

CHAPITRE 6

ÉMISSIONS DE L'INDUSTRIE ÉLECTRONIQUE

Auteurs

Scott Bartos (États-Unis)

Laurie S. Beu (États-Unis), C. Shepherd Burton (États-Unis), Charles L. Fraust (États-Unis), Francesca Illuzzi (Italie), Michael T. Mocella (États-Unis) et Sébastien Raoux (France/États-Unis)

Contributeurs

Guido Agostinelli (Italie), Erik Alsema (Pays-Bas), Seung-Ki Chae (République de Corée), Vasilis M. Fthenakis (États-Unis), Joseph Van Gompel (États-Unis), Hideki Nishida (Japon), Takayuki Oogoshi (Japon) et Kurt T. Werner (États-Unis)

Table des matières

6	Émissions de l'industrie Électronique	5
6.1	Introduction	5
6.2	Questions méthodologiques.....	5
6.2.1	Choix de la méthode.....	5
6.2.1.1	Gravure et nettoyage CVD pour semi-conducteurs, afficheurs à cristaux liquides et photovoltaïques.....	5
6.2.1.2	Fluides de transfert de chaleur	14
6.2.2	Choix des facteurs d'émission ¹²	16
6.2.2.1	Gravure et nettoyage CVD pour semi-conducteurs, afficheurs à cristaux liquides et photovoltaïques.....	16
6.2.2.2	Fluides de transfert de chaleur	24
6.2.3	Choix des données sur les activités.....	24
6.2.4	Exhaustivité	27
6.2.5	Développement d'une série temporelle cohérente	28
6.3	Évaluation des incertitudes	28
6.3.1	Incertitudes des facteurs d'émission	29
6.3.2	Incertitudes des données sur l'activité	29
6.4	Assurance qualité / contrôle qualité, établissement de rapports et documentation	32
6.4.1	Assurance qualité / contrôle qualité (AQ/CQ).....	32
6.4.2	Établissement de rapports et documentation.....	32

Équations

Équation 6.1	Méthode De Niveau 1 Pour L'estimation De L'ensemble Des Émissions De FC	9
Équation 6.2	Méthodologie De Niveau 2a Pour L'estimation Des Émissions De FC	10
Équation 6.3	Émissions De Produits Dérivés De CF ₄	10
Équation 6.4	Émissions De Produits Dérivés De C ₂ F ₆	10
Équation 6.5	Émissions De Produits Dérivés De CHF ₃	11
Équation 6.6	Émissions De Produits Dérivés De C ₃ F ₈	11
Équation 6.7	Méthodologie De Niveau 2b Pour L'estimation Des Émissions De FC	12
Équation 6.8	Émissions De Produits Dérivés De CF ₄	12
Équation 6.9	Émissions De Produits Dérivés De C ₂ F ₆	12
Équation 6.10	Émissions De Produits Dérivés De CHF ₃	13
Équation 6.11	Émissions De Produits Dérivés De C ₃ F ₈	13

Équation 6.12 Méthodologie De Niveau 1 Pour L'estimation Des Émissions Totales De FC Issues Des Fluides De Transfert De Chaleur	14
Équation 6.13 Méthodologie De Niveau 2 Pour L'estimation Des Émissions De FC Issues Des Fluides De Transfert De Chaleur	15

Figures

Figure 6.1 Diagramme décisionnel pour l'estimation d'émissions de FC issues de la fabrication d'appareils électroniques.....	8
Figure 6.2 Diagramme décisionnel pour l'estimation des émissions de FC issues des pertes de fluides de transfert de chaleur pendant la fabrication d'appareils électroniques.....	16

Tableaux

Tableau 6.1 Sources d'informations nécessaires pour compléter les méthodes d'estimation des émissions pour la fabrication d'appareils électroniques	7
Tableau 6.2 Facteurs d'émission de gaz spécifique de niveau 1 pour les émissions de FC issues de la fabrication d'appareils électroniques.....	17
Tableau 6.3 Facteurs d'émission par défaut de niveau 2 pour les émissions de FC issues de la fabrication de semi-conducteurs	19
Tableau 6.4 Facteurs d'émission par défaut de niveau 2 pour les émissions de FC issues de la fabrication de LCD.....	20
Tableau 6.5 Facteurs d'émission par défaut de niveau 2 pour les émissions de FC issues de la fabrication de pv.....	21
Tableau 6.6 Paramètres de rendements par défaut de niveau 2a et 2b pour les technologies de réduction des émissions de FC de l'industrie électronique ^{a,b,c}	22
Tableau 6.7 Capacités totales d'élaboration de silicium (Si) et de verre (Mm ³) selon les pays en 2003, 2004 et 2005.....	26
Tableau 6.8 Capacité totale de production de PV par pays en 2003, Mm ²	27
Tableau 6.9 Estimations par défaut des erreurs relatives (%) du facteur d'émission de niveau 2 pour les émissions de FC issues de la fabrication de semi-conducteurs, intervalles de confiance de 95 %.....	30
Tableau 6.10 Estimations par défaut des erreurs relatives (%) du facteur d'émission de niveau 2 pour les émissions de FC issues de la fabrication de LCD, intervalles de confiance de 95 %.....	31
Tableau 6.1 Informations nécessaires pour une pleine transparence des estimations des émissions issues de la fabrication d'électroniques	33

Encadré

Encadré 6.1 Exemple pour la production de semi-conducteurs	14
--	----

6 ÉMISSIONS DE L'INDUSTRIE ÉLECTRONIQUE

6.1 INTRODUCTION

Plusieurs procédés de fabrication d'appareils électroniques avancés utilisent des composés fluorés (FC) pour des modèles complexes de gravure par plasma, le nettoyage du réacteur des chambres et le contrôle de la température. Les secteurs spécifiques de l'industrie électronique traités dans ce chapitre incluent les semi-conducteurs, les écrans plats TCM (matrice active) (TCM-FPD) et la fabrication de photovoltaïques (PV) (collectivement désignée comme « l'industrie électronique »).¹

Actuellement, à température ambiante, l'industrie électronique émet aussi bien des FC gazeux que des FC liquides. Les gaz incluent le CF_4 , le C_2F_6 , le C_3F_8 , le $c-C_4F_8$, le $c-C_4F_8O$, le C_4F_6 , le C_5F_8 , le CHF_3 , le CH_2F_2 , le trifluorure d'azote (NF_3), l'hexafluorure de soufre (SF_6) et sont utilisés lors de deux étapes importantes de la fabrication d'appareils électroniques : (i) la gravure par plasma de matériaux à base de silicium et (ii) le nettoyage de dépôts chimiques en phase vapeur (CVD) des parois de la chambre où du silicium s'est déposé.² La majorité des émissions de FC résulte des rendements d'utilisation aux limites (par ex., consommation) des précurseurs de FC pendant le processus de gravure ou de nettoyage. De plus, une fraction des composés fluorés utilisés durant le processus de production peut être convertie en produits dérivés CF_4 et dans certains cas en C_2F_6 , CHF_3 et C_3F_8 .³ Une formation de CF_4 comme produit dérivé de gravure ou de nettoyage de matériaux (ou carbure) à faible constante diélectrique contenant du carbone (k faible) doit également être prise en compte.¹ De plus, l'utilisation de F_2 , de COF_2 , et de ClF_3 doit être augmentée. Ces gaz, même s'ils ne contribuent pas eux-mêmes au réchauffement planétaire, peuvent conduire, dans certains cas, à la formation de CF_4 .

Les fabricants d'appareils électroniques utilisent du FC pour contrôler la température pendant certains procédés. Également utilisés comme fluides de transfert de chaleur, ces FC sont liquides à température ambiante et ont des tensions de vapeur pressions élevées. Les pertes liées à l'évaporation contribuent à la quantité totale d'émissions de FC. Ces pertes d'évaporation se produisent pendant le refroidissement de certains équipements de procédés, pendant le test de dispositifs complets semi-conducteurs et pendant la soudure à refusion en phase vapeur des composants électroniques aux cartes de circuits imprimés. Des pertes d'évaporation ne semblent pas se manifester lorsque du FC liquide est utilisé pour refroidir les composants électroniques ou les systèmes pendant l'opération. Dans cette application, le FC liquide est contenu dans des systèmes clos pendant le temps de vie du produit ou du système.

Plus de 20 FC liquides sont destinés au marché, souvent sous forme de mélanges de composés fluorés, pour le secteur électronique.⁵ Puisque les équivalents en CO_2 de chaque liquide diffèrent, chacun doit être tracé et rapporté séparément.^{6,7} De plus, des FC liquides sont utilisés occasionnellement pour nettoyer les écrans TCM-FPD pendant leurs fabrications.

6.2 QUESTIONS MÉTHODOLOGIQUES

6.2.1 Choix de la méthode

6.2.1.1 GRAVURE ET NETTOYAGE CVD POUR SEMI-CONDUCTEURS, AFFICHEURS À CRISTAUX LIQUIDES ET PHOTOVOLTAÏQUES

Les émissions varient selon les gaz utilisés pendant la fabrication des différents types de dispositifs électroniques, le processus utilisé (ou plus grossièrement, le type de procédé (par ex., CVD ou gravure), la marque des outils de procédés utilisés et la mise en œuvre de technologies de réduction des émissions.

¹ Des matériaux à faible constante diélectrique (k) ont été tout d'abord utilisés comme isolants pour la structure d'interconnexion des puces semi-conductrices à $0,25\mu m$ nœud et en dessous. Beaucoup de matériaux à faible k contiennent du carbone qui peut être enlevé sous forme de CF_4 pendant la gravure basée sur films fins ou le nettoyage des réacteurs DVP utilisés pour le dépôt du faible k. Du CF_4 peut également être formé pendant le nettoyage des réacteurs DVP utilisés pour le dépôt de carbure.

Le choix des méthodes dépendra de la disponibilité des données et est référencé dans le diagramme décisionnel (voir Figure 6.1, « Diagramme décisionnel pour l'estimation des émissions de FC issues de la fabrication d'appareils électroniques »). Les émissions issues de FC liquides sont estimées par les approches de niveaux 1, 2 et 3 et sont décrites séparément dans cette section.⁸

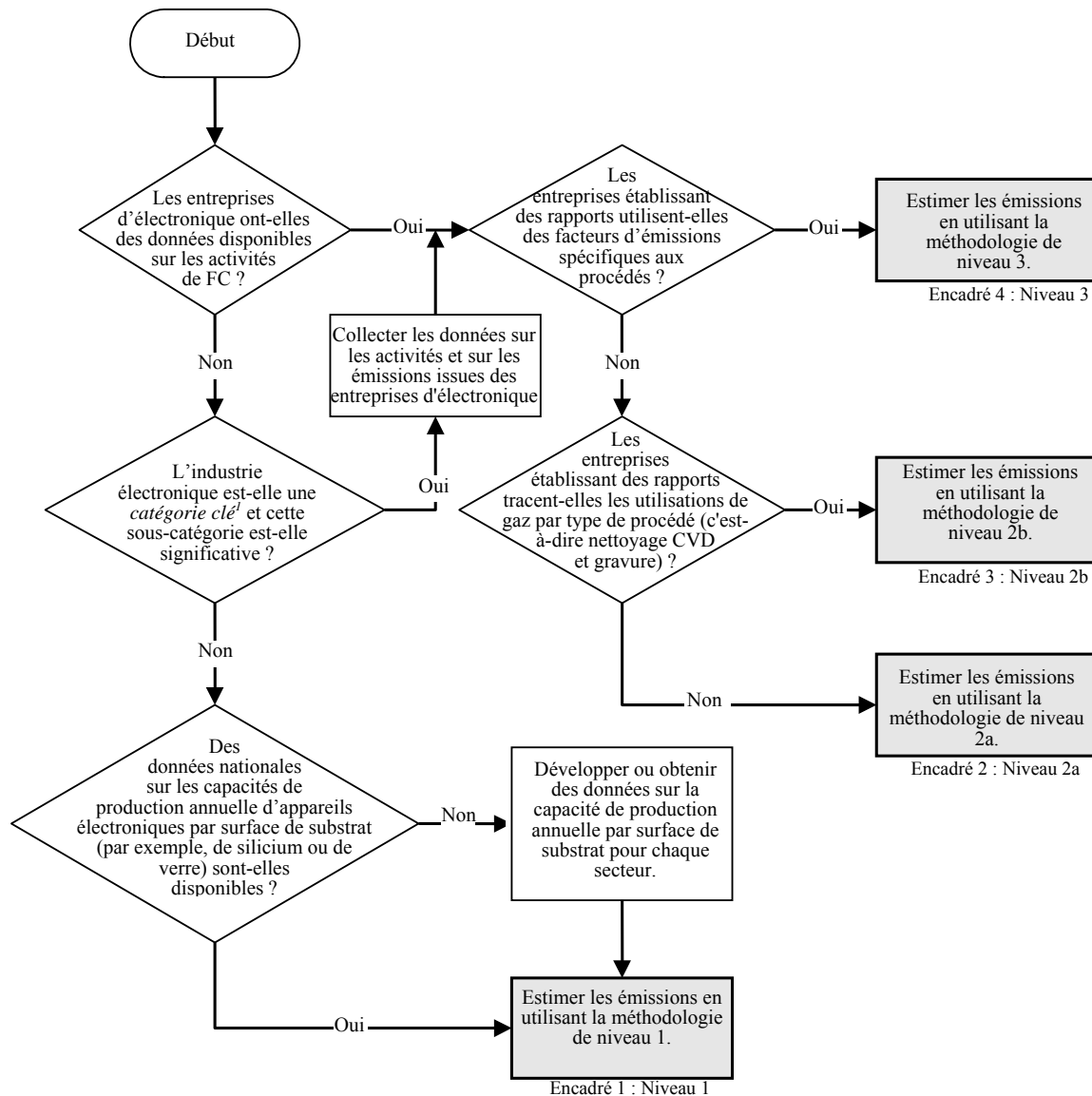
Surveiller les émissions de façon continue (*in situ*) pour estimer celles qui sont issues de cette industrie est actuellement considéré comme une technique non viable, tant sur le plan technique qu'économique. Les émissions de FC sont périodiquement mesurées lors du développement de nouveaux procédés et d'outils, et après l'établissement de conditions de procédés commercialement au point (également connues sous le nom de conditions de procédés centraux).⁹ L'industrie cherche, avant l'introduction d'une fabrication à grande échelle, des conceptions de procédés centrés qui minimisent les émissions de FC. Nous pouvons cependant noter que les émissions de FC peuvent être affectées par des changements sur des variables du procédé (par ex., la pression, la température, la puissance du plasma, le flux gazeux des FC ou la durée du traitement). Ainsi, l'exactitude des méthodes utilisées pour estimer les émissions sera affectée par d'éventuelles différences entre le procédé utilisé dans la production et le procédé central de référence. De plus, l'efficacité de l'équipement de contrôle des émissions de FC dépend de son utilisation, de sa maintenance et des spécifications du fabricant. Des flux gazeux en augmentation, des réglages de températures inappropriées et l'échec dans l'exécution de la maintenance requise auront un impact individuel et collectif négatif sur la performance.

