

Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires pour la fabrication de semi-conducteurs et autres articles électroniques

Introduction

Les Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires (Directives EHS) sont des documents de références techniques qui présentent des exemples de bonnes pratiques internationales¹, de portée générale ou concernant une branche d'activité particulière. Lorsqu'un ou plusieurs États membres participent à un projet du Groupe de la Banque mondiale, les Directives EHS doivent être suivies conformément aux politiques et normes de ces pays. Les Directives EHS établies pour les différentes branches d'activité sont conçues pour être utilisées conjointement avec les **Directives EHS générales**, qui présentent des principes directeurs environnementaux, sanitaires et sécuritaires applicables dans tous les domaines. Les projets complexes peuvent exiger l'application de plusieurs directives couvrant des branches d'activité différentes. La liste complète de ces directives figure à l'adresse suivante :

<http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>

Les Directives EHS indiquent les mesures et les niveaux de performances qui sont généralement considérés réalisables dans de nouvelles installations avec les technologies existantes à un coût raisonnable. L'application des Directives EHS dans

¹ C'est-à-dire les pratiques que l'on peut raisonnablement attendre de professionnels qualifiés et chevronnés faisant preuve de compétence professionnelle, de diligence, de prudence et de prévoyance dans le cadre de la poursuite d'activités du même type dans des circonstances identiques ou similaires partout dans le monde. Les circonstances que des professionnels qualifiés et chevronnés peuvent rencontrer lorsqu'ils évaluent toute la gamme des techniques de prévention de la pollution et de dépollution applicables dans le cadre d'un projet peuvent inclure, sans toutefois s'y limiter, divers degrés de dégradation environnementale et de capacité d'assimilation de l'environnement ainsi que différents niveaux de faisabilité financière et technique.

définition d'objectifs particuliers à chaque site et l'établissement d'un calendrier adapté pour leur réalisation.

Le champ d'application des directives ehs doit être fonction des aléas et des risques identifiés pour chaque projet sur la base des résultats d'une évaluation environnementale prenant en compte des éléments distinctifs du projet, comme les conditions en vigueur dans le pays dans lequel le projet est réalisé, la capacité d'assimilation de l'environnement, et d'autres facteurs propres au projet. Le champ d'application de recommandations techniques particulières doit être établi sur la base de l'opinion professionnelle de personnes ayant les qualifications et l'expérience nécessaires.

Lorsque les mesures et niveaux stipulés dans les réglementations du pays d'accueil diffèrent de ceux indiqués dans les directives ehs, ce sont les mesures et les normes les plus rigoureuses qui doivent être retenues pour les projets menés dans ce pays. Lorsque des mesures ou des niveaux moins contraignants que ceux des directives ehs peuvent être retenus aux fins d'un projet pour des raisons particulières, une justification détaillée des mesures et des niveaux proposés doit être présentée dans le cadre de l'évaluation environnementale du site considéré. Cette justification devra montrer que les niveaux de performance proposés permettent de protéger la santé de la population humaine et l'environnement.

Champ d'application

Les Directives EHS pour la fabrication de semi-conducteurs et autres articles électroniques fournissent des renseignements

utiles pour les projets et les installations de production de semi-conducteurs et autres articles électroniques. Elles ne donnent aucune information sur l'extraction des matières premières, l'assemblage des composants en général, la fabrication des masques de dépôt des composants internes sur le support plastique ou la production des connecteurs habituels. L'annexe A présente une description complète de la branche d'activités concernée. Ce document se compose des sections ci-après :

Section 1.0 — Description et gestion des impacts propres aux activités considérées
Section 2.0 — Indicateurs de performance et suivi des résultats
Section 3.0 — Bibliographie
Annexe A — Description générale des activités

1.0 Description et gestion des impacts propres aux activités considérées

Cette section résume les questions d'ordre environnemental, sanitaire et sécuritaire liées à la fabrication de semi-conducteurs et autres articles électroniques qui peuvent se poser au cours de la phase d'exploitation et présente des recommandations sur la manière de les gérer. Les recommandations relatives à la gestion des questions communes à la plupart des projets de grande envergure aux cours de leurs phases de construction et de fermeture figurent dans les Directives EHS générales.

1.1 Environnement

Les questions environnementales liées aux projets relatifs à la fabrication de semi-conducteurs et autres articles électroniques portent principalement sur les aspects suivants :

- Utilisation de matériaux dangereux et gestion des déchets
- Emissions atmosphériques
- Eaux usées
- Consommation d'énergie
- Modifications des processus généraux

Matériaux et déchets dangereux

La grande majorité des processus de fabrication des semi-conducteurs et autres articles électroniques génèrent des déchets dangereux ou potentiellement dangereux, comme par exemple de l'eau usée désionisée (contenant de l'acide inorganique), des solvants et des révélateurs usés (par exemple, des hydrocarbures isoparaffiniques), des solutions de nettoyage usées, des boues résultant du traitement des eaux usées, de l'époxy usé (fabrication de circuits imprimés et de semi-conducteurs), des solutions usées de cyanure (galvanoplastie), et des fondants et des résidus métalliques de soudure (assemblage des circuits imprimés).

Outre les mesures concernant la gestion des matériaux dangereux indiquées dans les **Directives EHS générales**, il existe aussi des techniques spécifiques de prévention de la pollution, dont les modifications de procédures et procédures de substitution suivantes :²

- Modification du processus ou du matériel, comme par exemple :³
 - régénération des bains de galvanoplastie par filtration au charbon actif pour éliminer les impuretés organiques accumulées, ce qui diminue la quantité de bains de galvanoplastie à rejeter et réduit le besoin de produits chimiques neufs
 - adoption d'armoires de gaz automatiques pour contrôler les fuites de gaz des bouteilles, notamment pendant le remplacement des bouteilles

²L'utilisation de plomb, de mercure, de cadmium, de chrome (CR VI), de diphényle polybromé, et d'éthers de diphényle polybromé devrait être limitée ou progressivement éliminée conformément aux directives européennes (2003a and 2003b). L'utilisation des chlorofluorocarbones et du trichloroéthylène est supprimée. Il est envisagé de limiter l'utilisation des sulfonates de perfluorooctane en amendant la directive 76/769/CEE du Conseil de l'UE (COM/2005/0618 final - COD 2005/0244). Le Conseil mondial des semi-conducteurs et l'association Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI) ont adopté des mesures volontaires de restriction concernant l'utilisation et les rejets de sulfonates de perfluorooctane.

³ On trouve en Annexe A de plus amples informations.

- utilisation de substituts à la soudure de plomb, comme les alliages d'étain et autres soudures sans plomb

Remplacement ou élimination de matières premières, par exemple remplacement des solutions de galvanoplastie au cyanure (pour la galvanoplastie de l'or dans l'industrie des circuits imprimés) par du sulfate de cuivre et de l'acide sulfurique, du sulfite d'or et du nickel auto-catalytique, remplacement des bains de galvanoplastie de Cr VI par des bains de Cr III (fabrication de circuits imprimés, bien que l'utilisation de bains de galvanoplastie au chrome soit obsolète)

- Ségrégation, séparation et traitement de substances dangereuses, — par exemple, la séparation des boues résiduelles de traitement des eaux usées par particules métalliques améliore la récupération des déchets ; le stockage des produits chimiques issus de la galvanoplastie permet de séparer les substances incompatibles, comme par exemple séparer les cyanures des acides et les agents oxydants des combustibles
- Récupération et recyclage des métaux, tout d'abord dans le secteur des semi-conducteurs et des circuits imprimés – par exemple, récupération du cuivre et des métaux précieux par procédé électrolytique ; enlèvement et récupération du cuivre et de l'étain des circuits imprimés par précipitation électrolytique-chimique ; récupération de l'arsenic et du gallium dans les déchets de traitement de l'arséniure de gallium (GaAs) (par séparation thermique des déchets solides de GaAs et récupération des déchets de polissage GaAs)
- Diminution des rejets de sulfonates de perfluorooctane (PFOS) provenant de la fabrication des semi-conducteurs en éliminant progressivement l'utilisation non indispensable de substances à base de sulfonates de perfluorooctane, comme certaines solutions de gravure pour lesquelles il existe des produits de substitution. Pour les utilisations de sulfonates de perfluorooctane où l'on ne dispose d'aucune autre alternative comme les technologies à longueur

d'onde plus courte utilisées dans la fabrication des semi-conducteurs, le rejet des déchets doit être particulièrement contrôlé, notamment en cas d'incinération.⁴

La gestion des matériaux dangereux est traitée dans les **Directives EHS générales**. Parmi les mesures spécifiques préconisées pour ce secteur, figurent notamment les suivantes :

- Il faut régulièrement vérifier les zones de stockage des produits chimiques utilisés dans les procédés, afin de repérer les fuites éventuelles
- Les tuyauteries souterraines doivent être doubles et comporter un dispositif de détection des fuites de la tuyauterie intérieure
- Les tuyauteries transportant des matières dangereuses doivent être en matériaux compatibles avec ces matières et avoir des supports suffisants ; elles doivent être clairement étiquetées et comporter des joints de grande qualité ; elles doivent également inclure des purges en point bas, des événements en partie haute et des robinets d'isolation au maximum tous les 30 mètres
- Il faut utiliser des récipients de récupération des effluents.

