

Laure Hasan

Lycée Georges Duby

200 rue Georges Duby 13080 Luynes

Tel : 04 42 60 86 00

Fax : 04 42 60 86 05

RAPPORT DE STAGE EN ENTREPRISE

24 au 30 Juin 2004



La fabrication de puces électroniques



84, Avenue Olivier Perroy

Zone Industrielle

13106 ROUSSET Cedex

Tel : 04 42 53 60 00 – Fax : 04 42 53 60 01

A la fin de l'année de seconde, le lycée Georges Duby demande à chaque élève de faire une à deux semaines de stage dans une entreprise afin d'avoir une première expérience de la vie d'entreprise et de ses conditions de travail.

L'entreprise que j'ai choisie s'appelle ATMEL, elle est située à Rousset. J'ai fait mon stage dans un des services de l'entreprise appelé « Manufacturing & Development », pendant une semaine¹, avec Mme Bourgier. Mme Bourgier avait prévu un emploi du temps avec des rencontres de personnes responsables techniques et une visite de la salle blanche. Certaines informations qui m'ont été données ne sont pas reprises dans ce rapport, car elles ont un caractère confidentiel pour l'entreprise.

Je remercie vivement Mme Bourgier et Mr Moreau qui m'ont accueillie si chaleureusement et m'ont encadrée pendant le stage, ainsi que toutes les personnes ayant accepté de me consacrer du temps pour m'expliquer leur activité.

[Plan du rapport de stage](#)

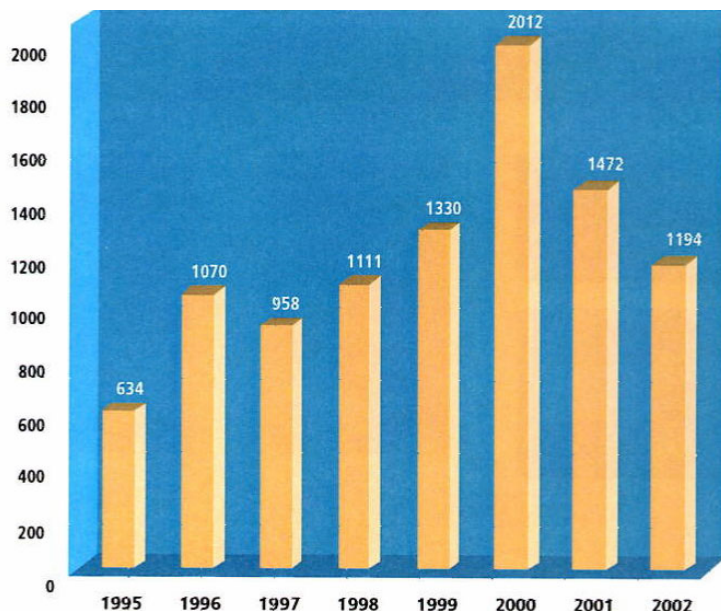
Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise	p.3
Chapitre 2 : La fabrication	p.8
Le lieu de travail	p.9
Chapitre 3 : Les étapes de la fabrication	p.11
- Diffusion	
- Photolithographie	
- Gravure	
- Dépôt	
- Défectivité – Statistiques	
- Contrôle de la production	
Impressions du stage	p.17

¹ La durée de mon stage n'a pu être que d'une semaine, en raison des dates tardives des examens de Cambridge

ATMEL est une entreprise américaine de semi-conducteurs, implantée principalement en Amérique, en Asie et en Europe (Rousset, Grenoble, Nantes). Son siège social est situé dans la Silicon Valley (San José, Californie). Cette entreprise a été créée en 1984, par Georges Perlegos. ATMEL, fortement implantée en Amérique et en Asie voulait se développer au niveau mondial, c'est à dire aussi en Europe.

En 1995, ATMEL a racheté une entreprise, ES2, qui était déjà installée à Rousset et l'a développée. L'achat d'ES2 a été une bonne opportunité grâce au coût raisonnable de l'entreprise et aux subventions accordées.

Depuis 1995, ATMEL Rousset a augmenté son chiffre d'affaire (voir graphique) ainsi que son activité et son effectif (il y a maintenant 5 bâtiments).