L'exactitude des émissions estimées dépend de la méthode utilisée. La méthode de niveau 1 utilise des valeurs par défaut pour tous les paramètres et ne rend pas compte de l'utilisation d'appareils technologiques pour le contrôle des émissions. La méthodologie de niveau 2 utilise des données spécifiques à l'entreprise pour la proportion de gaz utilisée dans les procédés avec et sans technologie de contrôle des émissions, mais ne distingue pas entre la gravure du nettoyage et utilise des valeurs par défaut pour les autres paramètres. La méthode la plus rigoureuse, celle de niveau 3, requière un ensemble complet de valeurs spécifiques à chaque procédé et non pas des valeurs par défaut.

Le tableau 6.1 résume les données nécessaires pour utiliser les méthodes d'estimation des émissions dans la fabrication d'appareils électroniques.

TABLEAU 6.1 SOURCES D'INFORMATIONS NÉCESSAIRES POUR COMPLÉTER LES MÉTHODES D'ESTIMATION DES ÉMISSIONS POUR LA FABRICATION D'APPAREILS ÉLECTRONIQUES					
	Données	Niveau 1	Niveau 2a	Niveau 2.b	Niveau 3
Outil de gaz de transformation entrant	$FC_{i,p}$ = kg de gaz i introduit dans des procédés spécifiques p ou ensemble d'outils de procédés communs				M
	$FC_{i,p}$ = kg de gaz i introduit dans une catégorie de procédé large (par exemple, la gravure ou le nettoyage de chambre CVD)		M	M (gravure) & M(CVD)	
	H = fraction de gaz restant dans l'unité de transport après usage (résidu)		D	D	M
Réactions et destruction du gaz de transformation dans l'outil	$U_{i,p}$ = taux d'utilisation (fraction détruite ou transformée) pour chaque gaz i et procédé p		D	M (gravure) & M(CVD)	M
	$B_{CF_4,i,p}$, $B_{C_2F_6,i,p}$, $B_{CHF_3,i,p}$ et $B_{C_3F_8,i,p}$ = Facteur d'émission pour les émissions produits dérivés de CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 et C_3F_8 respectivement pour le gaz i pour chaque procédé		D	M (gravure) & M(CVD)	M
Contrôle des émissions de FC en aval	$a_{i,p}$ = Fraction du volume de gaz i introduit dans les procédés avec des technologies de contrôle d'émissions de FC certifiées		M	M	M
	$d_{i,p}$ = Fraction de gaz i détruit par la technologie de contrôle des émissions		D	D ^a	M
	$B_{CF_4,i,p}$, $B_{C_2F_6,i,p}$, $B_{CHF_3,i,p}$ et $B_{C_3F_8,i,p}$ = Fraction de CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 et de produits dérivés C_3F_8 respectivement détruits par la technologie de contrôle des émissions				
Capacité de production annuelle	C_d = <u>Capacité de conception</u> de la fabrication annuelle sur la surface du substrat traité (par ex., silicium et verre)	M			
	C_u = Fraction de la <u>capacité d'utilisation</u> annuelle	D/M			
<p>M= mesurer ou acquérir ces valeurs. D = utiliser les facteurs par défaut issus des lignes directrices. ^a Lorsqu'elles sont disponibles et tolérables, les valeurs M peuvent être substituées par les valeurs D pour les niveaux 2 et 2b. Voir les conditions dans le Tableau 6.6. ^b Il n'y a pas de valeurs par défaut pour les niveaux 2a et 2b car l'effet des produits dérivés a été incorporé aux valeurs D pour le gaz i.</p>					

Figure 6.1 Diagramme décisionnel pour l'estimation d'émissions de FC issues de la fabrication d'appareils électroniques



Note :

1. Voir Volume 1, Chapitre 4, Choix méthodologique et identification des catégories-clé (observant la Section 4.1.2 aux ressources limitées) pour le débat sur les catégories sources et l'usage des diagrammes décisionnels.

MÉTHODE DE NIVEAU 1

La méthode de niveau 1 est la méthodologie d'estimation la moins exacte et doit être utilisée uniquement lorsque les données spécifiques aux entreprises ne sont pas disponibles. La méthode de niveau 1, à l'inverse de celles de niveaux 2 et 3, est conçue pour donner une estimation agrégée des émissions de FC même si sa méthodologie semble produire l'émission d'un gaz spécifique. Les estimations sont faites simultanément pour tous les gaz, comme souligné dans le Tableau 6.2, et peuvent être utilisées seulement si rapportées sous forme d'ensemble complet.

Le calcul des émissions est basé sur un ensemble fixe de facteurs d'émissions génériques. Les membres de cet ensemble diffèrent selon le secteur (ou la classe) de produits électroniques pour lequel ils ont été fabriqués (semi-conducteurs, TCM-FPD ou cellules photovoltaïques). Chaque membre de cet ensemble, qui est un facteur d'émission d'un gaz spécifique, exprime les émissions moyennes par unité de surface de substrat (par ex., pour le silicium, le panneau TCM-FPD ou la cellule PV) consommée pendant la fabrication. Pour chaque classe de

produits électroniques, les facteurs (membres de l'ensemble) sont multipliés par la capacité d'utilisation annuelle (fraction C_u) et la capacité de conception annuelle de fabrication (C_d , en unités d'un milliard de mètres carrés (Gm^2)) des procédés de substrat. Le produit ($C_u \cdot C_d$) est une estimation de la quantité de substrats consommée pendant la production d'appareils électroniques. Le résultat est un ensemble d'émissions annuelles exprimées en kg des gaz qui font partie de l'ensemble, pour chaque classe de produits électroniques. Parce que l'utilisation des FC varie fortement pendant la fabrication de PV, un troisième facteur justifiant la proportion de la fabrication de PV qui emploie des FC est nécessaire pour estimer les émissions de FC issues de la production de cellules PV. La formule de niveau 1 est illustrée dans l'Equation 6.1.

ÉQUATION 6.1
MÉTHODE DE NIVEAU 1 POUR L'ESTIMATION DE L'ENSEMBLE DES ÉMISSIONS DE FC

$$\{FC_i\}_n = \{FE_i \cdot C_u \cdot C_d \cdot [C_{PV} \cdot \delta + (1 - \delta)]\}_n \quad (i = 1, \dots, n)$$

Où :

$\{FC_i\}_n$ = émissions de gaz FC i , masse de gaz i

Note : $\{ \}_n$ indique l'ensemble pour chaque classe de produits (semi-conducteurs, TCM-FPD ou cellules PV) et n indique le nombre de gaz inclus dans chaque ensemble (six pour les semi-conducteurs, trois pour la production de TCM-FPD et deux pour les cellules PV. Voir Tableau 6.2). Les estimations sont valides si faites et rapportées pour tous les membres de l'ensemble utilisant la méthodologie de niveau 1.

FE_i = facteur d'émissions de FC pour un gaz i exprimé en masse annuelle d'émissions par mètre carré de surface de substrat pour la classe de produit, (masse de gaz i)/ m^2

C_u = fraction de l'utilisation de la capacité de production annuelle de l'usine, fraction

C_d = capacité de conception de la production annuelle, Gm^2 de substrat traité, à l'exception de la fabrication de PV qui est en Mm^2

C_{PV} = fraction de la fabrication de PV qui utilise des FC, fraction

δ = 1 lorsque l'équation 6.1 est appliquée à l'industrie PV et zéro lorsque l'équation 6.1 est appliquée aux industries de semi-conducteurs ou à celles de TCM-FPD, non dimensionnel

Cette méthode n'explique pas les différences entre les types de procédés (gravure versus nettoyage), les procédés individuels ou les outils. Elle ne prend pas non plus en compte l'utilisation possible de dispositifs de contrôle des émissions atmosphériques.

En utilisant la méthode de niveau 1, les compilateurs d'inventaires ne doivent modifier d'aucune façon l'ensemble des FC présentés dans le tableau 6.2. Les compilateurs d'inventaires ne doivent pas combiner les émissions estimées en utilisant la méthodologie de niveau 1 avec les émissions estimées en utilisant les méthodologies de niveau 2 ou 3. Les compilateurs d'inventaires ne doivent pas non plus utiliser, par exemple, le facteur de niveau 1 pour le CF_4 afin d'estimer les émissions de CF_4 issues de semi-conducteurs et les combiner avec les résultats d'autres gaz FC issus de la méthodologie de niveau 2 ou 3. (Voir également la Section 6.2.2.1.)

MÉTHODE DE NIVEAU 2a – PROCÉDÉ AVEC PARAMÈTRES SPÉCIFIQUES A UN GAZ

Cette méthode calcule les émissions pour chaque FC utilisé sur la base de données spécifiques aux entreprises sur la consommation de gaz et sur les technologies de contrôle des émissions. Elle utilise des valeurs par défaut de l'industrie au sens large pour le « résidu » ou la fraction du gaz acheté restant dans l'unité de transport après usage (h), la fraction du gaz « utilisé » (détruit ou transformé) pendant le procédé de fabrication des semi-conducteurs ou TCM-FPD, et la fraction du gaz converti en CF_4 ou C_2F_6 pendant le procédé. Pour utiliser la méthodologie de niveau 2.a, les compilateurs d'inventaires doivent avoir une communication directe avec l'industrie (par ex., le rapport des émissions annuelles) afin de rassembler les données et de s'assurer que des technologies de contrôle des émissions sont installées et fonctionnent.

Le total des émissions correspond à la somme des émissions issues du gaz FC $_i$ utilisé dans le procédé de production ajoutée à celle des émissions de produits dérivés de CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 et C_3F_8 résultant de l'utilisation du gaz FC $_i$, comme illustré dans les équations 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 et 6.6. Contrairement aux méthodologies de niveaux 3 et 2b qui seront expliqués plus tard dans cette section, la méthodologie de niveau 2.1 ne distingue pas les procédés ou les types de procédés (gravure versus nettoyage), les procédés individuels et les outils. Les facteurs d'émission par défaut représentent des moyennes pondérées (basées sur des jugements experts en pondération), formées séparément pour chaque gaz, sur *tous* les procédés de gravure *et* de CVD.

Comme il a été précédemment remarqué dans la section sur les facteurs d'émissions, la méthodologie de niveau 2a utilise le facteur d'émission pour le type de procédé (CVD ou gravure) dans lequel le FC individuel est utilisé le plus fréquemment dans le secteur de l'électronique. Cette méthode reflète la tendance actuelle d'utiliser les FC individuels principalement dans des types de procédés particuliers (CVD ou gravure) de chaque industrie. Cependant, dans les pays où les entreprises ou usines ont des modalités d'usage très différentes de celles de l'industrie au sens large (par ex., les pays qui utilisent le gaz essentiellement pour la gravure alors que l'industrie au sens large l'utilise essentiellement pour le CVD), les compilateurs d'inventaires doivent évaluer la possibilité d'introduction d'une erreur en utilisant la méthodologie de niveau 2a plutôt que la méthodologie de niveau 2b.