La gestion des déchets solides et dangereux est traitée dans les **Directives EHS générales**. Il s'agit de tous les déchets présentant un danger (dont notamment les eaux usées désionisées, les solvants usés, les solutions de nettoyage usées, les boues issues du traitement des eaux usées, l'époxy usé et les solutions de cyanure usées). Ces déchets doivent être clairement étiquetés et stockés séparément des autres déchets en général. Ils doivent être stockés dans des zones

⁴ Le sulfonate de perfluorooctane figure sur la liste des substances chimiques ayant des propriétés toxiques, persistantes et bio-accumulatives. Il est donc question de l'inclure dans la liste des polluants organiques persistants (POP) de la Convention de Stockholm. Comme nous l'avons dit plus haut, le Conseil mondial des semi-conducteurs et l'association Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI) ont adopté des mesures mondiales concernant l'élimination (sauf nécessité absolue) de tous les émissions (hors eaux usées) contenant des sulfonates de perfluorooctane (SPFO) et l'obligation de les incinérer. On peut trouver ces mesures sur le site http://www.sia-online.org/pre_stat.cfm?ID=294

spéciales et fermées, à l'épreuve des produits chimiques. Le stockage dans une enceinte sûre est essentiel, en raison de la forte réactivité et de la forte toxicité des déchets et des sous-produits industriels. Nous traitons aussi de ce sujet dans la section suivante sur la santé et la sécurité au travail.

Rejets atmosphériques

Les principaux rejets qui posent problème dans la fabrication des semi-conducteurs et des articles électroniques sont notamment les gaz à effet de serre, les substances toxiques, réactives et corrosives [comme par exemple les vapeurs acides, les agents dopants, les gaz de nettoyage et les composés organiques volatils (COV)] issus des processus de diffusion, de nettoyage et de gravure par voie humide.⁵

Il existe trois systèmes de réduction des gaz toxiques et dangereux :

- les systèmes au point d'utilisation, qui sont de taille relativement réduite et ne concernent généralement qu'un seul élément d'un procédé ; ces systèmes peuvent éliminer jusqu'à 99,99 % des effluents gazeux. Un épurateur au point d'utilisation, par exemple, peut éliminer l'arsine pour n'en laisser que moins de 50 parties par milliard. Six technologies de base permettent de réduire au point d'utilisation les gaz et les particules polluants, y compris les composés d'hydrocarbures perfluorés :
 - épuration par voie humide dans la fabrication des semi-conducteurs, mais cette technologie a des applications limitées. On utilise aussi des épurateurs par voie humide pour traiter des gaz acides et les sous-produits des traitements par combustion/oxydation

- évaporation dans les processus chimiques de fabrication des semi-conducteurs
- combustion/oxydation par brûleurs à fuel ou chambres chauffées électriquement, souvent en conjugaison avec des épurateurs par voie humide (fabrication de semi-conducteurs et de circuits imprimés)
- réacteurs à plasma pour la fabrication des semi-conducteurs, bien qu'ils n'aient que des applications limitées et qu'il faille installer en aval d'autres unités de réduction des rejets de gaz toxiques
- adsorbants de froid dans l'industrie des circuits imprimés
- collecteurs, filtres, séparateurs à cyclone et appareils de précipitation dans l'industrie des circuits imprimés, pour éliminer les solides et les vapeurs de condensation des effluents
- les systèmes « maison », relativement plus importants que les systèmes au point d'utilisation, placés hors du local de fabrication proprement dit (ateliers de fabrication des semi-conducteurs, par exemple) ; ces systèmes peuvent traiter des débits importants d'effluents venant de nombreuses sources différentes
- les épurateurs de rejets de gaz en urgence, adaptés au traitement de rejets importants et soudains de gaz toxiques ; ces épurateurs sont habituellement utilisés dans la ventilation de sortie des zones de stockage de bouteilles de gaz. Les épurateurs pour rejets en urgence ont pour objectif d'empêcher les rejets incontrôlés. Toutefois, on peut contrôler la majorité des gaz toxiques grâce à des armoires spéciales nettoyées ou éventées à l'atmosphère après vérification très soignée de la concentration en gaz pour s'assurer que les gaz sont rejetés en toute sécurité, sans conséquences sur la santé et l'environnement.

⁵ L'Agence américaine de protection de l'environnement a identifié environ 30 polluants dangereux de l'air rejetés par la fabrication des semi-conducteurs, mais on estime que plus de 90 % de tous les rejets sont dus à l'acide chlorhydrique, à l'acide fluorhydrique, aux éthers de propylène glycol et leurs acétates, méthanol et xylènes.

Composés d'hydrocarbures perfluorés et autres gaz à effet de serre

Les composés d'hydrocarbures perfluorés — y compris le CF_4 , le C_2F_6 et le C_3F_8 — le trifluorure d'azote (NF_3), le HFC-23 (CHF_3), et l'hexafluorure de soufre (SF_6) sont utilisés dans la fabrication des semi-conducteurs, en tant que gaz de nettoyage dans les systèmes de dépôt chimique en phase vapeur, dans la gravure plasma et, avant tout, dans la fabrication des écrans de type cristaux liquides à transistors en couche mince. Les principaux problèmes environnementaux des composés d'hydrocarbures perfluorés sont dus à leur effet élevé de réchauffement lié à leur longue vie atmosphérique.⁶

Parmi les techniques de réduction et de contrôle des rejets de composés d'hydrocarbures perfluorés, on peut citer :⁷

- l'optimisation des processus, particulièrement en matière de nettoyage des dépôts chimiques en phase vapeur
- le remplacement de produits chimiques par d'autres, par exemple en utilisant le $C-C_4F_8$ ou le NF_3 comme gaz de nettoyage de substitution dans la chambre de réaction au lieu du C_2F_6 dans une chambre modifiée, ce qui réduit au minimum les rejets à l'atmosphère
- la réduction des rejets par dissociation des molécules en sous-produits qui ne sont pas des composés d'hydrocarbures perfluorés, par des systèmes de combustion, de décomposition catalytique ou de destruction de plasma (cette dernière n'est applicable qu'aux seuls outils de gravure de 200 mm au maximum).
On peut appliquer les technologies de destruction thermique au nettoyage des chambres de réaction et aux

⁶ En mai 2005, les membres du Conseil mondial des semi-conducteurs sont convenus de réduire les rejets d'hydrocarbures perfluorés d'au moins 10 % d'ici 2010 par rapport au niveau de référence (1995 pour les associations européennes, américaines et japonaises, 1997 pour l'association coréenne et 1998 pour Taiwan).

⁷ Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat – GIEC (2000) offre des informations supplémentaires sur la réduction des rejets de carbone par diverses technologies de contrôle.

processus de gravure dans un atelier (application dans un système au point d'utilisation) ou dans l'ensemble d'un atelier (applications en bout de tuyauterie)

- récupération dans les effluents des composés d'hydrocarbures perfluorés et réutilisation de ces effluents. Ce processus est toutefois techniquement difficile et coûteux
- Des renseignements supplémentaires sur le traitement des gaz à effet de serre figurent dans les **Directives EHS générales**.