Evolution du Chiffre d'Affaires

(exprimé en million de \$)

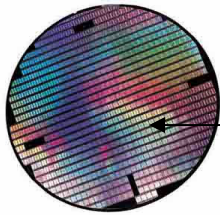
ATMEL travaille dans différents secteurs d'entreprise : l'industrie, la grande consommation, l'informatique. Il y a plusieurs projets d'avenir pour l'entreprise : des projets à court terme (investissement sur la zone de Rousset) et des projets à long terme (projet CIM Paca² qui rassemble les industries de microélectronique de la région).

² Cf article en annexe

Activités de l'entreprise

Il y a trois types d'implantations : les usines de fabrication, les centres de conception et les bureaux (Rousset étant à la fois une usine de fabrication et un centre de conception).

ATMEL est fabricant de circuits intégrés ou puces. Un circuit intégré est un maillage complexe de millions de transistors constituant des fonctions logiques.



Une puce sur un wafer

Il existe de nombreuses catégories de circuits intégrés se différenciant par leurs fonctions et leurs caractéristiques techniques. Toutes ces puces sont stockées sur une plaque ronde appelée **wafer**.

Ces puces permettent le fonctionnement de nombreux produits tels que des microcontrôleurs, des produits RF (Radio Fréquence), des produits multimédias (synthétiseurs), des produits de communication (wireless).



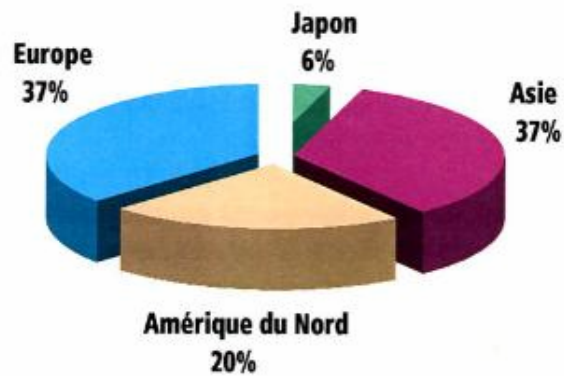
Plus la technologie avance, plus les puces doivent être petites pour répondre aux besoins des consommateurs. Les entreprises ont besoin de machines de plus en plus précises, mais aussi d'une plus grande propreté, car une particule sur un circuit peut causer un dysfonctionnement. L'accent est aussi mis sur les produits qui marchent grâce à une batterie permettant d'obtenir des performances élevées pour une faible consommation d'énergie.

Entreprise et partenaires

Les clients de l'entreprise ATMEL sont des sociétés de télécommunications, d'informatique, de sécurité (cartes, ex. : carte vitale), d'industrie (militaire, médicale), clients qui sont très réguliers.

Ils viennent du monde entier, principalement d'Europe et d'Asie (voir graphique).

La distribution est réalisée par des « marketeurs » qui mettent les clients en relation avec l'entreprise. Le service après-vente est organisé par le « customer service », service clientèle.



Répartition du chiffre d'affaires par répartition géographique (2002)

Les fournisseurs sont très variés : l'entreprise a besoin de nombreux matériaux, principalement des matières premières, pour la réalisation des puces sur les wafer (silicium, résine,...) et d'énergie (EDF,...). Les fournisseurs sont issus du monde entier, sont très réguliers car sans eux l'entreprise ne pourrait pas fonctionner.

ATMEL travaille parfois en partenariat avec d'autres entreprises de semi-conducteurs pour certains projets.

La publicité est faite au sein du milieu professionnel et non par annonces car c'est une entreprise privée.