ÉQUATION 6.2
MÉTHODOLOGIE DE NIVEAU 2a POUR L'ESTIMATION DES ÉMISSIONS DE FC

$$E_i = (1 - h) \cdot FC_i \cdot (1 - U_i) \cdot (1 - a_i \cdot d_i)$$

Où :

E_i = émissions de gaz i , kg

FC_i = consommation de gaz i (par exemple CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , $c-C_4F_8$, $c-C_4F_8O$, C_4F_6 , C_5F_8 , CHF_3 , CH_2F_2 , NF_3 ou SF_6), kg

h = fraction de gaz restant dans l'unité de transport après usage (résidu), fraction

U_i = taux d'utilisation du gaz i (fraction transformée ou détruite dans le procédé), fraction

$a_{i,p}$ = fraction du volume de gaz i utilisé dans les procédés avec des technologies de contrôle des émissions (spécifiques aux entreprises ou aux usines), fraction

d_i = fraction de gaz i détruit par la technologie de contrôle des émissions, fraction

ÉQUATION 6.3
ÉMISSIONS DE PRODUITS DÉRIVÉS DE CF_4

$$BPE_{CF_4,i} = (1 - h) \cdot B_{CF_4,i} \cdot FC_i \cdot (1 - a_i \cdot d_{CF_4})$$

Où :

$BPE_{CF_4,i}$ = émissions de produits dérivés de CF_4 issues du gaz utilisé i , kg

$B_{CF_4,i}$ = facteur d'émission, kg CF_4 créé/kg de gaz i utilisé

d_{CF_4} = fraction de produit dérivé de CF_4 détruit par la technologie de contrôle des émissions, fraction

ÉQUATION 6.4
ÉMISSIONS DE PRODUITS DÉRIVÉS DE C_2F_6

$$BPE_{C_2F_6,i} = (1 - h) \cdot B_{C_2F_6,i} \cdot FC_i \cdot (1 - a_i \cdot d_{C_2F_6})$$

Où :

$BPE_{C_2F_6,i}$ = émissions de produits dérivés de C_2F_6 issues du gaz utilisé i , kg

$B_{C_2F_6,i}$ = facteur d'émission, kg C_2F_6 créé/kg gaz i utilisé

$d_{C_2F_6}$ = fraction de produit dérivé de C_2F_6 détruit par la technologie de contrôle des émissions, fraction

ÉQUATION 6.5**ÉMISSIONS DE PRODUITS DÉRIVÉS DE CHF₃**

$$BPE_{CHF_3,i} = (1-h) \cdot B_{CHF_3,i} \cdot FC_i \cdot (1-a_i \cdot d_{CHF_3})$$

Où :

$BPE_{CHF_3,i}$ = émissions de produits dérivés de CHF₃ issues du gaz utilisé i , kg

$B_{C_2F_6,i}$ = facteur d'émission, kg C₂F₆ créé/kg gaz i utilisé

d_{CHF_3} = fraction de produit dérivé de CHF₃ détruit par la technologie de contrôle des émissions, fraction

ÉQUATION 6.6**ÉMISSIONS DE PRODUITS DÉRIVÉS DE C₃F₈**

$$BPE_{C_3F_8,i} = (1-h) \cdot B_{C_3F_8,i} \cdot FC_i \cdot (1-a_i \cdot d_{C_3F_8})$$

Où :

$BPE_{C_3F_8,i}$ = émissions de produits dérivés de C₃F₈ issues du gaz utilisé i , kg

$B_{C_3F_8,i}$ = facteur d'émission, kg C₃F₈ créé/kg gaz i utilisé

$d_{C_3F_8}$ = fraction de produit dérivé de C₃F₈ détruit par la technologie de contrôle des émissions, fraction

Après avoir estimé les émissions de gaz i (E_i) et les émissions de produits dérivés de CF₄, C₂F₆, CHF₃ et de C₃F₈ pour chaque gaz ($BPE_{CF_4,i}$, $BPE_{C_2F_6,i}$, $BPE_{CHF_3,i}$ et $BPE_{C_3F_8,i}$), les compilateurs d'inventaires ou les entreprises doivent ajouter les émissions de tous les gaz pour estimer le total des émissions agrégées de FC.

MÉTHODOLOGIE DE NIVEAU 2b – PARAMÈTRES SPÉCIFIQUES À CHAQUE TYPE DE PROCÉDÉ

La méthodologie de niveau 2b requière des données sur les quantités agrégées de chaque gaz introduit dans les procédés de gravure et les procédés de nettoyage ($FC_{i,p}$). Ainsi, elle distingue les types de procédés au sens large (gravure versus nettoyage de chambre CVD) mais pas les procédés individuels possibles ou les petits ensembles de procédés. Les valeurs par défaut de l'industrie au sens large peuvent être utilisées pour chacun des éléments suivants :

- la fraction de gaz restant dans l'unité de transport après usage, appelée le « résidu » (h) ;
- la fraction de gaz « utilisé » (détruit ou transformé) par type de procédé ($U_{i,p}$) ;
- le facteur d'émission pour les émissions de produits dérivés de CF₄ dans le type de procédé ($B_{CF_4,i,p}$) ;
- le facteur d'émission pour les émissions de produits dérivés de C₂F₆ dans le type de procédé ($B_{C_2F_6,i,p}$) ;
- le facteur d'émission pour les émissions de produits dérivés de CHF₃ dans le type de procédé ($B_{CHF_3,i,p}$) ; et
- le facteur d'émission pour les émissions de produits dérivés de C₃F₈ dans le type de procédé ($B_{C_3F_8,i,p}$) ;

Des valeurs par défaut sont également présentées (voir Tableau 6.6) par type de procédé ($d_{i,p}$, $d_{CF_4,p}$, $d_{C_2F_6,p}$, $d_{CHF_3,p}$ and $d_{C_3F_8,p}$) pour la fraction de gaz détruit par la technologie de contrôle des émissions. A moins que des technologies de contrôle des émissions ne(?) soient installées, la valeur par défaut pour $a_{i,p}$, -la fraction du volume de gaz introduit dans les procédés avec technologies de contrôle des émissions-, est de zéro. Les valeurs par défaut pour $U_{i,p}$, $B_{CF_4,i,p}$, $B_{C_2F_6,i,p}$, $B_{CHF_3,i,p}$ et $B_{C_3F_8,i,p}$ représentent des moyennes simples non pondérées, formées séparément pour chaque gaz, sur *tous* les procédés de gravure *et* de CVD. Les facteurs d'émission spécifiques aux entreprises ou aux usines peuvent être substitués par des valeurs par défaut lorsqu'elles sont disponibles. Les équations tiennent compte de l'utilisation spécifique à l'usine des dispositifs de contrôle des émissions, mais pas des différences entre les procédés individuels ou les outils, ni de celles entre les usines de fabrication dans leurs mélanges de procédés et d'outils. Ainsi, les estimations de niveau 2b seront moins exactes que celles de niveau 3. On peut également noter que la méthodologie de niveau 2b est applicable à la fabrication de semi-conducteurs et de TCM-FPD.

Les émissions résultant de l'utilisation d'un FC spécifique (FC_i) sont constituées des émissions de FC_i et des émissions de CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 et de C_3F_8 créées comme produits dérivés pendant l'utilisation de FC_i . Le calcul qui suit doit être effectué pour chaque gaz pour chaque type de procédé :

ÉQUATION 6.7
MÉTHODOLOGIE DE NIVEAU 2b POUR L'ESTIMATION DES ÉMISSIONS DE FC

$$E_i = (1-h) \cdot \sum_p \left[FC_{i,p} \cdot (1-U_{i,p}) \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{i,p}) \right]$$

Où :

E_i = émissions de gaz i , kg

P = type de procédé (gravure versus nettoyage de chambre CVD)

$FC_{i,p}$ = masse de gaz i introduit dans le type de procédé p (par exemple de CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , $c-C_4F_8$, $c-C_4F_8O$, C_4F_6 , C_5F_8 , CHF_3 , CH_2F_2 , NF_3 , ou de SF_6), kg

h = fraction de gaz restant dans l'unité de transport après usage (résidu), fraction

$U_{i,p}$ = taux d'utilisation pour chaque gaz i et type de procédé p (fraction détruite ou transformée), fraction

$a_{i,p}$ = fraction du volume du gaz i utilisé dans le type de procédé p avec des technologies de contrôle des émissions (spécifiques aux entreprises ou aux usines), fraction

$d_{i,p}$ = fraction de gaz i détruite par la technologie de contrôle des émissions utilisée dans le type de procédé p (si plus d'une technologie de contrôle des émissions est utilisée dans le type de procédé p , c'est la moyenne de la fraction détruite par ces technologies de contrôle des émissions, où chaque fraction est pondérée par la quantité de gaz introduit dans les outils utilisant cette technologie), fraction

ÉQUATION 6.8
ÉMISSIONS DE PRODUITS DÉRIVÉS DE CF_4

$$BPE_{CF_4,i} = (1-h) \cdot \sum_p \left[B_{CF_4,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{CF_4,p}) \right]$$

Où :

$BPE_{CF_4,i}$ = émissions de produits dérivés de CF_4 convertis à partir du gaz utilisé i , kg

$B_{CF_4,i,p}$ = facteur d'émission pour les émissions de produits dérivés de CF_4 converti à partir du gaz i en type de procédé p , kg CF_4 créé/kg gaz i utilisé

$d_{CF_4,p}$ = fraction du produit dérivé de CF_4 détruit par la technologie de contrôle des émissions utilisée dans le type de procédé p (par ex., le type de technologie de contrôle listé dans le Tableau 6.6) , fraction

ÉQUATION 6.9
ÉMISSIONS DE PRODUITS DÉRIVÉS DE C_2F_6

$$BPE_{C_2F_6,i} = (1-h) \cdot \sum_p \left[B_{C_2F_6,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{C_2F_6,p}) \right]$$

Où :

$BPE_{C_2F_6,i}$ = émissions de produits dérivés de C_2F_6 converties à partir gaz i utilisé, kg

$B_{C_2F_6,i,p}$ = facteur d'émission pour les émissions de produits dérivés de C_2F_6 converties à partir du gaz i , dans un type de procédé p , kg de C_2F_6 créé/kg gaz i utilisé

$d_{C_2F_6,p}$ = fraction du produit dérivé C_2F_6 détruit par la technologie de contrôle des émissions utilisée dans le type de procédé p (par ex., le type de technologie de contrôle listé dans le Tableau 6.6) , fraction

ÉQUATION 6.10
ÉMISSIONS DE PRODUITS DÉRIVÉS DE CHF₃

$$BPE_{CHF_3,i} = (1-h) \cdot \sum_p \left[B_{CHF_3,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1 - a_{i,p} \cdot d_{CHF_3,p}) \right]$$

Où :

$BPE_{CHF_3,i}$ = émissions de produits dérivés de CHF₃ converties à partir du gaz utilisé i , kg

$B_{CHF_3,i,p}$ = facteur d'émission pour les émissions de produits dérivés de CHF₃ converties à partir du gaz i , dans un type de procédé p , kg CHF₃ créé/kg gaz i utilisé

$d_{CHF_3,p}$ = fraction du produit dérivé CHF₃ détruit par la technologie de contrôle des émissions utilisée dans le type de procédé p (par ex., le type de technologie de contrôle listé dans le Tableau 6.6), fraction

ÉQUATION 6.11
ÉMISSIONS DE PRODUITS DÉRIVÉS DE C₃F₈

$$BPE_{C_3F_8,i} = (1-h) \cdot \sum_p \left[B_{C_3F_8,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1 - a_{i,p} \cdot d_{C_3F_8,p}) \right]$$

Où :

$BPE_{C_3F_8,i}$ = émissions de produits dérivés de C₃F₈ issues du gaz utilisé i , kg

$B_{C_3F_8,i,p}$ = facteur d'émission pour les émissions de produits dérivés de C₃F₈ converties à partir du gaz i , dans un type de procédé p , kg C₃F₈ créé/kg gaz i utilisé

$d_{C_3F_8,p}$ = fraction du produit dérivé C₃F₈ détruit par la technologie de contrôle des émissions utilisée dans le type de procédé p (par ex., type de technologie de contrôle listé dans le Tableau 6.6), fraction

On notera que dans la formule de mélange de certaines gravures ou de certains nettoyages, de multiples précurseurs de FC peuvent être utilisés de façon cumulable et que les émissions de produits dérivés de CF₄, C₂F₆, CHF₃ et de C₃F₈ peuvent être créés par la décomposition de précurseur de FC individuel. Dans ce cas, les émissions de produits dérivés de CF₄, C₂F₆, CHF₃ et de C₃F₈ doivent être rapportées comme provenant du gaz FC avec le plus grand débit massique.

MÉTHODOLOGIE DE NIVEAU 3 – PARAMÈTRES SPÉCIFIQUES À CHAQUE TYPE DE PROCÉDÉ

La méthodologie de niveau 3 utilise également les Équations 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 et 6.11. Cependant, cette méthode requiert des valeurs spécifiques à l'entreprise ou à l'usine pour les paramètres utilisés dans ces équations pour chaque procédé individuel ou pour chacun des petits ensembles de procédés (par ex., la gravure de nitrure de silicium, ou l'outil de nettoyage de la chambre du dépôt chimique en phase vapeur renforcé par plasma (PECVD)). Par conséquent, en utilisant les Equations 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 et 6.11, les compilateurs d'inventaires doivent interpréter « p » comme un « procédé » spécifique (par ex., la gravure de nitrure de silicium, ou l'outil de nettoyage de la chambre du dépôt chimique en phase vapeur renforcé par plasma (PECVD)), et non comme un « type de procédé ».

Par souci de transparence et de compatibilité, les valeurs utilisées pour ces paramètres d'émissions doivent être bien documentées (voir Section 6.2.2).