Vapeurs acides

Les rejets de vapeurs acides (pour l'essentiel, de l'acide chlorhydrique et de l'acide hydrofluorique) sont dus aux processus ci-après de fabrication de semi-conducteurs et de circuits imprimés :

- nettoyage, gravure et enlèvement des couches résistives dans la fabrication des semi-conducteurs
- gravure, opération pendant laquelle il peut y avoir des rejets de vapeurs de chlorure d'hydrogène
- nettoyage, préparation des surfaces, gravure au chlorure cuivrique et galvanoplastie pour la fabrication des circuits imprimés.

Les rejets d'aérosols d'acide sulfurique sont aussi associés au traitement des tranches de silicium par solutions de gravure à l'acide. Les solutions les plus couramment employées contiennent de l'acide sulfurique et du peroxyde d'hydrogène.

On diminue les rejets de vapeurs acides en installant des épurateurs par voie humide horizontaux à courant transversal ou des épurateurs par voie humide verticaux à contre-courant. Les mesures de prévention de la pollution sont notamment les suivantes :

- utilisation de dispositifs d'élimination des buées à la surface des solutions pour bains et d'agents mouillants (agents tensio-actifs)
- retraitement de l'acide sulfurique utilisé dans la fabrication des tranches par chauffage et distillation pour purifier l'effluent acide, récupéré et renvoyé par pompage dans des stations humides
- installation de couvercles sur les bains de galvanoplastie et de dispositifs d'élimination des buées avec grille.

Composés organiques volatils

Les composés organiques volatils sont avant tout utilisés dans la fabrication des semi-conducteurs et des circuits imprimés. La plupart des processus de nettoyage et de photolithographie rejettent des composés organiques volatils au cours des phases de séchage des couches résistives, d'application des agents révélateurs et d'élimination des couches résistives. Les rejets de composés organiques volatils sont habituellement adsorbés sur des systèmes à charbon actif pour en faciliter la récupération et/ou traités par oxydants thermiques. Les techniques de contrôle de la pollution ou les dispositifs complémentaires de contrôle des rejets sont les suivants :

- oxydants thermiques de régénération, dont l'utilisation est généralement intéressante lorsque le débit volumétrique des effluents gazeux issus des processus de fabrication est supérieur à environ 3000 pieds cubes/minute
- concentrateurs rotor à zéolithe avec oxydants thermiques de récupération, utilisés pour concentrer les effluents des composés organiques volatils dilués avant de les envoyer vers une unité de destruction ou de récupération
- adsorption sur charbon à lit fixe par extraction vapeur pour récupérer les composés organiques volatils (aux fins de réutilisation ou de recyclage hors site)

- adsorption sur charbon à lit fluidifié avec désorption à l'azote chaud et récupération des composés organiques volatils (aux fins de réutilisation ou de recyclage hors site)
- adsorption sur lit fluidisé de polymères avec régénération à l'azote chaud et récupération des composés organiques volatils si cela est pratique, ou par oxydants thermiques de récupération.

Oxydes d'azote

Comme dans d'autres secteurs d'activité, les rejets de NO_x issus de la fabrication des semi-conducteurs comportent des sous-produits des processus de combustion. Ces sous-produits proviennent des chaudières de chauffage, des générateurs d'électricité de secours et des oxydants thermiques qui réduisent les rejets de composés organiques volatils. Les **Directives EHS générales** décrivent les technologies concernées de prévention et de contrôle des rejets.

Poussière

Les opérations de fraisage et de routage lors de la fabrication des circuits imprimés rejettent des quantités assez importantes de poussières, alors que les activités de fabrication des semi-conducteurs et d'assemblage des circuits imprimés n'en rejettent que peu. Le découpage laser, l'ébarbage, le polissage mécanique/chimique et les finitions de surface sont des opérations de fabrication des semi-conducteurs qui émettent une quantité limitée de poussières, de même que la fabrication de dispositifs magnétiques et de composants passifs. Parmi les systèmes de contrôle des poussières, on peut citer :

- les systèmes de sédimentation dans l'eau
- la réduction des rejets de poussières par sacs filtrants ou appareils électrostatiques de précipitation

Consommation d'énergie

En raison du nombre important de processus thermiques et du traitement hautement mécanisé des tranches de silicium, la fabrication des semi-conducteurs est coûteuse en énergie, ce qui exige une optimisation de la consommation d'énergie. Il faut donc utiliser un matériel spécial permettant une meilleure efficacité en termes de performance et d'énergie. Il peut s'agir :

- d'un matériel de traitement de l'air contrôlant l'humidité et la température, permettant d'économiser jusqu'à 25 % d'énergie
- de refroidisseurs à haut rendement
- ou encore de récupérer la chaleur de condenseurs à eau par échangeurs de chaleur, ce qui permet aux installations industrielles modernes d'économiser jusqu'à 40 % de leurs besoins en énergie.

Les technologies de pointe pour la réduction des rejets font appel à un nouveau matériel d'un rendement meilleur du point de vue de la réduction des rejets et plus économe en énergie.

Eaux usées

Eaux usées industrielles

Les eaux usées peuvent contenir des composés organiques et inorganiques, comme des métaux, des acides et des alkalis, des cyanures et des solides en suspension. Pour réduire le plus possible l'utilisation de l'eau et les effets potentiels des rejets, l'eau de rinçage doit être récupérée et l'eau traitée doit être renvoyée dans le processus de traitement pour y être réutilisée.

Les eaux usées issues du traitement des eaux industrielles peuvent notamment contenir des composés organiques, et particulièrement des solvants non chlorés (par exemple, des solvants à base de pyrrole, à base d'amine, des couches résistives fluor ou éther, de l'alcool isopropylique, et de l'hydroxyde de tétraméthylammonium) provenant de certaines

étapes de la fabrication des semi-conducteurs et de l'assemblage des circuits imprimés, y compris le nettoyage, le séchage des couches résistives, l'application de l'agent révélateur et l'élimination des couches résistives, des métaux issus de la métallisation et du polissage mécano-chimique, des acides et des alkalis provenant des solutions de nettoyage usées, des processus comme la gravure, le nettoyage et la métallisation notamment, les cyanures provenant de la métallisation et les solides en suspension provenant des résidus sous forme de pellicules et des particules métalliques (issus de la photolithographie, de la métallisation, des finitions de surfaces et de la découpe des tranches de silicium en puces).

Traitement des eaux usées industrielles

La fabrication de semi-conducteurs et autres articles électroniques faisant appel à un large éventail de matières premières, substances chimiques et procédés, les méthodes de traitement des eaux usées peuvent nécessiter le recours à des opérations qui dépendent du procédé de fabrication utilisé et du contaminant. Parmi les différentes méthodes de traitement des eaux industrielles dans cette branche d'activité, on peut citer :

- i) le confinement des sources d'eaux usées et le prétraitement des eaux ayant de fortes concentrations de composés non biodégradables par des procédés de séparation en phases, notamment des procédés de récupération des solvants, de stripage à l'air, d'oxydation chimique et d'adsorption, etc..ii) la réduction des métaux lourds par des procédés de précipitation chimique, de coagulation et de floculation, de récupération par voie électrochimique, d'échange d'ions ; iii) l'oxydation chimique des cyanures, et iv) la déshumidification et l'élimination des résidus dans des décharges destinées spécifiquement aux déchets dangereux. Des mesures de contrôle d'ingénierie supplémentaires peuvent s'avérer nécessaires pour : i) utiliser des systèmes de pointe d'enlèvement des métaux par des processus de filtration sur membrane, ou d'autres technologies

de traitement physiques/chimiques ; ii) éliminer les composés organiques récalcitrants et d produits organiques halogénés à l'aide de charbon actif ou par oxydation chimique avancée ; iii) réduire la toxicité des effluents à l'aide de technologies adaptées (osmose inversée, échange d'ions, charbon actif, etc.) ; iii) contenir et neutraliser les nuisances olfactives ; et iv) contenir et traiter les composés organiques volatils récupérés après traitement des eaux usées issues des opérations industrielles.

La gestion des eaux usées industrielles et les différentes méthodes de traitement envisageables sont décrites dans les directives ehs générales. grâce à l'utilisation de ces techniques et à l'application de bonnes pratiques de gestion des eaux usées, les unités de fabrication devraient satisfaire aux critères définis par les valeurs de référence indiquées au tableau correspondant de la section 2 du présent document pour cette branche d'activité.

