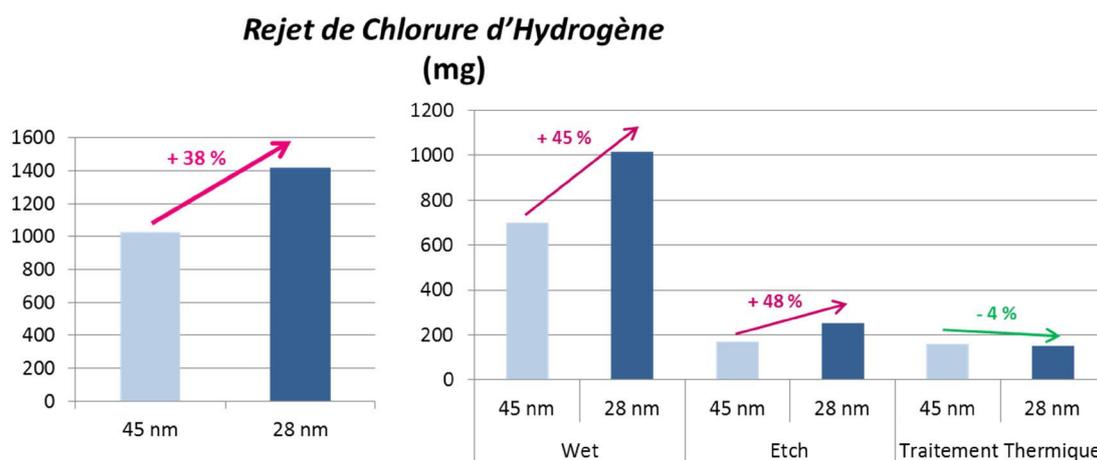


Figure A. 36 Indicateur Rejet de Chlorure d'Hydrogène, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.

La technologie 28 nm compte globalement davantage de steps ayant un impact sur les rejets atmosphériques de Chlorure d'Hydrogène que la technologie 45 nm, du fait de l'augmentation du nombre d'étapes dans les ateliers Wet et Etch entre ces deux technologies. L'indicateur *Rejet de Chlorure d'Hydrogène* a globalement augmenté de 38 % de la technologie 45 à la technologie 28 nm. Le nombre de steps a cependant diminué dans l'atelier Traitement Thermique en 28 nm (un step en moins).

- Rejet de Fluor

Les étapes de procédé contribuant aux rejets atmosphériques de Fluor ont un impact de 5,4 mg sur ce paramètre.

La figure ci-dessous présente l'indicateur *Rejet de Fluor* pour les produits majoritaires des technologies 45 et 28 nm :

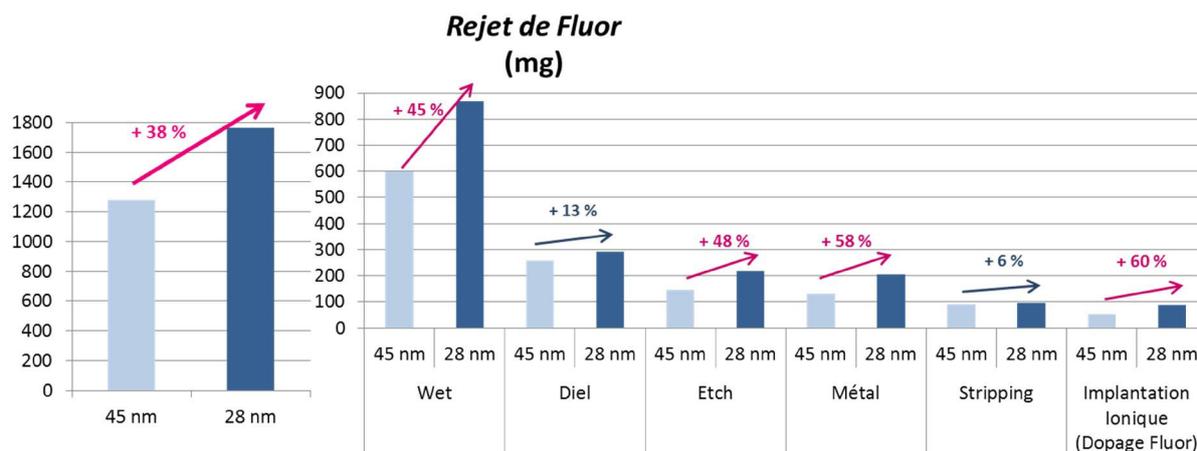


Figure A. 37 Indicateur Rejet de Fluor, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.

L'indicateur *Rejet de Fluor* a augmenté de 38 % entre les technologies 45 et 28 nm. Le nombre de steps identifiés comme contribuant aux rejets atmosphériques de Fluor a augmenté pour tous les ateliers concernés, mais dans différentes proportions : de 6 % en Stripping à 60 % en Implantation Ionique.

- Rejet de COV

Les étapes de procédé contribuant aux rejets atmosphériques de COV ont un impact de 22,2 mg sur ce paramètre.

La figure ci-dessous présente l'indicateur *Rejet de COV* pour les produits majoritaires des technologies 45 et 28 nm :

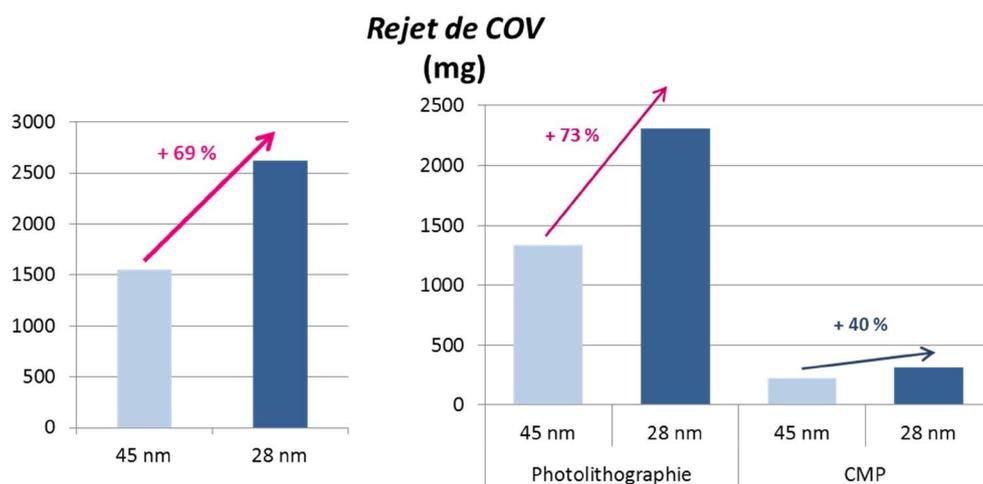


Figure A. 38 Indicateur Rejet de COV, global et par atelier, pour les technologies 45 et 28 nm.

L'indicateur *Rejet de COV* a augmenté de 69 % entre les technologies 45 et 28 nm. Le nombre de steps contributeurs a en effet beaucoup augmenté entre ces deux technologies pour les deux ateliers concernés : + 73 % en Photolithographie et +40 % pour l'atelier CMP.