Formation de CF₄ issue de films contenant du C pendant la fabrication de semi-conducteurs

Les méthodologies de niveau 2a, 2b et 3 tiennent compte des émissions de CF₄ produites pendant l'absorption par la gravure de matériaux à faible constance diélectrique (k), pendant le nettoyage de réacteurs CVD contenant un faible k ou celui de films de carbure pendant la fabrication de semi-conducteurs. Du CF₄ peut être formé même si le FC précurseur ne contient pas de carbone ou si le FC précurseur n'est pas un gaz à effet de serre.

Par exemple, le nettoyage des réacteurs CVD à faible k avec du NF₃ produira du CF₄ comme produit dérivé. Dans ces cas, l'Equation 6.7 doit être utilisée pour rapporter les émissions de NF₃ et le résultat de l'Equation 6.8 doit être utilisé pour indiquer les émissions de CF₄ issues de ce procédé. Quand du F₂, du COF₂, ou du ClF₃ est

utilisé pour le nettoyage de la chambre, du CF_4 peut également se former. Dans ce cas, les émissions de CF_4 sont estimées par recours à l'Equation 6.8 et les résultats sont ajoutés au total des émissions de CF_4 obtenus avec l'Equation 6.7. Dans les deux cas, le $B_{CF_4,i,p}$ doit être mesuré comme la fraction de la masse de produit sur la masse de gaz propre ou de gaz de gravure introduit dans le réacteur.

Après avoir estimé les émissions de chaque gaz FC et celles de CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 et de C_3F_8 comme produits dérivés, les compilateurs d'inventaires ou les entreprises doivent ajouter ces émissions pour tous les gaz afin d'estimer le total des émissions de FC agrégées issues d'un procédé particulier.

ENCADRÉ 6.1

EXEMPLE POUR LA PRODUCTION DE SEMI-CONDUCTEURS

Par exemple, si une source a utilisé du NF_3 (pour le nettoyage de chambre ou pour la gravure), du CHF_3 (pour la gravure) et du CF_4 (pour la gravure) et si des films à faible k ont été utilisés, le total des émissions est calculé avec l'Equation 6.7 pour le NF_3 , le CHF_3 et le CF_4 et avec l'Equation 6.8 pour la formation de CF_4 intervenu lors de l'élimination des films à faible k avec du NF_3 . Sous forme d'équation, le total est :

$$\text{Total des émissions de FC} = E_{NF_3} + E_{CHF_3} + E_{CF_4} + BPE_{CF_4,NF_3}$$

6.2.1.2 FLUIDES DE TRANSFERT DE CHALEUR

Il existe deux méthodes pour estimer les émissions issues de l'utilisation des fluides de transfert de chaleur. Le choix des méthodes dépendra de la disponibilité des données sur les activités sur l'utilisation des fluides de transfert de chaleur, et est détaillé dans le diagramme décisionnel (voir Figure 6.2, Diagramme décisionnel pour l'estimation des émissions de FC issues des fluides de transfert de chaleur. Voir également la Section 1.5. du Chapitre 1, Choisir entre les méthodes des bilans de matière et des facteurs d'émission).

NIVEAU 1 - FLUIDES DE TRANSFERT DE CHALEUR

Le niveau 1 est approprié lorsque des données spécifiques aux usines sur les fluides de transfert de chaleur sont disponibles. C'est la moins exacte des deux méthodes pour estimer les émissions issues des pertes des fluides de transfert de chaleur. Cette méthode, contrairement à celle de niveau 2, donne une estimation des émissions agrégées – une moyenne pondérée des émissions entre tous les FC liquides qui est exprimée comme la masse de C_6F_{14} .¹⁰ Le calcul repose sur un facteur d'émission générique qui correspond à la moyenne agrégée des émissions par unité de silicium consommée pendant la fabrication de semi-conducteurs. La formule est détaillée dans l'Equation 6.12 :

ÉQUATION 6.12

MÉTHODOLOGIE DE NIVEAU 1 POUR L'ESTIMATION DES ÉMISSIONS TOTALES DE FC ISSUES DES FLUIDES DE TRANSFERT DE CHALEUR

$$FC_{\text{liquid, total}} = EF_1 \cdot C_u \cdot C_d$$

Où :

$FC_{\text{liquid, total}}$ = émissions totales de FC exprimées comme la masse de C_6F_{14} et de Mt C_6F_{14}

EF_1 = facteur d'émission (émissions agrégées de FC par Gm^2 de silicium consommé pendant la période, exprimée comme la masse de C_6F_{14} (Voir Tableau 6.2.)), Mt C_6F_{14}/Gm^2

C_u = capacité d'utilisation moyenne pour toutes les usines de production de semi-conducteurs d'un pays pendant la période, fraction

C_d = capacité de conception des usines de fabrication de semi-conducteurs d'un pays, Gm^2

NIVEAU 2 - FLUIDES DE TRANSFERT DE CHALEUR

Il existe une méthodologie de niveau 2 pour estimer les émissions réelles issues de l'utilisation de chaque fluide FC. Cette méthode est une approche de bilans de matière qui prend en compte l'utilisation de FC liquide sur une période annuelle. Elle est appropriée quand des données spécifiques aux entreprises sont disponibles. Au cours d'une année, des FC liquides sont utilisés pour remplir l'équipement acheté neuf et pour remplacer les pertes de fluide FC issues de l'évaporation lors de l'opération d'équipement. La méthodologie de niveau 2 néglige les pertes de fluide pendant le remplissage d'équipements nouveaux ou existants ou pendant le déclassement du vieil équipement (qui est raisonnable pour ces fluides coûteux).¹¹ Les compilateurs d'inventaire doivent obtenir des

entreprises la composition chimique des fluides (du fluide) pour lesquels (lequel) les émissions sont estimées. La méthode est détaillée dans l'Equation 6.13.

ÉQUATION 6.13
MÉTHODOLOGIE DE NIVEAU 2 POUR L'ESTIMATION DES ÉMISSIONS DE FC ISSUES DES FLUIDES
DE TRANSFERT DE CHALEUR

$$FC_i = \rho_i \cdot [I_{i,t-1}(l) + P_{i,t}(l) - N_{i,t}(l) + R_{i,t}(l) - I_{i,t}(l) - D_{i,t}(l)]$$

Où :

FC_i = émissions de FC_i , kg

ρ_i ρ_i = densité du liquide FC_i , kg/litre

$I_{i,t-1}(l)$ = inventaire du liquide FC_i à la fin de la période antérieure, litres

$P_{i,t}(l)$ = achats nets de liquide FC_i pendant la période (net en terme d'achats et d'efficacité), litres

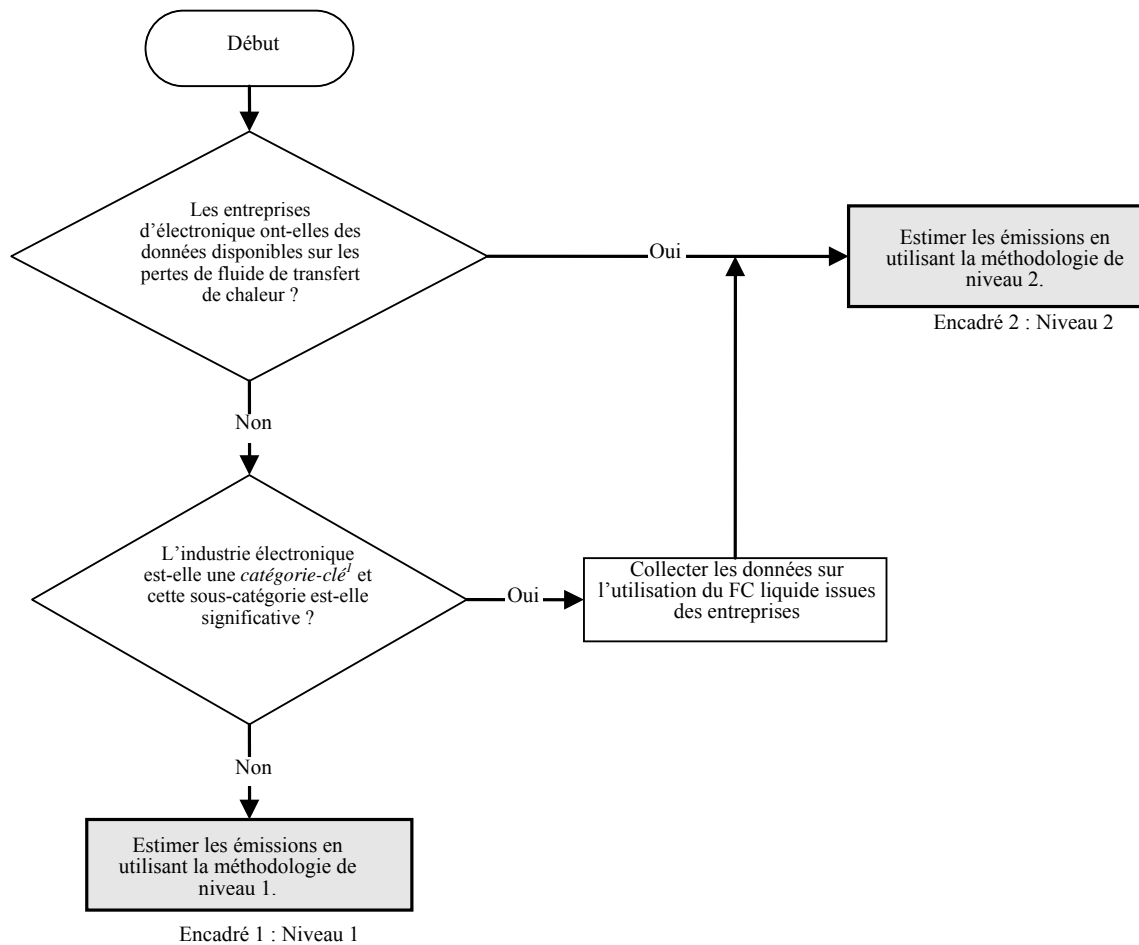
$N_{i,t}(l)$ = charge totale (ou charge nominale) des nouveaux équipements installés, litres

$R_{i,t}(l)$ = charge totale (ou charge nominale) des équipements vendus ou hors d'usage, litres

$I_{i,t}(l)$ = inventaire du liquide FC_i à la fin de la période, litres

$D_{i,t}(l)$ = montant du FC_i récupéré à partir d'équipements mis hors d'usage et envoyés hors du site pendant la période, litres

Figure 6.2 Diagramme décisionnel pour l'estimation des émissions de FC issues des pertes de fluides de transfert de chaleur pendant la fabrication d'appareils électroniques



Note :

1. Voir Volume 1, Chapitre 4, Choix méthodologique et identification des catégories-clé (observant la Section 4.1.2 aux ressources limitées), pour le débat autour des catégories sources et de l'usage des diagrammes décisionnels.

6.2.2 Choix des facteurs d'émission¹²

6.2.2.1 GRAVURE ET NETTOYAGE CVD POUR SEMI-CONDUCTEURS, AFFICHEURS À CRISTAUX LIQUIDES ET PHOTOVOLTAÏQUES

NIVEAU 1

Les facteurs d'émission par défaut pour la méthodologie de niveau 1 sont présentés dans le tableau 6.2 ci-dessous.

Lors de l'utilisation de la méthodologie de niveau 1, il n'est pas conforme aux *bonnes pratiques* de modifier de quelque façon que ce soit l'ensemble des FC ou les valeurs des facteurs d'émissions présentées dans le tableau 6.2. Les compilateurs d'inventaires ne doivent pas combiner les émissions estimées en utilisant la méthodologie de niveau 1 avec les émissions estimées en utilisant les méthodologies de niveau 2 ou 3. Les compilateurs d'inventaires ne doivent pas non plus utiliser, par exemple, le facteur de niveau 1 pour le CF₄ afin d'estimer les émissions de CF₄ issues de semi-conducteurs et le combiner avec les résultats d'autres gaz FC issus de la méthodologie de niveau 2 ou 3. Il doit également être noté que les facteurs d'émissions de niveau 1 des FC

présentés dans le Tableau 6.2 ne doivent pas être utilisés pour d'autres emplois que pour l'estimation des émissions annuelles de FC agrégées et issues de la fabrication de semi-conducteurs, de TCM-FPD ou de PV dans le but de la compilation de l'inventaire national de gaz à effet de serre.

Secteur de l'industrie électronique	Facteur d'émission (FE) (masse par unité de surface de substrat traité)						
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	C ₃ F ₈	NF ₃	SF ₆	C ₆ F ₁₄
Semi-conducteurs, kg/m ²	0.9	1.	0.04	0.05	0.04	0.2	NA
TCM-FPD, g/m ²	0.5	NA	NA	NA	0.9	4.	NA
Cellules de PV ^a , g/m ²	5	0.2	NA	NA	NA	NA	NA
Fluides de transfert de chaleur ^b , kg/m ²	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.3

^a FE adaptés à partir d'un travail non publié de Fthenakis, Alsema et Agostinelli (Fthenakis ,2005). On notera que le facteur est uniquement applicable à des technologies spécifiques au silicium et est qu'il est utilisé pour la réduction.