Autres eaux usées et consommation d'eau

Les directives sur la gestion des eaux usées non contaminées provenant des équipements sanitaires, des eaux de pluies non contaminées, et des eaux d'égout sont présentées dans les directives ehs générales. Les écoulements d'eau contaminée doivent être acheminés de manière à passer par le système de traitement des eaux usées industrielles. Des recommandations pour réduire la consommation d'eau, en particulier dans les sites où les ressources naturelles en eau sont limitées, sont fournies dans les **Directives EHS Générales**.

Fabrication des circuits imprimés

Plusieurs mesures anti-pollution ont été mises au point pour la fabrication des circuits imprimés décrite en annexe A. On peut notamment citer les modifications de procédé suivantes qui ont donné des effets positifs au niveau de l'environnement :

- *Fabrication des cartes* : technologie des composants montés en surface au lieu de la galvanoplastie à trous, substrat moulé par injection, galvanoplastie selon la méthode additive
- *Nettoyage et préparation de surface* : utilisation d'agents nettoyants non complexants, durée de vie du bain prolongée, efficacité améliorée du rinçage, nettoyage à contre-courant, recyclage/réutilisation des agents de nettoyage et de rinçage
- *Impression et masquage de la configuration du circuit* : couche résistive en solution aqueuse, sérigraphie remplaçant la photolithographie, impression à jet d'encre, couche photorésistante à sec, décapage de la couche photorésistante pour recyclage/réutilisation, séparation des flux, récupération de métaux
- *Galvanoplastie et déposition par procédé chimique* : remplacement par cartes fabriquées selon un procédé mécanique, bains sans cyanure, durée de vie du bain prolongée, recyclage/réutilisation des agents de nettoyage et de rinçage, efficacité améliorée du rinçage, rinçage à contre-courant, séparation des flux, récupération de métaux
- *Gravure* : déposition différentielle, agents de gravure non complexants et sans chrome, méthode semi-additive (« pattern plating ») contre méthode soustractive (« panel plating »), agents de gravure recyclables/réutilisables
- la récupération des métaux par extraction électrolytique régénérative et échange d'ions permet de réduire quasiment à zéro les rejets des effluents métallifères séparés. Les métaux lourds sont récupérés sous forme de feuilles de métal qui éliminent 95 % des boues à évacuer. Les boues métallifères qui ne sont pas traitées en vue de la récupération des métaux doivent être mises dans des décharges sécurisées.

1.2 Hygiène et sécurité au travail

Les risques relatifs à l'hygiène et à la sécurité du travail qui se posent dans le cadre de la fabrication de semi-conducteurs et autres articles électroniques sont notamment les suivants :

- exposition aux rejets de matériaux provenant des substrats, lors de la manipulation manuelle ou mécanique ;
- exposition aux produits chimiques de traitement dangereux, dont les poudres métalliques ;
- risques corporels et exposition aux dangers énergétiques (cinétiques, électriques, pneumatiques et hydrauliques) ;
- exposition aux rayonnements et lasers ionisants et non ionisants.

Substrats

La fabrication des substrats de semi-conducteurs à base de silicium (dioxyde de silicium) dégage des poussières non toxiques, mais leur utilisation peut être dangereuse. Les substrats en arséniure de gallium et en phosphure d'indium présentent des dangers sanitaires et physiques plus sérieux. L'inhalation de particules est le mode d'exposition le plus courant à l'arséniure de gallium et au phosphure d'indium. En raison de la forte toxicité de l'arsenic et de l'indium, les normes d'hygiène et de sécurité au travail exigent une faible exposition à ces produits. Le phosphure d'indium est inflammable et susceptible de réagir avec la vapeur d'eau et les acides pour former la phosphine, un gaz toxique et inflammable. L'arséniure de gallium est dangereux s'il est poncé, coupé ou poli.

La prévention et le contrôle de ces risques exigent des contrôles techniques et administratifs pour assurer la sécurité des travailleurs. On adopte généralement les précautions suivantes :

- extraction locale des résidus de meulage ou rodage par voie humide ; ces opérations doivent absolument être effectuées par voie humide et les résidus doivent être

soigneusement rincés. Il faut éviter le meulage ou le rodage à sec de l'arséniure de gallium.

- tous les processus concernant ces substrats doivent comporter l'extraction et la ventilation, y compris les opérations de découpe, de meulage, de polissage ou de gravure
- les vêtements doivent être périodiquement lavés pour empêcher toute contamination et il faut favoriser les bonnes pratiques d'hygiène
- il faut éviter le chauffage excessif ; il faut aussi particulièrement éviter le contact avec des agents puissants de réduction acides qui produisent de l'arsine ou de la phosphine sous forme gazeuse hautement toxique
- les stocks d'arsine et de phosphine doivent être placés dans des conteneurs à basse pression.

Produits chimiques de traitement dangereux

Les opérations de fabrication dans les secteurs des semi-conducteurs et de l'électronique peuvent comporter l'utilisation de nombreux produits chimiques potentiellement dangereux.⁸ Il peut aussi y avoir des poudres métalliques dans la fabrication des composants passifs et des appareils magnétiques. Il faut mettre au point et appliquer des programmes de protection contre des produits chimiques spécifiques, comme décrit en détail dans **les Directives EHS générales**. Les travailleurs doivent être protégés contre l'exposition aux produits chimiques utilisés dans les traitements, comme par exemple, cette liste n'étant pas exhaustive, les acides, les bases, les solvants, les poudres métalliques et les boues métallifères, ainsi que les gaz toxiques, cryogéniques et pyrophoriques. Parmi les autres

⁸ Ces produits chimiques dangereux sont notamment l'acétone, l'ammoniac, l'hydroxyde d'ammonium, l'arsine, le trifluorure de bore, le chlore, le gaz carbonique, le trifluorure de chlore, le diborane, le dichlorosilane, le disilane, le fluor, l'arséniure de gallium, le germanium, l'acide chlorhydrique, l'acide hydrofluorique, l'hydrogène, le phosphure d'indium, le méthane, l'acide nitrique, l'oxyde nitrique, le fluorure d'azote, l'oxyde nitreux, l'ozone, l'oxychlorure de phosphore, la phosphine, l'acide phosphorique, le silane, l'acide sulfurique, le tétrafluoro méthane, le trichlorosilane, l'arsenic triméthyle et l'indium triméthyle.

recommandations spécifiques aux secteurs, on peut notamment citer :

- le remplacement de matériaux dangereux utilisés dans la fabrication des semi-conducteurs, comme les éthers de l'éthylène glycol, par des produits de substitution moins dangereux
- l'installation de systèmes d'alarme intégrés avec détecteurs de gaz, les alarmes étant réglées aux marges de sécurité réglementaires ou fixées par l'industrie, si le silane (SiH₄) ou d'autres gaz potentiellement dangereux (HF, H₂, par exemple) sont utilisés dans la fabrication des semi-conducteurs
- l'utilisation de systèmes de fabrication isolés et automatisés pour empêcher l'exposition des travailleurs lorsque l'on ne peut pas remplacer des produits chimiques dangereux par d'autres, dans les semi-conducteurs comme dans l'assemblage des circuits imprimés
- l'utilisation de dispositifs mécaniques comme l'extraction de poussières et de vapeurs, et la ventilation, pour rejeter les composants en suspension dans l'air en dehors des locaux de travail, pour la fabrication des semi-conducteurs comme pour l'assemblage des circuits imprimés.

Risques corporels et risques énergétiques

Les risques corporels de la fabrication des semi-conducteurs et des articles électroniques sont notamment présents lors de la manutention de lourds objets — par exemple, des supports de tranches de silicium (particulièrement pour les tranches de 300 mm) — et des produits finaux emballés, et lorsque l'on travaille à proximité de machines automatisées. Des recommandations générales de prévention et de gestion des risques corporels et énergétiques (y compris les dangers de nature cinétique, électrique, pneumatique et hydraulique) sur les lieux de travail figurent dans les **Directives EHS générales**.

Rayonnements et lasers ionisants et non ionisants

Le processus de fabrication peut comporter des sources de rayonnement ionisant, comme les rayons x, les rayons gamma, et les particules alpha et beta, tous caractérisés par une courte longueur d'onde et une haute énergie. Les types possibles de rayonnement non ionisant dans les processus de fabrication peuvent être les rayonnements à fréquence radioélectrique (utilisés dans le matériel de production du plasma), les UV, les infrarouges, et la lumière visible. Les rayonnements non ionisants peuvent être produits par certains types d'appareils de chauffage puissants, de matériel de tests et d'antennes puissantes.