^b FE assume que les HTF ont la même PRG et que C₆F₁₄ représente une variable de remplacement adaptée. L'origine de ce facteur est décrit dans Burton, 2004, et basée, en partie, sur la travail de Tuma et Tousignant (2001).

NIVEAU 2

Comme mentionné ci-dessus, les facteurs d'émission basés sur de simples variables de production électronique ne sont pas adaptés pour rendre compte de tous ceux qui influencent les émissions. Des données pour chacun des paramètres suivants sont nécessaires pour effectuer une estimation sérieuse :

- Les gaz utilisés ;
- Le type de procédé utilisé (DVP ou gravure) ;
- La marque de l'outil de procédé utilisé ;
- La technologie de réduction des émissions.

Des valeurs par défaut ont été développées pour les paramètres utilisés dans les méthodologies de niveau 2a et 2b (Voir Figure 6.1) sur la base de mesures directes, de la littérature et d'un jugement d'experts (voir Tableaux 6.3, 6.4 et 6.5 : Facteurs d'émissions par défaut pour les émissions de FC issues de la fabrication respective de semi-conducteurs¹², TCM-FPD¹³ et PV¹²). Etant donné la difficulté que pose le fait de représenter les différentes conditions de production à l'intérieur de l'industrie électronique, les paramètres d'émission par défaut sont incertains par nature. Alors que l'exactitude peut être améliorée grâce à un ensemble plus large de données mesurées et lorsque les facteurs sont appliqués à des procédés similaires en utilisant des recettes chimiques identiques ou similaires, le développement de facteurs par défaut implique nécessairement une certaine forme de calcul de la moyenne par toutes les données.

Les spécialistes de l'industrie électronique pensent que l'innovation technologique rapide introduite par des fournisseurs en chimie et en équipement et par des fabricants d'appareils électroniques conduira à des réductions d'émissions majeures dans le futur (c'est à dire, 2006 et plus). Il en résulte que les facteurs d'émissions pour ces catégories doivent évoluer pour refléter ces changements. Les industries de semi-conducteurs et de TCM-FPD ont établi des mécanismes grâce au Conseil Mondial des semi-conducteurs et au Comité Mondial de coopération de l'industrie LCD pour évaluer respectivement les facteurs globaux d'émission. On peut considérer que l'industrie PV est en train d'établir un mécanisme pour tracer les émissions de PFC pendant la fabrication de PV. (Tthenakis, 2006)

Il est possible que l'utilisation de FC pendant la fabrication de PV augmente. Il existe des évidences qui montrent que, si l'utilisation de FC dans cette industrie augmente, des efforts seront faits pour contrôler ces émissions (Agostinelli *et al.*, 2004; Rentsch *et al.*, 2005). Les compilateurs d'inventaires peuvent souhaiter consulter périodiquement l'industrie pour mieux comprendre les circonstances mondiales et nationales.

Les Tableaux 6.3 et 6.4 sont composés de deux entrées pour le NF₃ : le NF₃ isolé et le NF₃. Le premier fait référence à une méthode de nettoyage dans laquelle les agents nettoyeurs du film composés de NF₃ (F-atomes) sont produits dans un plasma en amont (isolé) du nettoyage de la chambre. Le dernier, indiqué simplement

comme NF_3 , fait référence à un procédé de nettoyage de NF_3 *in situ*, qui est analogue au procédé utilisé pour le nettoyage d'autres gaz comme le C_2F_6 et le C_3F_8 .

La valeur par défaut pour la fraction de gaz restant dans l'unité de transport après usage (résidu) est égale à 0,10.

TABLEAU 6.3 FACTEURS D'ÉMISSION PAR DÉFAUT DE NIVEAU 2 POUR LES ÉMISSIONS DE FC ISSUES DE LA FABRICATION DE SEMI-CONDUCTEURS														
Gaz de transformation (i)	Gaz à effet de serre avec TRE PRG									Gaz à effet de serre sans TRE PRG			Non-GES produisant des produits dérivés FC :	
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	c-C ₄ F ₈	NF ₃ isolé	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₅ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Niveau 2a														
1-U _i	0.9	0.6	0.4	0.1	0.4	0.1	0.02	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	NA	NA
B _{CF4}	NA	0.2	0.07	0.08	0.1	0.1	0.02 [†]	0.09	NA	0.3	0.1	0.1	0.02 [†]	0.02 [†]
B _{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	0.1	NA	NA	NA	0.2	0.04	NA	NA	NA
B _{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.04	NA	NA
Niveau 2b														
Gravure 1-U _i	0.7*	0.4*	0.4*	0.06*	NA	0.2*	NA	0.2	0.2	0.1	0.2	NA	NA	NA
CVD 1-U _i	0.9	0.6	NA	NA	0.4	0.1	0.02	0.2	NA	NA	0.1	0.1	NA	NA
Gravure B _{CF4}	NA	0.4*	0.07*	0.08*	NA	0.2	NA	NA	NA	0.3*	0.2	NA	NA	NA
Gravure B _{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	0.2	NA	NA	NA	0.2*	0.2	NA	NA	NA
CVD B _{CF4}	NA	0.1	NA	NA	0.1	0.1	0.02 [†]	0.1 [†]	NA	NA	0.1	0.1	0.02 [†]	0.02 [†]
CVD B _{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B _{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.04	NA	NA
Remarques : NA signifie « non applicable » et ce, sur la base des informations actuellement disponibles														
* Les facteurs d'émissions par défaut pour F ₂ et COF ₂ peuvent être appliqués au nettoyage des réacteurs à faible k avec du ClF ₃ .														
* L'estimation inclue des procédés de gravure à plusieurs gaz														
† L'estimation indique la présence d'un faible k, de procédés de gravure à plusieurs gaz et carbure qui peuvent contenir un additif FC contenant du C.														

TABLEAU 6.4 FACTEURS D'ÉMISSION PAR DÉFAUT DE NIVEAU 2 POUR LES ÉMISSIONS DE FC ISSUES DE LA FABRICATION DE LCD														
Gaz de transformation (i)	Gaz à effet de serre sans TRE PRG									Gaz à effet de serre sans TRE PRG			Non-GES produisant des produits dérivés FC :	
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	c-C ₄ F ₈	NF ₃ isolé	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₅ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Niveau 2a														
1-U _i	0.6	NA	0.2	NA	NA	0.1	0.03	0.3	0.6	NA	NA	NA	NA	NA
B _{CF4}	NA	NA	0.07	NA	NA	0.009	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B _{CHF3}	NA	NA	NA	NA	NA	0.02	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B _{C2F6}	NA	NA	0.05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B _{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Niveau 2b														
Gravure 1-U _i	0.6	NA	0.2	NA	NA	0.1	NA	NA	0.3	NA	NA	NA	NA	NA
CVD 1-U _i	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.03	0.3	0.9	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B _{CF4}	NA	NA	0.07	NA	NA	0.009	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B _{CHF3}	NA	NA	NA	NA	NA	0.02	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B _{C2F6}	NA	NA	0.05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B _{CF4}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B _{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B _{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Remarques : NA signifie « non applicable » et ce sur la base des informations actuellement disponibles.														

TABLEAU 6.5														
FACTEURS D'ÉMISSION PAR DÉFAUT DE NIVEAU 2 POUR LES ÉMISSIONS DE FC ISSUES DE LA FABRICATION DE PV														
	Gaz à effet de serre sans TRE PRG									Gaz à effet de serre sans TRE PRG			Non-GES produisant des produits dérivés FC :	
Gaz de transformation (i)	CF₄	C₂F₆	CHF₃	CH₂F₂	C₃F₈	c-C₄F₈	NF₃ isolé	NF₃	SF₆	C₄F₆	C₅F₈	C₅F₈O	F₂	COF₂
Niveau 2a														
1-U_i	0.7	0.6	0.4	NA	0.4	0.2	NA	0.2	0.4	NA	NA	NA	NA	NA
B_{CF4}	NA	0.2	NA	NA	0.2	0.1	NA	0.05	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	0.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Niveau 2b														
Gravure 1-U_i	0.7	0.4	0.4	NA	NA	0.2	NA	NA	0.4	NA	NA	NA	NA	NA
CVD 1-U_i	NA	0.6	NA	NA	0.1	0.1	NA	0.3	0.4	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B_{CF4}	NA	0.2	NA	NA	NA	0.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	0.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B_{CF4}	NA	0.2	NA	NA	0.2	0.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Remarques : NA signifie « non applicable » et ce sur la base des informations actuellement disponibles.														

TABLEAU 6.6
PARAMÈTRES DE RENDEMENTS PAR DÉFAUT DE NIVEAU 2a ET 2b POUR LES TECHNOLOGIES DE RÉDUCTION DES
ÉMISSIONS DE FC DE L'INDUSTRIE ÉLECTRONIQUE^{a,b,e}

Technologie de contrôle des émissions	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	C ₃ F ₈	c-C ₄ F ₈	NF ₃ ^f	SF ₆
Destruction^c	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.95	0.9
Capture/Récupération^d	0.75	0.9	0.9	NT	NT	NT	0.9

^a Les valeurs sont des moyennes simples (non pondérées) des rendements de destruction pour toutes les technologies de réduction. Les facteurs d'émission ne s'appliquent pas aux technologies de contrôle des émissions qui ne peuvent pas réduire le CF₄ avec un rendement de destruction ou d'élimination (DRE) ≥ 85 % lorsque le CF₄ est présent comme un gaz entrant ou un produit dérivé et tous les autres gaz avec un DRE ≥ 90 %. Si les fabricants utilisent n'importe quel autre type de technologie de contrôle des émissions ; son rendement de destruction est de 0 % lorsque est utilisée la méthodologie de niveau 2.

Les facteurs de niveau 2 de la technologie de contrôle des émissions sont uniquement applicables aux dispositifs chauffés électriquement, par combustion d'hydrocarbures, plasma et catalytiques qui :

- sont conçus spécialement pour diminuer les FC,
- sont utilisés à l'intérieur de la fenêtre de procédé spécifié du fabricant et en accord avec les programmes de maintenance spécifiés
- ont été mesurés et confirmés sous les conditions de procédé actuelles, en utilisant un protocole du son technique, qui prend en compte les erreurs de mesure connus comme, par exemple, la formation d'un produit dérivé de CF₄ pendant le C₂F₆ ainsi que l'effet de la dilution, l'utilisation de l'oxygène ou des deux dans les systèmes de réduction de la combustion.

^c Valeurs moyennes pour les technologies de réduction par combustion de fuel, plasma et catalytique.

^d Valeurs moyennes pour les technologies de capture et de récupération des membranes cryogénique.

^e Données du vendeur vérifiées par des fabricants de semi-conducteurs. Les facteurs doivent être utilisés seulement lorsqu'une technologie de contrôle des émissions a été utilisée et entretenue en accord avec les spécifications des fabricants de systèmes de réduction.

^f L'utilisation de NF₃ dans le procédé de gravure est typiquement petite comparée au CVD. Les émissions agrégées de NF₃ provenant de la gravure et du CVD, d'après la méthodologie de niveau 2b, ne devraient normalement pas être plus importantes que les estimations effectuées avec les méthodologies de niveau 2a ou 1.

NT = non testé.

Facteurs d'émission de l'outil de procédé

Les procédures pour calculer les facteurs d'émissions de l'outil de procédé sont identiques pour les méthodologies de niveau 2a et 2b. Les facteurs d'émissions de l'outil de procédé sont égaux au montant des gaz à effet de serre émis divisé par le montant des gaz à effet de serre utilisés dans le procédé. Les facteurs d'émission correspondent au terme « (1 - U_i) » dans les formules de niveau 2. Par exemple, un facteur d'émission de 0,09 pour CF₄ (voir Tableau 6.3 ci-dessus, valeur de Niveau 2a) signifie que 90% du CF₄ utilisé dans le procédé est émis comme CF₄.

Des facteurs d'émission de produits dérivés ont également été calculés. La plus grande émission de produits dérivés significative est le CF₄. Alors qu'il est généralement admis que les seuls gaz qui émettent des quantités significatives de CF₄ comme produit dérivé sont le C₂F₆ et le C₃F₈, les données fournies par les fabricants d'outils et les fournisseurs chimiques montrent que le CF₄ peut également se former à partir de mélanges de gaz (par ex., qui contiennent du CHF₃ ou du CH₂F₂) et du c-C₄F₈. Pour faire suite à cette discussion, des facteurs d'émission de produits dérivés ont été calculés pour le CHF₃, le CH₂F₂, le C₂F₆, C₃F₈, le c-C₄F₈ et le C₄F₈O. Par exemple, une valeur de 0,1 pour le C₃F₈ (issue du Tableau 6.3 ci-dessus, valeur de Niveau 2a) signifie que 10% du C₃F₈ utilisé est converti en CF₄. Cependant, du C₂F₆ peut aussi être émis à partir de la décomposition de molécules telles que le C₄F₆. Comme décrit précédemment, du CF₄ peut aussi être formé par la gravure ou le nettoyage des chambres avec des films contenant du carbone.