On classe les lasers en fonction de leur capacité à endommager les yeux ou la peau. La lumière laser, si elle est dirigée sur un objet ou détournée par lui, peut être partiellement absorbée, entraînant une élévation de la température et une altération du matériau exposé à la lumière laser.

Il faut empêcher l'exposition aux sources de rayonnement en plaçant le matériel source dans des enceintes de protection, en installant des dispositifs de verrouillage et d'asservissement, en faisant prendre conscience aux travailleurs de l'importance de ces enceintes et de ces dispositifs, et de leur entretien. Des informations supplémentaires sur l'exposition aux rayonnements figurent dans les **Directives EHS générales**.

Pour prévenir les dangers dus à l'utilisation des lasers, il faut installer des contrôles techniques, tels les enceintes protectrices avec dispositifs de verrouillage, les filtres de protection et les asservissements de systèmes.

1.3 Santé et sécurité de la population

Les effets sur la santé et la sécurité de la population de la construction, de la mise en service et du démantèlement des usines de fabrication de semi-conducteurs et autres articles

électroniques sont similaires à ceux de la plupart des installations industrielles dont il est discuté dans les **Directives EHS générales**.

2.0 Indicateurs de performance et références de l'industrie

2.1 Environnement

Directives pour les émissions et les effluents

Les tableaux 1 et 2 indiquent les valeurs de référence applicables aux émissions et aux effluents dans ce secteur. Les valeurs indiquées pour les émissions et les effluents industriels dans cette branche d'activité correspondent aux bonnes pratiques internationales en ce domaine, telles qu'exprimées par les normes pertinentes des pays qui ont des cadres réglementaires agréés. Ces valeurs s'entendent pour des conditions d'exploitation normales et dans des installations conçues et utilisées de manière appropriée, conformément aux principes de prévention et de lutte antipollution décrits dans les précédentes sections de ce document. Les valeurs indiquées au tableau 1 doivent être relevées, pour des effluents non dilués, pendant au moins 95 % du temps d'exploitation de l'usine ou de l'unité considérée, calculé sur la base du nombre annuel d'heures d'exploitation. Tout écart par rapport à ces valeurs limites qui tiendrait à des conditions locales propres au projet considéré doit être justifié dans l'évaluation environnementale.

Les valeurs de référence relatives aux effluents s'appliquent aux effluents traités directement rejetés dans les eaux de surface destinées à un usage général. Des niveaux de rejet propres à chaque site peuvent être définis en fonction des conditions d'utilisation des systèmes publics de collecte et de traitement des eaux d'égout, le cas échéant ou, dans le cas des effluents rejetés directement dans les eaux de surface, sur la base de la classification des usages des ressources en eau décrites dans

les **Directives EHS générales**. Des informations sur les conditions ambiantes basées sur la charge totale des émissions sont présentées dans les Directives EHS générales. Le suivi des impacts environnementaux des programmes de suivi des impacts environnementaux doit être mis en place de manière à couvrir toutes les activités qui peuvent avoir des impacts environnementaux importants dans des conditions d'exploitation normales ou dans des conditions anormales. Les activités de suivi des impacts environnementaux doivent être basées sur des indicateurs directs ou indirects d'émissions, d'effluents, et d'utilisation des ressources applicables au projet considéré.

Les directives en matière d'émissions sont applicables aux émissions des activités de transformation. Les directives concernant les émissions produites par les opérations de combustion associées aux activités de cogénération de centrales ayant une puissance installée ne dépassant pas 50 MW figurent dans les **Directives EHS générales** ; les émissions des centrales électriques de plus grande taille sont présentées dans les **Directives EHS pour l'électricité thermique**. Des informations sur les conditions ambiantes basées sur la charge totale des émissions sont présentées dans les **Directives EHS générales**

Tableau 1. Valeurs de référence applicables aux effluents

Polluants	Unités	Valeur donnée dans les directives
ph	–	6 – 9
DCO	mg/L	160
DBO5	mg/L	50
Nombre total de matières solides en suspension	mg/L	50
Huile et graisses	mg/L	10
Phosphore total	mg/L	2
Fluorure	mg/L	5
Ammoniaque	mg/L	10
Cyanure (total)	mg/L	1
Cyanure (Free)	mg/L	0,1
COHA (Composés organiques halogénés liés adsorbables)	mg/L	0,5
Arsenic	mg/L	0,1
Chrome (hexa-valant)	mg/L	0,1
Chrome (total)	mg/L	0,5
Cadmium	mg/L	0,1
Cuivre	mg/L	0,5
Plomb	mg/L	0,1
Mercur	mg/L	0,01
Nickel	mg/L	0,5
Étain	mg/L	2
Argent	mg/L	0,1
Sélénium	mg/L	1
Zinc	mg/L	2
Augmentation de température	C	<3a

a À la limite d'une zone de mélange établie scientifiquement qui tient compte de la qualité de l'eau ambiante, de l'utilisation des eaux réceptrices, des récepteurs potentiels et de la capacité d'assimilation.

Tableau 2. Niveaux des émissions atmosphériques c

Polluants	Unités	Valeur donnée dans les directives
COV a	mg/Nm3	20
HAP ^b organique	Ppmv	20
HAP ^b inorganique	Ppmv	0,42
HCl	mg/Nm3	10
HF	mg/Nm3	5
Phosphine	mg/Nm3	0,5
Composés d'arsine et As	mg/Nm3	0,5
Ammoniaque	mg/Nm3	30
Acétone	mg/Nm3	150

NOTES :

^a Applicable aux processus de nettoyage des surfaces.

^b Les polluants de l'air dangereux et spécifiques à un secteur (HAP) sont notamment les composés de l'antimoine, les composés de l'arsenic, l'arsine, le tétrachlorure de carbone, le catéchol, le chlore, les composés du chrome, l'acrylate d'éthyle, l'éthylbenzène, l'éthylène glycol, l'acide chlorhydrique, l'acide hydrofluorique, les composés du plomb, le méthanol, le méthyl-isobutyl-cétone, le chlorure de méthylène, les composés du nickel, le perchloréthylène, la phosphine, le phosphore, le toluène, le trichloréthane-1-1-1, le trichloréthylène (éliminé progressivement), les xylènes. À l'heure actuelle, on n'utilise pas l'éthylbenzène, le toluène, le xylène, le chlorure de méthylène, le tétrachlorure de carbone, les composés du chrome, le perchloréthylène, le trichloréthane-1-1-1, ni le trichloréthylène.

^c À 3 % O₂.

Utilisation des ressources et production de déchets

Le tableau 3 présente des exemples d'indicateurs de consommation des ressources pour la branche d'activité concernée. Les valeurs de référence utilisées dans l'industrie sont indiquées uniquement à des fins de comparaison. Les projets industriels doivent s'efforcer d'améliorer systématiquement leurs performances dans ces domaines.

Tableau 3. Consommation d'eau et d'énergie et production de déchets		
Entrants par unité de produit	Unité	Valeur de référence pour la branche d'activité
Eau Eau ultra pure pour nettoyage chimique	Tranches 1/300-mm	42
Consommation d'eau ultra pure	Tranches 1/200-mm	4 000-8 000
Utilisation d'eau (nette)	l/cm ²	8-10
Utilisation d'eau ultra pure dans l'unité de fabrication	l/cm ²	4-6
Énergie Total outils fabrication	kWh/cm ² par tranche produite	0,3-0,4
Total systèmes support de l'unité de fabrication		0,5-0,6
Entrants par unité de produit	Unité	Valeur de référence pour la branche d'activité
Déchets ^a Recyclage et réutilisation des déchets liquides dangereux	%	80
Recyclage et réutilisation des déchets solides	%	85
NOTES : ^a Les fabricants de semi-conducteurs devraient tendre vers des usines à « déchets zéro ». Source : International Technology Roadmap for Semiconductors (2005).		

Suivi des impacts environnementaux

Des programmes de suivi des impacts environnementaux doivent être mis en place de manière à couvrir toutes les activités qui peuvent avoir des impacts environnementaux importants dans des conditions d'exploitation normales ou dans des conditions anormales. Les activités de suivi des impacts environnementaux doivent être basées sur des indicateurs directs ou indirects d'émissions, d'effluents et d'utilisation des ressources applicables au projet considéré.

Les activités de suivi doivent être suffisamment fréquentes pour fournir des données représentatives sur les paramètres considérés. Elles doivent être menées par des personnes ayant reçu la formation nécessaire à cet effet, suivant des procédures de suivi et de tenue des statistiques et utilisant des instruments bien calibrés et entretenus. Les données produites par les activités de suivi doivent être analysées et examinées à intervalles réguliers et comparées aux normes d'exploitation afin de permettre l'adoption de toute mesure corrective nécessaire. De plus amples informations sur les méthodes d'échantillonnage et d'analyse des émissions et des effluents applicables figurent dans les **Directives EHS générales**.

2.2 Hygiène et sécurité au travail

Directives sur l'hygiène et la sécurité au travail

Les résultats obtenus dans le domaine de l'hygiène et de la sécurité au travail doivent être évalués par rapport aux valeurs limites d'exposition professionnelle publiées à l'échelle internationale, comme les directives sur les valeurs limites d'exposition (TLV®) et les indices d'exposition à des agents biologiques (BEIs®) publiés par American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)⁹, *Pocket Guide to Chemical Hazards* publié par United States National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH)¹⁰, les valeurs plafonds autorisées (PEL) publiées par Occupational Safety and Health Administration of the United States (OSHA)¹¹, les valeurs limites d'exposition professionnelle de caractère indicatif publiées par les États membres de l'Union européenne¹², ou d'autres sources similaires..

⁹ Consulter: <http://www.acgih.org/TLV/> et <http://www.acgih.org/store/>

¹⁰ Consulter: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

¹¹ Consulter :

http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDAR DS&p_id=9992

¹² Consulter: http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/

Fréquence des accidents mortels et non mortels

Il faut s'efforcer de ramener à zéro le nombre d'accidents du travail dont peuvent être victimes les travailleurs (employés et sous-traitants) dans le cadre d'un projet, en particulier les accidents qui peuvent entraîner des jours de travail perdus, des lésions d'une gravité plus ou moins grande, ou qui peuvent être mortels. Il est possible de comparer les chiffres enregistrés pour les installations des projets à ceux d'installations de pays développés opérant dans la même branche d'activité présentés dans des publications statistiques (par exemple US Bureau of Labor Statistics et UK Health and Safety Executive)¹³.

Suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail

Il est nécessaire d'assurer le suivi des risques professionnels posés par les conditions de travail dans le cadre du projet considéré. Ces activités doivent être conçues et poursuivies par des experts agréés¹⁴ dans le contexte d'un programme de suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail. Les installations doivent par ailleurs tenir un registre des accidents du travail, des maladies, des événements dangereux et autres incidents. De plus amples informations sur les programmes de suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail sont données dans les Directives EHS générales.

¹³ Consulter: <http://www.bls.gov/iif/> et <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>

¹⁴ Les experts agréés peuvent être des hygiénistes industriels diplômés, des hygiénistes du travail diplômés, des professionnels de la sécurité brevetés ou tout titulaire de qualifications équivalentes.

3.0 Bibliographie et sources d'information supplémentaires

- Australian National Pollutant Inventory. 1999. Emission Estimation Technique Manual for the Electronics and Computer Industry. Queensland, Australie.
- Commission européenne. 2005. Reference Document on Best Available Techniques for Surface Treatment of Metals and Plastics. Séville, Espagne
- Eastern Research Group. 1999. Preferred and Alternative Methods for Estimating Air Emissions from Semiconductors Manufacturing. Prepared for US EPA, Point Sources Committee. Morrisville, North Carolina.
- Geng, Hwaiyu. 2005. Semiconductor Manufacturing Handbook. McGraw-Hill. New York, New York.
- German Federal Government. 2002. First General Administrative Regulation Pertaining the Federal Immission Control Act (Technical Instructions on Air Quality Control – TA Luft). Berlin, Allemagne.
- German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. 2004. Promulgation of the New Version of the Ordinance on Requirements for the Discharge of Waste Water into Waters (Waste Water Ordinance - AbwV) of 17. June 2004. Berlin, Allemagne.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2000. Good Practice and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Disponible à <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/> (consulté en juin 2006)
- Harper, C.A. 1997. Passive Electronic Component Handbook. McGraw-Hill. New York, New York.
- Helsinki Commission (Helcom). 2002. Reduction of Discharges and Emissions from the Metal Surface Treatment. Recommendation 23/7. Helsinki, Finlande
- Intel. 2004. Environmental, Health and Safety Report. Disponible à <http://www.intel.com/intel/other/ehs/> (consulté en mars 2006)
- International Technology Roadmap for Semiconductors. 2005. Environmental, Safety and Health. Disponible à <http://public.itrs.net/> (consulté en mars 2006).
- Ireland Environmental Protection Agency. 1996. Integrated Pollution Control Licensing. Batneec Guidance Note for the Manufacture of Integrated Circuits and Printed Circuit Boards. Ardavan, Irlande.
- McLyman, Colonel Wm. T. 2002. High Reliability Magnetic Devices: Design and Fabrication. CRC Edition. Londres, Royaume-Uni.
- New York State Department of Environmental Conservation, Pollution Prevention Unit. 1999. Environmental Compliance and Pollution Prevention Guide for the Electronics and Computer Industry. New York, New York.
- Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI). Guideline F5-90. Guide for Gaseous Exhaust Emissions. Disponible à <http://wps2a.semi.org/wps/portal/pagr/118/pa.118/190> (consulté en mars 2006).
- Semiconductor Industry Association. 2000. Occupational Health System 2000 Annual Survey of Work Injuries and Illnesses. San Jose, Californie.
- Union européenne. 2003a. Directive 2002/95/EC on Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment. Bruxelles, Belgique.
- Union européenne. 2003b. Directive 2002/96/EC on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Bruxelles, Belgique.
- US Environmental Protection Agency (EPA). 1995. Electronic and Computer Industry, Sector Notebook Project. Washington.
- US EPA. 1998. Reduction of Arsenic Wastes in the Semiconductor Industry. EPA/600/R-02/089. Washington.
- US EPA. 2001. Proposed Air Toxics Rule for Semiconductor Manufacturing. Fact Sheet. Washington.
- US EPA. 2002. 40 CFR Part 63 National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Semiconductor Manufacturing. Washington.
- US EPA. 40 CFR Part 413. Electroplating Point Source Category. Washington.
- US EPA. 40 CFR Part 433. Metal Finishing Point Source Category. Washington.
- US EPA. 40 CFR Part 469. Electrical and Electronic Components Point Source Category. Washington
- US EPA. Design of the Environment. Printed Wiring Board. Section A, Clean Air Act Requirements. Washington. Disponible à <http://www.epa.gov/oppt/dfepubs/index.htm#pwb> (consulté en mars 2006)
- World Semiconductor Council (WCS). 1999. Position Paper Regarding PFC Emissions Reduction Goal, April 26, 1999. Fiuggi, Italie.
- World Semiconductor Council (WSC). 2005. Joint Statement on the Ninth Meeting. May 19, 2005, Kyoto, Japan.
- WSC and SEMI. 2006. Agreement for PFOS. Voluntary Semiconductor Industry Commitment. Disponible à http://www.sia-online.org/pre_stat.cfm?ID=294 (accessed on April 2007)

Annexe A — Description générale des activités

L'industrie électronique comprend la fabrication de semi-conducteurs, de cartes électroniques, de circuits imprimés, de masques, de composants passifs et d'appareils magnétiques.

Fabrication des semi-conducteurs

Dans la fabrication des semi-conducteurs, on utilise le silicium, le carbure de silicium, (SiC), l'arséniure de gallium (GaAs), des métaux, des produits chimiques, de l'eau et de l'énergie. Les matériaux doivent tous être d'une très grande pureté. Il est donc essentiel d'utiliser des gaz spéciaux, des systèmes automatisés de manutention des produits chimiques et des systèmes utilisant de l'air sec propre dans les salles blanches, particulièrement en photolithographie. Il est aussi nécessaire de disposer d'un système d'eau ultra pure. En effet, on utilise de grandes quantités d'eau ultra pure dans la fabrication des semi-conducteurs, surtout pour les opérations de nettoyage par voie humide, mais aussi pour la gravure à l'acide, les processus avec solvants et le nettoyage des outils. Nombre de nouvelles unités de fabrication réduisent leur consommation d'eau en recyclant un pourcentage important des eaux usées provenant des phases de rinçage. Cela ne rajoute pas de quantités importantes de polluants dans l'eau. Les circuits intégrés devenant plus petits, le contrôle des vibrations et les fondations de l'unité de fabrication revêtent une importance plus grande.