Afin de calculer les facteurs d'émissions de l'outil de procédé de niveau 2b, des données ont été collectées chez les fabricants de gaz et d'équipements de procédés. Les données ont été collectées selon le type de procédé (dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou gravure) et le type de gaz (par ex., le C₂F₆ et le CF₄). Les méthodes utilisées pour conduire les tests d'émissions en temps réel étaient la Spectrométrie de masse quadrupolaire (QMS) et la Spectroscopie Fourier à Infrarouge Transformé (SFIRT) : ce sont les meilleures méthodes pour mesurer les émissions d'outils de procédés. Des standards de calibration (habituellement 1% de mélanges avec un bilan de N₂) ont été utilisés pour quantifier les résultats. Le protocole de mesures et les exigences en matière de contrôle de qualité qui ont été suivies sont détaillés dans «Guidelines for Environmental Characterisation of Semiconductor Equipment» (Meyers *et al.*, 2001).¹⁴ Les facteurs d'émission pour le niveau 2b (voir Tableaux 6.3 et 6.4) sont égaux à la moyenne simple (non pondérée) des données collectées pour chaque gaz pour la gravure et le CVD, arrondie à un seul chiffre significatif.^{12, 16}

Afin de calculer les facteurs d'émissions de l'outil de procédé de niveau 2b, il est nécessaire de connaître les montants de gaz utilisés dans le procédé de fabrication typique des semi-conducteurs. Les facteurs d'émission de niveau 2a ont été obtenus en utilisant des pondérations fournies par des experts industriels pour la proportion de chaque gaz utilisé dans les procédés de gravure et de nettoyage. Par exemple, les facteurs d'émission de niveau 2b pour le C_2F_6 (Tableau 6.3) s'élèvent à 0,5 (gravure) et 0,6 (CVD). La distribution de l'utilisation de C_2F_6 entre les procédés de gravure et de nettoyage de la chambre CVD pendant la fabrication de semi-conducteurs est de 20/80. En appliquant ces pondérations à chacun des facteurs d'émission, on obtient 0,6 comme nombre significatif, pour le facteur de niveau 2a pour le C_2F_6 . La distribution correspondante de l'utilisation de SF_6 dans la fabrication de TCM-FPD est de 50/50, ce qui donne un facteur d'émission de niveau 2a de 0,6 (Tableau 6.4).¹⁵

Pour les facteurs d'émission de niveau 3, les fabricants de semi-conducteurs utilisent les valeurs spécifiques aux usines plutôt que les valeurs par défaut listées dans le Tableau 6.1 ci-dessus. Afin de s'assurer de la qualité des facteurs d'émission, des tests d'émission doivent être conduits en accord avec les méthodes accréditées.¹⁶ Si un tiers fournisseur mène des tests d'émission, le fabricant de semi-conducteurs doit s'assurer que ce dernier est capable de respecter l'ensemble des exigences détaillées dans la Révision 3.0 de « Equipment Environmental Characterisation Guidelines » (SIA, 2000).

Les fabricants de semi-conducteurs qui utilisent des facteurs d'émission communiqués par le fournisseur d'équipement d'outils de procédé doit s'assurer que les facteurs d'émission sont applicables à leur procédé de fabrication spécifique.

Les méthodes de fabrication avec des paramètres de procédés (par ex., la pression ou le taux de flux) qui dévient des conditions centrales peuvent avoir des facteurs d'émission différents de ceux fournis par le fabricant d'outils.

Facteurs de technologie de contrôle des émissions pour les méthodologies de niveau 2

Les technologies de contrôle des émissions sont en train de se développer à un rythme soutenu parallèlement aux technologies de fabrication d'appareils électroniques. Des facteurs par défaut de la technologie de contrôle des émissions du Tableau 6.6 sont basés sur des tests des dispositifs de contrôle qui ont été optimisés pour des procédés et outils spécifiques. Les résultats sont sensés varier selon les outils et les taux de flux des gaz. Les facteurs de la technologie de contrôle des émissions ne sont pas applicables à tous les outils ou procédés dans les usines de fabrication de semi-conducteurs, d'afficheurs à cristaux liquides (LCD) ou de photovoltaïques. Les paramètres par défaut du rendement de destruction de niveau 2 présentés dans le Tableau 6.6 sont applicables seulement lorsque le compilateur d'inventaire peut démontrer à travers une communication avec les gérants des usines et une documentation adaptée que les technologies de contrôle des émissions fonctionnent et sont entretenues selon les spécifications des fabricants. Si les fabricants utilisent un autre type de technologie de réduction, ils doivent considérer comme admis que le rendement de destruction est de 0 % avec les méthodologies de niveau 2a et 2b.

Les hypothèses concernant les facteurs des technologies de contrôle des émissions pour les méthodologies de niveau 2 (a et b) incluent :

- (i) Les technologies spécifiques de contrôle des émissions ne sont pas listées ; les facteurs des technologies de contrôle des émissions pour chaque agent chimique ont été établis sur la base de résultats obtenus durant le test des technologies de contrôle des émissions dans les applications de fabrication de semi-conducteurs ;
- (ii) Les facteurs des technologies de contrôle des émissions doivent être utilisés uniquement lorsqu'une réduction est appliquée aux émissions qui tombent dans le niveau d'opération spécifié par le fabriquant de dispositifs de réduction pour égaliser ou excéder les facteurs listés dans le Tableau 6.6 ;
- (iii) Les facteurs des technologies de contrôle des émissions s'appliquent uniquement à la proportion des émissions qui passent à travers un dispositif de contrôle du fonctionnement et de la maintenance ; les facteurs d'émission ne doivent pas être appliqués lorsque le dispositif de contrôle est contourné, non fonctionnel ou non entretenu en accord avec les spécifications des fabricants ;
- (iv) Les facteurs des technologies de contrôle des émissions ne s'appliquent pas aux technologies de contrôle des émissions qui ne peuvent pas diminuer le CF_4 avec un rendement de destruction ou d'élimination (DRE) ≥ 85 % lorsque du CF_4 est présent comme gaz entrant ou produit dérivé et tous les autres gaz FC avec un DRE ≥ 90 %. En utilisant les méthodes de niveau 2 et si les fabricants utilisent n'importe quel autre type de technologie de contrôle des émissions, le rendement de destruction est de 0 %.

Les facteurs par défaut de contrôle des émissions de niveau 2 du Tableau 6.6, Paramètres de rendement par défaut pour les technologies de réduction des émissions de FC de l'industrie électronique, ont été calculés à partir de données provenant des fournisseurs d'équipements, des fournisseurs de technologies de réduction et des fabricants de dispositifs électroniques. Il doit être remarqué que seules les données issues des dispositifs de réduction qui étaient spécifiquement destinés à réduire les FC ont été utilisés dans ce calcul. Les données ont été fournies par les dispositifs de réduction de la combustion (tous utilisant certains types de combustibles), les dispositifs de réduction de plasma, les dispositifs de réduction de chaleur électrique et des dispositifs de réduction catalytique.

Les valeurs présentées dans le tableau 6.6, Paramètres de rendement par défaut pour les technologies de réduction des émissions de FC de l'industrie électronique, sont le résultat de toutes les données reçues pour des technologies optimisées et pour chaque gaz entrant, arrondi aux 5% les plus proches (par ex., une moyenne de 98 % sera arrondie à 0,95). Les moyennes ont été arrondies vers le bas pour indiquer que (i) les dispositifs de contrôle des émissions ont un rendement qui varie selon le type de gaz à détruire pour lesquels ils ont été optimisés et (ii) le rendement des dispositifs de contrôle des émissions dépend du type d'outil sur lequel ils sont installés (tranches de 50, 200 ou 300mm), le montant du gaz FC qui a coulé à travers cet outil particulier, et le montant du flux d'échappement par le dispositif de contrôle des émissions. Un dispositif de contrôle des émissions qui peut détruire 99 % du FC, lorsqu'il a été optimisé de sorte à détruire ce FC sur un certain outil, peut en détruire moins de 95 % s'il avait été optimisé pour détruire autre chose ou s'il a été utilisé sur un outil pour lequel il n'était pas conçu, ou encore si le FC ou le total du flux d'échappement excède une certaine limite. Les fabricants d'appareils électroniques et les fabricants d'outils de réduction doivent s'assurer que le système de réduction installé est correctement proportionné et entretenu et que le dispositif de contrôle des émissions peut atteindre ou excéder le facteur par défaut de la technologie de contrôle des émissions détaillée dans le Tableau 6.6.

6.2.2.2 FLUIDES DE TRANSFERT DE CHALEUR

Le facteur d'émission pour la méthodologie de niveau 1 est présenté dans le tableau 6.2. La méthodologie de niveau 2 n'a pas de facteur d'émission pour estimer les émissions issues de l'évaporation des fluides de transfert de chaleur.

6.2.3 Choix des données sur les activités

Les données sur les activités de l'industrie électronique sont des données sur les ventes et l'utilisation de gaz ou sur le montant annuel de substrats électroniques traités (par ex., le nombre de m² de silicium traité pour les semi-conducteurs). Pour les méthodologies de niveau 2 qui requièrent plus de données, des données sur les achats de gaz au niveau de l'entreprise ou de l'usine sont nécessaires. Pour les méthodologies de niveau 1, les compilateurs d'inventaires devront déterminer la superficie de la surface totale de substrats électroniques traités pour une année donnée. La consommation de silicium peut être estimée en utilisant une édition appropriée de la base de données du World Fab Watch (WFW), publiée trimestriellement par Semiconductor Equipment & Materials International (SEMI).¹⁷ La base de données contient une liste d'usines mondiales (usines de production, de recherche et de développement, usines pilotes, etc), et des informations sur leur emplacement, leurs capacités d'élaboration, la taille des couches et bien plus encore. De façon similaire, la base de données de SEMI « Flat Panel Display Fabs on Disk » fournit une estimation de la consommation de verre pour la fabrication globale de TCM-PFD.

Les données sur les activités du Tableau 6.7 nous informent sur les capacités d'élaboration. Les usines de fabrication de semi-conducteurs et de TCM-FPD ne fonctionnent pas selon leurs capacités d'élaboration pendant des périodes longues comme une année entière. La capacité fluctue plutôt selon la demande du produit. Pour la fabrication de semi-conducteurs, des statistiques publiques disponibles sur l'industrie montrent que la capacité d'utilisation moyenne annuelle globale pendant la période 1992-2000 varie entre 76 et 91 %, avec une valeur moyenne de 82 % et une autre, plus probable, de 80 %. Lorsque les données sur la capacité d'utilisation spécifique au pays ne sont pas disponibles, la capacité d'utilisation suggérée pour la fabrication de semi-conducteurs est de 80 %. Cela doit être utilisé de façon cohérente pour une série temporelle d'estimations. Pour la fabrication de TCM-FPD, les données publiques sur les capacités d'utilisation ne sont pas disponibles. L'industrie de fabrication de TCM-FPD, comme l'industrie de production de semi-conducteurs, baisse les prix des produits pour maintenir au plus haut la capacité d'utilisation pratique des usines. Par analogie, il est suggéré d'utiliser 80 % pour estimer la consommation de substrat de verre en utilisant les capacités de conception fournies dans le Tableau 6.7 pour les fabricants de TCM-FPD par pays. Pour la fabrication de PV, les données sur les capacités d'utilisation publiées varient entre 77 et 92 %, avec une moyenne de 86 % pour les années 2003 et 2004. Par conséquent, 86 % est le nombre par défaut qu'il est recommandé d'utiliser pour C_u (voir Equation 6.1).

Lorsque l'on estime les émissions pendant la fabrication de PV, il faut rendre compte de la fraction de l'industrie qui emploie réellement des FC (C_{PV} dans l'Equation 6.1). Puisque des enquêtes récentes indiquent qu'entre 40 et 50 % de la fabrication de PV utilise réellement des FC et que cette tendance est à l'augmentation, la valeur par défaut recommandée pour le C_{PV} est de 0,5.

Le Tableau 6.7 résume les capacités pour 2003, 2004 et 2005 des pays, qui au total, participent pour plus de 90 % à la capacité mondiale en 2003.