Le processus de fabrication comporte des centaines d'opérations effectuées couche par couche sur un matériau cristallin solide, essentiellement le silicium, et plus récemment le carbure de silicium (SiC). On utilise l'arséniure de gallium (GaAs) dans de nombreuses applications militaires et commerciales, dont les lasers, les diodes électroluminescentes (LED) et les appareils de communication (les téléphones portables, par exemple, comportent des puces d'arséniure de gallium en tant qu'oscillateurs à ondes courtes).

La fabrication des semi-conducteurs comporte deux séries fondamentales d'opérations : la fabrication des tranches et l'assemblage, l'emballage et les tests, c'est-à-dire l'assemblage des tranches en circuits intégrés opérationnels.

La figure A.1 (dernière page) résume les principales étapes de fabrication des semi-conducteurs, en indiquant particulièrement les apports en produits chimiques et autres fluides, et les points d'émission de rejets/effluents/déchets.

Pour fabriquer une tranche de semi-conducteur, il faut une structure de silicium multicouches, cristalline et uniforme (tranche de silicium) qu'on obtient par des techniques maîtrisées comme le dépôt chimique en phase vapeur ou l'épitaxie par jet moléculaire. Ensuite, on dépose, par traitement thermique dans un four à haute température (900°C à 1 200°C), une mince couche de dioxyde de silicium qui isole et protège le silicium. Puis on revêt uniformément la tranche d'une couche mince de matériau sensible à la lumière, appelée couche photorésistante (positive ou négative), exposée à la lumière ultraviolette ou à des rayons X passant à travers un masque de verre ou un stencil préalablement créé avec la configuration du circuit.

La couche photorésistante positive devient soluble dans les parties exposées. On peut l'éliminer par des révélateurs chimiques qui font apparaître la configuration de la couche photorésistante imprimée par le masque sur le dioxyde de silicium (révélation). On élimine ensuite le dioxyde de silicium par décapage humide ou sec : la voie humide utilise des acides, des bases ou des solutions caustiques ; la voie sèche, aussi appelée décapage plasma, utilise un gaz réactif ionisé et permet une plus haute résolution et donne moins de déchets. L'excès de matériau photorésistant est finalement éliminé par solvant ou processus plasma. En répétant les opérations (jusqu'à 25 ou 30 fois), de l'oxydation du silicium jusqu'à l'élimination de la couche

photorésistante et en utilisant différents masques, cela forme différentes régions sur les couches, isolées les unes des autres. Ce processus complet est appelé photolithographie ou micro-lithographie.

Le gravure plasma du nitrure de silicium, procédé par voie sèche de la technologie métal-oxyde-semi-conducteur, permet de remplacer le procédé par voie humide à l'acide phosphorique (fortement corrosif) et diminue la quantité de déchets en général. Ce procédé donne aussi une plus grande sécurité aux personnes et réduit le nombre d'opérations.

Pour modifier la conductivité des régions silicium, on introduit des agents dopants par diffusion ou implantation ionique. La diffusion ionique peut être gazeuse ou non gazeuse. Elle intervient dans un environnement à haute température. L'implantation ionique consiste à bombarder les parties de silicium exposées avec des ions accélérés. L'interconnexion sélective des différentes régions et couches de la tranche de silicium est obtenue par métallisation : un matériau diélectrique est déposé et configuré par incrustation. Les structures ainsi obtenues sont ensuite remplies d'alliages d'aluminium sous vide ou de cuivre par galvanoplastie ou dépôt électrochimique. On élimine le cuivre en excédent par polissage mécano-chimique (« planarisation »). Il existe d'autres techniques de métallisation, particulièrement avec le cuivre, comme le dépôt physique en phase vapeur et le dépôt par couche atomique. Enfin, on applique par passivation à la surface de la tranche de silicium une couche d'oxyde ou de polyamide pour étanchéifier le circuit.

Les nouvelles applications nécessitent des semi-conducteurs très fins. On réduit donc l'épaisseur de la tranche de silicium par une finition de surface ou par détente thermique. Chaque tranche de silicium finie peut contenir des centaines de puces testées électriquement (mesurées) avant d'être découpées en puces individuelles avec un diamant ultramince (découpe en puces) et marquées. Après le test électrique, chaque puce est

montée sur un cadre métallique ou céramique connectée par de minces fils d'or et encapsulée pour assurer le support mécanique et la protection vis-à-vis de l'environnement extérieur. L'objet final conditionné peut comporter une ou plusieurs puces connectées.

Nanotechnologie et systèmes micro-électromécaniques

La nanotechnologie concerne la création de structures fonctionnelles à l'échelle de l'atome ou de la molécule, comportant au moins une dimension caractéristique en nanomètres. L'évaporation de certaines poudres d'oxydes métalliques (ZnO, Ga₂O₃, SnO₂, etc.) à haute température permet de synthétiser les nano-ceintures et les nano-fils des mêmes oxydes de métal. Les semi-conducteurs qui en résultent sont généralement utilisés comme détecteurs, capteurs, ou bien dans d'autres applications pour appareils électroniques et optoélectroniques.

Les systèmes micro-électromécaniques sont pour l'essentiel des micro-capteurs (par exemple, pour la température, la pression, les substances chimiques et les rayonnements). Leur technique de fabrication est similaire à celles des puces. Divers matériaux sont utilisés dans les systèmes micro-électromécaniques ; ils ont des propriétés électriques spécifiques, mais ils sont aussi choisis pour leurs propriétés mécaniques, thermiques ou chimiques. Le silicium est le plus souvent utilisé.

La technologie de production la plus courante des systèmes micro-électromécaniques est le dépôt et la configuration d'une couche d'oxyde de silicium, suivis par le dépôt et la configuration d'une couche de polysilicium et l'élimination de la couche d'oxyde, permettant à la couche de polysilicium d'agir comme levier ; cela se passe généralement dans des mélanges d'acide hydrofluorique.

Les opérations de découpe et de séparation sont critiques. En effet, les parties mobiles des systèmes micro-électromécaniques sont fragiles. Le test des appareils est spécifique à une application précise et l'assemblage des systèmes micro-électromécaniques est généralement une opération très délicate en raison de la fragilité de ces systèmes. Le conditionnement est aussi spécifique à chaque application, mais ils ont tous pour objet de protéger la puce des effets environnementaux, sans empêcher l'accès aux paramètres d'environnement essentiels au bon fonctionnement (par exemple, application à un capteur de pression dans les airbags). Les systèmes micro-électromécaniques sont utilisés dans de nombreux secteurs d'activité, dont notamment l'automobile, les contrôles industriels, le matériel de bureau, l'aéronautique, le domaine médical et les communications.

Fabrication des plaquettes de circuits imprimés

Pour fabriquer des plaquettes de circuits imprimés, on grave et on configure par galvanoplastie des circuits sur des substrats de base souvent en couches. Les plaquettes de circuits imprimés peuvent être à une face, à double face, multicouches et souples. Les technologies utilisées peuvent être additives, semi-additives ou soustractives, mais c'est la technologie soustractive qui est la plus couramment utilisée. On prépare la plaquette en la nettoyant, en la laminant et en perçant des trous. Préalablement à la déposition par procédé chimique, il faut procéder à un nettoyage chimique et mécanique. L'opération de mise en image permet de transférer les grilles de circuits sur la plaquette par photolithographie ou sérigraphie. Ensuite, par galvanisation (avec le cuivre généralement), on épaissit les couches conductrices et on les protège de la corrosion ou de l'érosion. Dans la technique de revêtement par étamage (ou nivellement par air chaud de l'alliage en fusion), on plonge la plaquette dans un métal d'apport en fusion, généralement un alliage à basse température de fusion (par exemple, les alliages à l'étain sans plomb). L'excédent de métal d'apport est éliminé

par nivellement avec soufflage d'air chaud. La fabrication des plaquettes de circuits imprimés comporte des étapes finales : tests électriques, vérifications de dimensions et inspections visuelles, conditionnement et étiquetage.

Assemblage des circuits imprimés sur les plaquettes

Les cartes électroniques sont pour l'essentiel constituées d'une base en résine époxy pressée, en Teflon™, en fibre de verre ou en céramique, sur laquelle on monte des semi-conducteurs (silicium, carbure de silicium ou arséniure de gallium) et des composants passifs. On fixe et on soude des composants électriques spécifiques sur les cartes électroniques. La plaquette est généralement nettoyée par flux chimique. Ce flux facilite aussi la connexion soudée. Le soudage peut se faire selon différentes techniques, dont le soudage à la vague, la technique des composants montés en surface et le soudage à la main. Il existe d'autres techniques de nettoyage des cartes électroniques assemblées n'appauvrissant pas la couche d'ozone (par exemple, d'autres solvants organiques, des mélanges hydrocarbures/agents tensio-actifs, des alcools et autres mélanges de solvants organiques), ainsi que des processus aqueux et semi-aqueux. Désormais, les résidus du flux sont éliminés par eau déionisée. Auparavant, on utilisait le fréon 113 (CFC-113) et le trichloroéthane (TCA) maintenant interdits. L'industrie électronique est actuellement en mesure de procéder à des assemblages techniquement très pointus de cartes électroniques sans nettoyage grâce à des flux à faibles résidus qui ne laissent que très peu d'impuretés sur les plaquettes.

Écrans

Les techniques d'affichage sur écran plat sont classées en deux types : projection et visualisation directe, eux-mêmes répartis en deux sous-catégories : avec émissions et sans émissions. La technique de visualisation sur écran plat la plus courante est

l'affichage à cristaux liquides, où l'agencement des cristaux liquides est opéré par un champ électrique. Ce que voit la personne dépend de l'agencement moléculaire des cristaux liquides. On aligne et on soude un filtre couleur et un transistor en couches minces avec une pièce d'écartement entre les deux. On injecte les cristaux liquides et on met en place l'étanchéité en extrémité. Enfin, on assemble le polariseur, le support de bande, l'électronique, le rétro-éclairage et le châssis.

Les diodes électroluminescentes organiques ont une structure simple et sont à l'état solide, c'est-à-dire qu'elles ne renferment pas de vide, de liquide ou de gaz. Les diodes électroluminescentes organiques fonctionnent avec des petites molécules de matériau de luminance déposées par évaporation sous vide. La technique des polymères luminescents utilise des matériaux de luminance généralement déposés selon le principe de l'impression à jet d'encre ou du dépôt à la tournette. Pour améliorer la performance, on ajoute un transistor à couches minces. Les diodes électroluminescentes organiques ont l'avantage d'avoir un procédé de production simple, un haut rendement optique et sont peu gourmandes en énergie. Toutefois, elles ont une courte durée de vie.

Fabrication de composants passifs

Le pressage et/ou le frittage de poudres – oxyde d'aluminium (Al_2O_3), nitrure d'aluminium (AlN), etc. – est la principale technologie de fabrication des composants passifs. Cela permet d'obtenir des céramiques ayant des caractéristiques d'isolation et de conductivité ou des propriétés piézoélectriques. La fabrication la plus courante est celle des substrats d'isolation en céramique (Al_2O_3 , AlN) pour microcircuits intégrés.

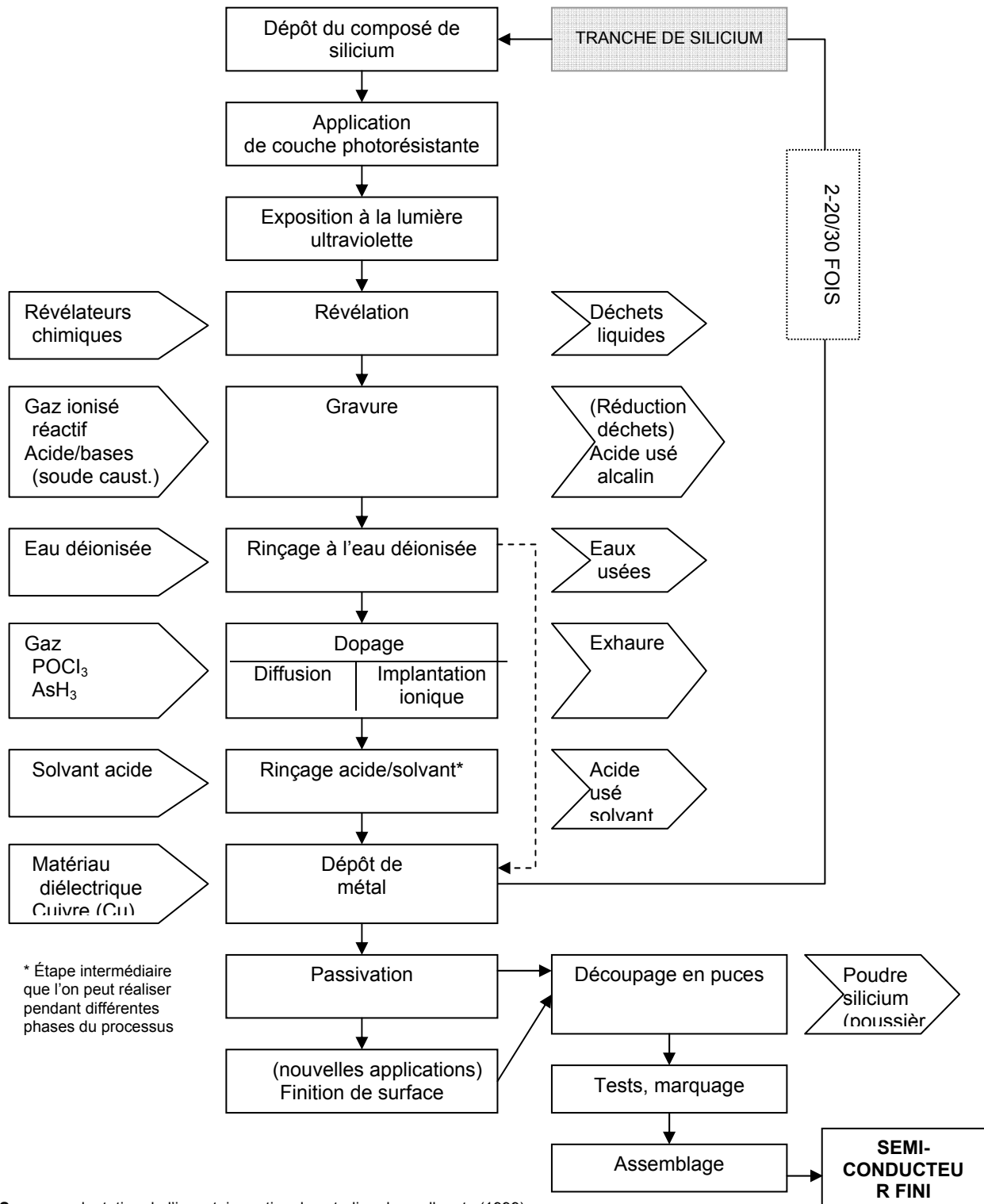
Pour les substrats de grande puissance, on utilise une matrice d'aluminium ou de cuivre renforcée de carbure de silicium afin d'obtenir une conductivité thermique meilleure que celle de l'oxyde d'aluminium habituel. En mélangeant des additifs à une

base en carbone ou en carbure de silicium, on obtient des résistances de toutes dimensions et valeurs ohmiques. Les caractéristiques piézoélectriques servent surtout dans les capteurs de pression (automobile), les capteurs de tension et les appareils de nettoyage aux ultrasons, ou encore pour l'émission d'ultrasons dans l'échographie. On utilise les céramiques spéciales en oxyde de zinc (ZnO) pour les dispositifs de protection contre les surtensions (varistors).

Fabrication des appareils magnétiques

La fabrication des appareils magnétiques est basée sur le mixage de poudres magnétiques (fer ou terres rares) pour obtenir des films ou des bandes magnétiques permettant de stocker des données en informatique, et de céramique ou de métal fritté possédant des caractéristiques magnétiques améliorées, pour fabriquer le noyau de transformateurs à petites impulsions ou d'aimants spéciaux très puissants pour l'industrie automobile ou pour les appareils à résonance magnétique statique.

Figure A.1 : schéma des processus de fabrication des semi-conducteurs



Source : adaptation de l'inventaire national australien des polluants (1999)