Totaux par pays	Capacités d'élaboration annuelle de Si, Mm ²			Capacités d'élaboration annuelle de verre, Mm ²		
	2003 ¹	2004 ²	2005 ²	2003 ¹	2004 ²	2005 ²
Australie	0,0008	0,0008	0,0008	NA	NA	NA
Autriche	0,0201	0,0201	0,0201	NA	NA	NA
Belgique	0,0040	0,0040	0,0040	NA	NA	NA
Canada	0,0041	0,0041	0,0041	NA	NA	NA
Chine	0,1436	0,1982	0,3243	0,0432	0,0432	0,8154
République tchèque	0,0057	0,0057	0,0057	NA	NA	NA
France	0,0653	0,0674	0,0674	NA	NA	NA
Allemagne	0,1622	0,1622	0,1622	NA	NA	NA
Chine, Hong Kong	0,0059	0,0059	0,0059	NA	NA	NA
Hongrie	0,0006	0,0006	0,0006	NA	NA	NA
Inde	0,0128	0,0128	0,0128	NA	NA	NA
Irlande	0,0175	0,0430	0,0430	NA	NA	NA
Israël	0,0310	0,0310	0,0564	NA	NA	NA
Italie	0,0431	0,0431	0,0609	NA	NA	NA
Japon	0,9091	0,9235	0,9639	4,5746	5,3256	6,9201
Lettonie	0,0019	0,0019	0,0019	NA	NA	NA
Malaisie	0,0284	0,0284	0,0284	NA	NA	NA
Pays-Bas	0,0301	0,0301	0,0301	0,0209	0,0209	0,0209
République de Biélorussie	0,0077	0,0077	0,0077	NA	NA	NA
Russie	0,0250	0,0250	0,0325	NA	NA	NA
Corée du Sud	0,3589	0,3742	0,3937	5,8789	9,4679	12,4857
Singapour	0,1730	0,1730	0,1985	0,2821	0,2821	0,2821
République slovaque	0,0043	0,0043	0,0043	NA	NA	NA
Afrique du Sud	0,0021	0,0021	0,0021	NA	NA	NA
Suède	0,0019	0,0019	0,0019	NA	NA	NA
Suisse	0,0098	0,0098	0,0098	NA	NA	NA
Thaïlande	0,0000	0,0000	0,0094	NA	NA	NA
Turquie	0,0000	0,0000	0,0000	NA	NA	NA
Royaume-Uni	0,0597	0,0597	0,0936	NA	NA	NA
Etats-unis d'Amérique	0,6732	0,6921	0,7190	0,0000	0,0000	0,0000
Vietnam	0,0000	0,0000	0,0000	NA	NA	NA
Total global	3,3206	3,4972	3,8849	15,0572	23,9959	33,7459

¹ Les totaux par pays incluent les fab de production.
² Les totaux par pays incluent les fab en construction ou prévues.
Na = non applicable.
Sources : Extraits de World Fab Watch Database, Janvier 2004, Edition for Semiconductor Manufacturing and Flat Panel Display Fabs on Disk Database (Strategic Marketing Associates, 2004a), Octobre 2004 Edition for TCM-FPD Manufacturing (Strategic Marketing Associates, 2004b).

Australie	0,135
Autriche	0,0307
Canada	0,0154
Danemark	0,00254
France	0,162
Allemagne	0,817
Italie	0,100
Japon	3,72
Norvège	0,0138
Portugal	0,115
Corée du Sud	0,462
Espagne	0,715
Suède	0,377
Suisse	0,00238
Royaume-Uni	0,0269
Etats-Unis	1,02
^a Capacités pour toutes les technologies de fabrication de PV, y compris celles qui n'utilisent pas forcément de FC dans la fabrication de PV ; Capacité d'utilisation moyenne en 2003 = 86% Source : IEA, 2004. Pays participant à l'enquête PV.	

6.2.4 Exhaustivité

Une comptabilisation complète des émissions issues de l'industrie des semi-conducteurs doit être réalisable dans de nombreux pays puisque le nombre d'entreprises et d'usines est limité. Il existe quatre problématiques liées à l'exhaustivité qui doivent être abordées :

- **Autres produits dérivés :** Un grand nombre de transformations en produits dérivés est généré suite à l'utilisation de FC pour le nettoyage de la chambre et la gravure. Comme souligné ci-dessus, la formation de CF₄ et de C₂F₆ peut être issue de la décomposition d'autres gaz FC. De la formation de CF₄ a été constatée pendant le nettoyage des chambres CVD avec faible k. Dans ce cas, la méthodologie de niveau 3 doit être utilisée pour estimer les émissions avec exactitude.
- **Nouveaux produits chimiques :** L'exhaustivité sera une problématique future puisque l'industrie évalue et adopte de nouveaux procédés chimiques afin d'améliorer ses produits. Les efforts de l'industrie au sens large pour réduire les émissions de FC sont également en train d'optimiser la révision des nouveaux produits chimiques. Par conséquent, pour cette industrie, les bonnes pratiques consistent à incorporer un mécanisme qui prend en compte les gaz à effet de serre non listés dans le troisième rapport d'évaluation du GIEC (par ex., le C₄F₆, le C₅F₈, FluorinertsTM et Galdens[®]). Ces nouveaux matériaux FC ont un PRG élevé ou peuvent produire des émissions de produits dérivés à PRG élevé.
- **Autres sources :** Une petite quantité de FC peut être relâchée pendant la manipulation du gaz (par ex., la distribution) et par des sources telles que la recherche et développement (par ex., l'université) à l'échelle des usines et des fournisseurs d'outils. Ces émissions ne sont pas censées être significatives (par ex., moins de 1 % des émissions totales de l'industrie).
- **Autres produits ou procédés :** L'utilisation de FC a été identifiée dans l'industrie électronique dans des applications émissives telles que : systèmes micro-électro-mécaniques (SMEM)¹⁸, fabrication de lecteur de disques durs, dispositif de test (FC liquides), soudure à refusion en phase vapeur¹⁹ et nettoyage de précision.²⁰

6.2.5 Développement d'une série temporelle cohérente

L'utilisation des FC dans l'industrie des semi-conducteurs a commencé à la fin des années 70 et a augmenté au début des années 90. La détermination d'une année de base en terme de niveau d'émissions peut présenter des difficultés puisque peu de données sont disponibles sur les émissions produites avant 1995. Si les estimations des émissions historiques étaient basées sur de simples suppositions (par ex., l'utilisation d'émissions équivalentes), alors ces estimations pourront être améliorées en appliquant les méthodes décrites précédemment. Si les données historiques qui permettent l'utilisation des méthodologies de niveau 2 ou 3 ne sont pas disponibles, alors la méthode de niveau 1 peut être utilisée rétrospectivement, en recourant aux paramètres d'émission par défaut. Les niveaux 2 et 3 peuvent ainsi être appliqués simultanément pour les années sur lesquelles plus de données sont disponibles afin de fournir une base de comparaison ou une référence. Cela devrait être fait en accord avec les recommandations fournies dans le chapitre 5 du volume 1.

Afin d'assurer un enregistrement cohérent des émissions à long terme, un compilateur d'inventaire doit recalculer les émissions de FC pour les années rapportées chaque fois que les procédures de calcul des émissions ont changé (par ex., si le compilateur d'inventaire passe de l'utilisation des valeurs par défaut à celle de valeurs réelles déterminées au niveau des usines). Si les données spécifiques aux usines ne sont pas disponibles pour toutes les années de la série temporelle, le compilateur d'inventaire devra déterminer la façon dont les données d'usines actuelles peuvent être utilisées pour recalculer les émissions des années précédentes. Il peut être envisagé d'appliquer des paramètres actuels d'émissions spécifiques à l'usine aux données de vente des années précédentes, pourvu que les opérations de ladite usine n'aient pas changé de manière significative. Ce nouveau calcul est nécessaire afin de s'assurer qu'un quelconque changement dans les tendances d'émissions est réel et non pas un artefact des changements dans la procédure.

6.3 ÉVALUATION DES INCERTITUDES

L'utilisation de la méthodologie de niveau 3 permet d'obtenir l'inventaire le moins incertain. En raison du nombre limité d'usines et le monitoring rapproché des procédés de production au niveau de l'usine, la collecte de données pour l'utilisation des méthodologies de niveaux 2 et 3 doit être techniquement réalisable. Les compilateurs d'inventaire doivent demander conseil à l'industrie en cas d'incertitude, en utilisant les approches pour obtenir une opinion d'expert détaillée dans le chapitre 3 du volume 1.

La méthodologie de niveau 1 est la moins incertaine de toutes les méthodes. Utiliser un facteur individuel pour rendre compte des émissions de FC issues de la diversité des produits semi-conducteurs est une simplification notable. Les facteurs présentés dans le Tableau 6.2 sont fortement pondérés vers la fabrication de produits avancés de logique et de mémoire de la fin des années 90, ayant 3 ou 5 couches respectives, fabriqués sur la couche de silicium. Les facteurs devraient être plus grands pour les pays qui fabriquent actuellement des produits à la pointe de la technologie (et qui n'utilisent pas de mesures pour réduire les émissions de FC), alors que les pays qui produisent des produits qui nécessitent des technologies plus anciennes ou des dispositifs plus simples de fabrication devront utiliser le même facteur, ou un plus petit.

Les facteurs d'émission de niveau 1 pour la fabrication de TCM-FPD représentent une moyenne pondérée des émissions agrégées estimées de PFC par unité de surface de substrat de verre consommé pendant la fabrication de TCM-FPD pour la région dans laquelle des données étaient disponibles (Burton, 2004). Les émissions estimées rapportées par le Japon ont utilisé les facteurs de niveau 2b pour la production de semi-conducteurs à partir des *Recommandations en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre* (GIEC, 2000) dans la production de semi-conducteurs (Nishida *et al*, 2004). Pour les émissions des fabricants de TCM-FPD de Taiwan, la méthode utilisée pour estimer les émissions n'a pas été rapportée (Leu *et al*, 2004). Cependant, par la suite, Leu (2004) a rapporté un facteur d'émission agrégé ayant une magnitude similaire à celle développée par Burton (2004b). L'incertitude du facteur d'émission de niveau 1 pour la fabrication de TCM-FPD est probablement grande, mais encore inconnue jusqu'à présent.

En utilisant la méthodologie de niveau 3 pour la fabrication de semi-conducteurs et de TCM-FPD, les estimations d'émissions qui en résultent sont plus exactes que celles obtenues avec les méthodologies de niveau 2a, 2b et 1 ; et ce, de l'ordre de $\pm 30\%$ (95 % d'intervalle de confiance). L'incertitude sur le rendement de la technologie de contrôle des émissions semble contribuer grandement à cette incertitude, spécialement la variabilité dans le temps de disponibilité des dispositifs de contrôle des émissions et dans les débits massiques aux dispositifs de contrôle des émissions qui peuvent excéder les limites conçues pour les dispositifs.

Les estimations d'émissions issues de l'utilisation des fluides de transfert de chaleur sont exactes de $\pm 20\%$ supplémentaires avec la méthodologie de niveau 2 qu'avec à la méthodologie de niveau 1 (95 % d'intervalle de confiance).

6.3.1 Incertitudes des facteurs d'émission

Les incertitudes des facteurs d'émission suggérées pour les méthodologies de niveau 2a et 2b sont détaillées dans le Tableau 6.9 pour la fabrication de semi-conducteurs et dans le Tableau 6.10 pour la fabrication de TCM-FPD. Les facteurs ont été développés spécifiquement pour ces lignes directrices. Pour le niveau 2b, des erreurs relatives à chaque entrée (procédé et gaz dans le cas du niveau 2b) ont été estimées comme la déviation standard des facteurs fournis par un groupe d'experts, normalisée à la moyenne simple (non pondérée) et arrondie à un chiffre significatif. L'estimation pour chaque valeur a été ensuite doublée pour estimer les 95 % d'intervalle de confiance. La même procédure a été utilisée pour estimer les erreurs relatives pour les facteurs formation-produit (B). Les estimations correspondantes pour la méthodologie de niveau 2a ont été dérivées des estimations de niveau 2b, en utilisant les estimations d'usage de gaz employé en développement des facteurs d'émission (voir section 6.2.2 niveau 2).

Les facteurs d'émission de niveau 1 auront une plage d'incertitude biaisée vers des valeurs proches de zéro s'étendant jusqu'à 200 % (intervalle de confiance de 95 % pour la fabrication de semi-conducteurs et de TCM-FPD). Les estimations d'incertitude pour la fabrication de PV ne sont pas disponibles.

6.3.2 Incertitudes des données sur l'activité

La consommation de gaz constitue l'unité d'activité pour estimer les émissions pendant la fabrication de semi-conducteurs, TCM-FPD et PV pour les méthodologies de niveaux 2a et 2b. La consommation de gaz peut être mesurée ou estimée à partir des données sur les achats de gaz, et nécessite la connaissance de h , le gaz inutilisé retourné aux fournisseurs dans les unités de transport. Les incertitudes (intervalle de confiance de 95 %) sur h et la consommation de gaz, mesurées ou estimées par recours à l'opinion d'experts, sont détaillées dans le Tableau 6.10, Estimations par défaut (intervalle de confiance de 95 %) des erreurs relatives (%) du facteur d'émission de niveau 2 pour les émissions de FC issues de la fabrication de semi-conducteurs et de TCM-FPD.

Pour la méthodologie de niveau 1, l'unité d'activité est la consommation de substrats. Les incertitudes des données sur les activités de niveau 1 sont attribuées principalement à des entrées de données manquantes dans les bases de données WFW et FPD. Une estimation de la fiabilité de ces entrées dérivée du WFW, indiquée dans le Tableau 6.7, est de ± 10 % (intervalle de confiance de 95 %) et reflète les erreurs dues aux entrées manquantes ou incorrectes dans la base de données. L'intervalle de confiance de 95 % pour la capacité d'utilisation sur la période 1991-2000 est de ± 12 points de pourcentage (c'est-à-dire de 70 % d'utilisation à 94 %). Les entrées correspondantes de la fabrication de TCM-FPD et PV sont supposées être similaires à celles de la fabrication de semi-conducteurs.

TABLEAU 6.9 ESTIMATIONS PAR DÉFAUT DES ERREURS RELATIVES (%) DU FACTEUR D'ÉMISSION DE NIVEAU 2 POUR LES ÉMISSIONS DE FC ISSUES DE LA FABRICATION DE SEMI-CONDUCTEURS, INTERVALLES DE CONFIANCE DE 95 %														
Gaz de transformation (i)	Gaz à effet de serre avec TRE PRG									Gaz à effet de serre sans TRE PRG			Non-GES produisant des produits dérivés FC :	
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	c-C ₄ F ₈	NF ₃ isolé	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₄ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Niveau 2a														
1-U_i	15	30	100	400	20	80	400	70	300	300	80 [†]	40	NA	NA
B_{CF4}	NA	90	300	200	60	100	200	200	NA	200	100 [†]	80	200	200
B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	200	NA	NA	NA	200	200	NA	NA	NA
B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	40	NA	NA
Niveau 2.b														
Gravure 1-U_i	60	100	100	700	NA	200	NA	300	300	300	200 [†]	NA	NA	NA
CVD 1-U_i	10	30	NA	NA	0.4	30	400	70	NA	NA	30 [†]	40	NA	NA
Gravure B_{CF4}	NA	200	300	200	NA	200	NA	NA	NA	200	200 [†]	NA	NA	NA
Gravure B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	200	NA	NA	NA	200	200 [†]	NA	NA	NA
Gravure B_{CF4}	NA	80	NA	NA	60	60	200	200	NA	NA	60 [†]	80	200	200
CVD B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	40	NA	NA
Remarques : NA signifie « non applicable » et ce, sur la base des informations actuellement disponibles. * Les valeurs qui excèdent 100% impliquent que la distribution qui est biaisée par s'étendant de 0 jusqu'à la valeur donnée. [†] L'estimation se base sur une analogie à c-C ₄ F ₈ puisque les données pour C ₅ F ₈ étaient insuffisantes pour estimer un intervalle de confiance.														

TABLEAU 6.10 ESTIMATIONS PAR DÉFAUT DES ERREURS RELATIVES (%) DU FACTEUR D'ÉMISSION DE NIVEAU 2 POUR LES ÉMISSIONS DE FC ISSUES DE LA FABRICATION DE LCD, INTERVALLES DE CONFIANCE DE 95 %														
Gaz de transformation (i)	Gaz à effet de serre avec TRE PRG									Gaz à effet de serre sans TRE PRG			Non-GES produisant des produits dérivés FC :	
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	c-C ₄ F ₈	NF ₃ isolé	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₅ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Niveau 2a														
1-U_i	50	NA	8	NA	NA	5	70	20	20	NA	NA	NA	NA	NA
B_{CF4}	NA	NA	30	NA	NA	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B_{CHF3}	NA	NA	NA	NA	NA	20	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B_{C2F6}	NA	NA	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Niveau 2b														
Gravure 1-U_i	50	100	8	NA	NA	5	NA	60	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD 1-U_i	NA	NA	NA	NA	NA	NA	70	20	6	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B_{CF4}	NA	NA	30	NA	NA	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B_{CHF3}	NA	NA	NA	NA	NA	20	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B_{C2F6}	NA	NA	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gravure B_{CF4}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Remarques : NA signifie « non applicable » et ce sur la base des informations actuellement disponibles														

6.4 ASSURANCE QUALITÉ / CONTRÔLE QUALITÉ, ÉTABLISSEMENT DE RAPPORTS ET DOCUMENTATION

6.4.1 Assurance qualité / contrôle qualité (AQ/CQ)

Les bonnes pratiques recommandent d'effectuer des vérifications du contrôle qualité comme souligné dans le chapitre 6 du volume 1 et une révision experte des estimations d'émissions. Des vérifications supplémentaires du contrôle qualité, comme souligné dans le volume 1, et des procédures d'assurance qualité peuvent aussi être applicables, en particulier si des méthodes de niveaux supérieurs sont utilisées pour déterminer les émissions à partir de cette catégorie source. Les compilateurs d'inventaires sont encouragés à utiliser une méthode d'AQ/CQ de niveau supérieur pour les *catégories clé*, comme présenté dans le Volume 1 du Chapitre 4.

Des recommandations générales supplémentaires pour des procédures AQ/CQ de niveau plus élevé sont également incluses dans le chapitre 6 du volume 1. A cause de la nature hautement compétitive de l'industrie des semi-conducteurs, des provisions pour la manipulation d'informations commerciales confidentielles doivent être incorporées dans le procédé de vérification. Les méthodes utilisées doivent être documentées et un audit périodique sur la mesure et le calcul des données doit être examiné attentivement. Un audit AQ des procédés et des procédures doit également être pris en considération.

6.4.2 Établissement de rapports et documentation

Il faut être attentif pour ne pas inclure les émissions de HFC utilisés comme substituts SAO avec ceux utilisés dans la fabrication de semi-conducteurs. Les bonnes pratiques recommandent de documenter et d'archiver toute l'information requise pour produire les estimations d'inventaire d'émissions nationales, comme souligné dans le volume 1 de la section 6.11. Il n'est guère commode d'inclure toute la documentation dans le rapport d'inventaire national. Cependant, l'inventaire devrait inclure des résumés des méthodes utilisées et des références à des données source de sorte que les estimations d'émissions rapportées soient transparentes et que les étapes de leur calcul puissent être retracées.

Un établissement de rapports explicite sur les émissions dans cette industrie devrait améliorer la transparence et la comparabilité des émissions. Puisqu'un certain nombre de gaz FC sont émis par cette industrie, l'établissement de rapports selon les espèces de gaz individuels plutôt que par type de produit chimique permettrait également d'augmenter la transparence et l'utilité de ces données. Les efforts menés pour augmenter la transparence doivent prendre en considération la protection des informations commerciales confidentielles liées à l'utilisation de gaz spécifiques. L'agrégation au niveau national des données sur les émissions de gaz spécifique doivent protéger cette information dans des pays ayant au moins trois fabricants. Le tableau 6.11, Informations nécessaires pour une pleine transparence des estimations des émissions issues de la fabrication de semi-conducteurs, montre l'information de support nécessaire pour assurer une transparence complète dans les estimations d'émissions rapportées.

En ce qui concerne le niveau 3, les bonnes pratiques recommandent de documenter le développement des facteurs d'émission spécifiques aux entreprises et d'expliquer l'écart avec les valeurs génériques par défaut. Pour des raisons de confidentialité, les compilateurs d'inventaires peuvent souhaiter rassembler cette information entre les fabricants. Lorsque les fabricants d'un pays ont rapporté des émissions ou des facteurs de conversion différents pour un FC donné et un procédé ou type de procédé, les compilateurs d'inventaires peuvent fournir la variété des facteurs rapportés et utilisés.

TABLEAU 6.1 INFORMATIONS NÉCESSAIRES POUR UNE PLEINE TRANSPARENCE DES ESTIMATIONS DES ÉMISSIONS ISSUES DE LA FABRICATION D'ÉLECTRONIQUES				
Données	Niveau 1	Niveau 2a	Niveau 2b	Niveau 3
Surface totale de substrats électroniques traités (par exemple, m ² silicium, m ² verre)	X			
Capacité d'utilisation pour la fabrication de semi-conducteurs, TCM-FPD et PV	X			
Fraction de la capacité de fabrication de PV qui utilise des gaz FC	X			
Émissions de chaque FC (plutôt qu'agrégée pour tous les FC)		X	X	X
Ventes/achats de chaque FC		X		
Masse de chaque FC utilisée dans chaque procédé ou type de procédé			X	X
Fraction de chaque FC utilisée dans des procédés avec technologies de contrôle des émissions		X	X	X
Taux d'utilisation pour chaque FC et chaque procédé ou type de procédé (cette information, comme les suivantes, est nécessaire seulement si la valeur par défaut n'est pas utilisée)				X
Fraction de chaque FC transformée en CF ₄ pour chaque procédé ou type de procédé				X
Fraction de gaz restant dans l'unité de transport				X
Fraction de chaque FC détruite par la technologie de contrôle des émissions				X
Fraction de produit dérivé de CF ₄ détruite par la technologie de contrôle des émissions				X

Références

- Agnostinelli, G., Dekkers, H. F. W., DeWolf, S. and Beaucarne, G. (2004). “Dry Etching and Texturing Processes for Crystalline Silicon Solar Cells: Sustainability for Mass Production”, presented at the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 2004.
- Alsema, E. A., Bauman, A. E., Hill, R. and Patterson, M. H. (1997) “Health, Safety and Environmental Issues in Thin Film Manufacturing”, 14th European PV Solar Energy Conference, Barcelona, Spain. 1997.
- Burton, C. S. (2004a). “Uses and Air Emissions of Liquid PFC Heat Transfer Fluids from the Electronics Sector: Initial Findings”, report prepared for U. S. EPA’s Climate Change Division, October 2004.
- Burton, C. S. (2004b). “PFC Uses, Emissions, and Trends in FPD Manufacture: An Update”, draft report prepared for U. S. EPA’s Climate Change Division, June 2004.
- Burton, C. S. (2006). “Sources and Methods Used to Develop PFC Emission Factors from the Electronics Sector”, report prepared for U. S. EPA’s Climate Change Division, February 2006.
- Cowles, D. (1999) “Oxide Etch Tool Emissions Comparison for C5F8 and C4F8 Process Recipes”, presented at A Partnership for PFC Emissions Reductions, SEMICON Southwest 99, Austin, TX. October 1999.
- Fthenakis, V. (2005) Personal communication to S. Bartos on 5 February 2005 of data tables quantifying historical and current CF₄ and C₂F₆ usage in PV manufacture for U. S. and Europe.
- Fthenakis, V. (2006) Personal communication to S. Burton and S. Bartos explaining proposal to begin monitoring FC emissions from European PV industry. Feb. 6, 2006.
- IEA (2004). ‘Trends in Photovoltaic Applications: Survey report of selected IEA Countries between 1992 – 2003’, Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS), International Energy Agency, Report IEA-PVPS T1-13:2004, September 2004.
- IPCC (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Emmanuel S., Buendia L., Hoppaus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K., Tanabe K. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan.
- ITRS (2004), “International Technology Roadmap for Semiconductors” available at <http://public.itrs.net/report.htm>
- Kim, D-H., (2006) 9 January 2006 Personal communication to Hideki Nishida identifying the historical average (50:50) proportion of SF₆ usage for etching and CVD chamber-cleaning in Japanese, Korean and Taiwan TFT-FPD manufacture.
- Leu, C-H., (2004) “SF₆ Abatement Strategy in Taiwan”, presented at SF₆ Power Reduction Partnership for Electric Power Systems, Scottsdale, Az., 1-3 December 2004.
- Leu, C-H *et al.* (2004) “PFC emissions Abatement for TFT-LCD Industry in Taiwan”, available in the Proceedings of the 15th Annual Earth Technology Forum, Washington, D. C., 13-15 April 2004.
- Maycock, P. (2005) “PV market update: global PV production continues to increase”, Renewable Energy World, Vol. 8 (4), pp 86-99.
- Meyers, J., Maroulis, P., Reagan, B. and Green, D. (2001). “Guidelines for Environmental Characterization of Semiconductor Equipment”, Technology Transfer #01104197A-XFR, pub. International SEMATECH, Austin, Texas, USA. December 2004, See: www.sematech.org/docubase/document/4197axfr.pdf.
- Nishida, H. *et al.* (2004) “Voluntary PFC Emission Reduction in the LCD Industry”, available in the Proceedings of the 15th Annual Earth Technology Forum, Washington, D. C., 13 – 15 April 2004.
- Nishida, H., Marsumura, K., Kurokawa, H., Hoshino, A. and Masui, S. (2005), “PFC emission-reduction strategy for the LCD industry”, J. Society for Information Display, Vol 13, pp. 841-848 (2005).
- Nishida, H. (2006). 7 January 2006 Personal communication to D-H. Kim confirming historical average 50:50 proportion of SF₆ usage for etching and CVD chamber-cleaning in Japan, Korean and Taiwan TFT-FPD manufacture.
- Phylipsen, G. J. M. and Alsema, E. A., (1995) “Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules”, report prepared for Netherlands Agency for Energy and the Environment, Report No. 95057, September 1995.

- Rentsch, J., Schetter C., Schlemm H., Roth, K. and Preu, R. (2005). "Industrialization of Dry Phosphorous Silicate Glass Etching and Edge Isolation for Crystalline Silicon Solar Cells", Presented at the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona, Spain. 6-10 June, 2005.
- Sekiya, A. (2003). "Climate-Friendly Alternative Refrigerant and the Others: New Evaluations for sustainability", The Earth Technologies Forum, Washington, D. C., 23 April, 2003.
- Shah, A., Meier, J., Buechel, A., Kroll, U., Steinhauser, J., Meillaud, F. and Schade, H. (2004). "Toward Very Low-Cost Mass Production of Thin-film silicon Photovoltaic (PV) Solar Modules on Glass", presented at ICCG5 Conference in Saarbrücken, Germany, July 2004.
- SIA (2000). "Equipment Environmental Characterisation Guidelines", Revision 3.0, Semiconductor Industry Association (SIA), San Jose, California, USA, February 2000
- Strategic Marketing Associates (2004a). WORLD FAB WATCH: The Industry's Encyclopedia of Wafer Fabs Since 1994, January 2004 Edition.
- Strategic Marketing Associates (2004b). WORLD FAB WATCH: The Industry's Encyclopedia of Wafer Fabs Since 1994, October 2004 Edition.
- Tuma, P.E. and Tousignant, L. (2001). "Reducing Emissions of PFC Heat Transfer Fluids," Presented at Semicon West, San Francisco, July 2001.
- U.S. EPA (2005). U.S. Environmental Protection Agency, Inventory of U.S. Greenhouse Gas and Sinks: 1990-2003, EPA 430-R-05-003, April 2005.