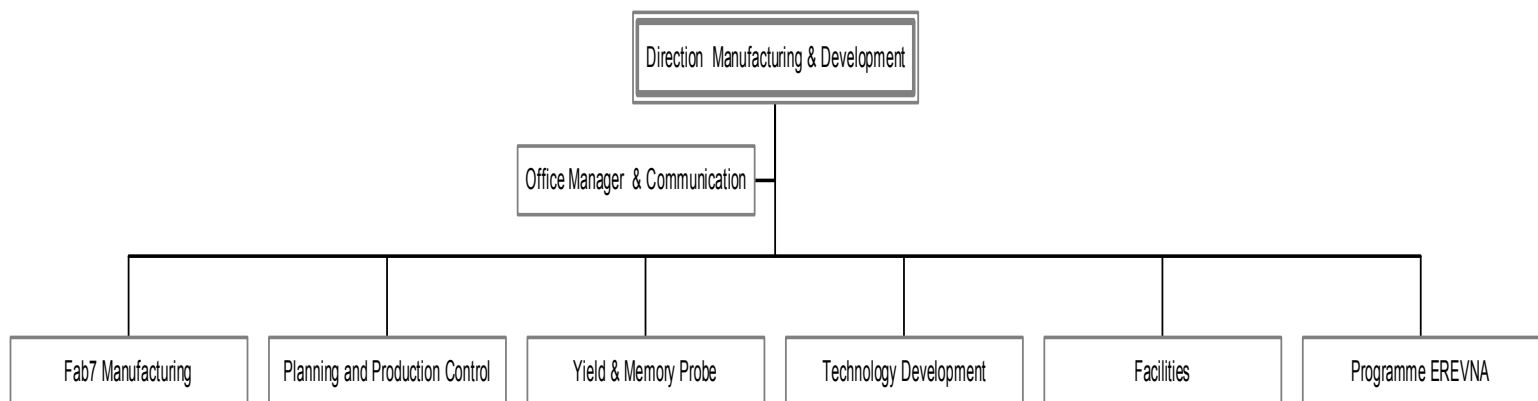
Organisation de l'entreprise

L'entreprise ATMEL est divisée en plusieurs secteurs :

- Finances et Administration
- Ressources Humaines
- Trois sections de Business (smart card RFO business, CASP business et business Operation)
- Manufacturing et Development, dans laquelle je me trouvais

Il y a 1400 personnes à ATMEL Rousset, dont 950 dans le service « Manufacturing & Development ».

Organigramme du service « Manufacturing & Development »



Dans le service « Manufacturing », il y a trois sections, pour chaque procédé de fabrication :

- la **production**, qui assure la fabrication des puces
- le **process**, qui développe et contrôle le processus de fabrication
- la **maintenance**, qui assure le fonctionnement des machines

L'entreprise et son personnel

Le recrutement du personnel se fait par cabinets de recrutement et par annonces.

Les emplois étant très différents au sein de l'entreprise, il y a plusieurs voies de qualifications possibles. Les personnes travaillant dans l'entreprise ont différentes formations.

Les employés travaillent 35 heures par semaine, mais dans d'autres services, les horaires sont « shiftés » : journées de 12 heures. Les horaires sont calculés grâce à des badgeuses qui calculent les heures écoulées entre plusieurs passages du badge à différents moments de la journée.

La communication interne s'effectue principalement par e-mail, téléphone, courrier, fax et affichage. Le travail se fait individuellement mais aussi en équipe, cela dépend des services et des lieux (Fab, bureaux). Il y a un comité d'entreprise, et une présence syndicale.

Ce rapport de stage portera tout d'abord sur le process et le lieu de fabrication, puis sur les différentes étapes du process qui seront détaillées.

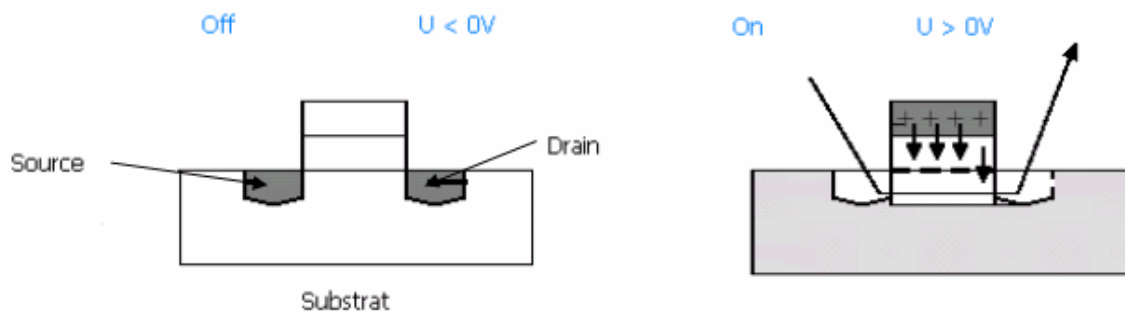
Beaucoup de termes anglais sont employés au sein de l'entreprise car c'est une entreprise californienne, et car c'est le langage universel en ce qui concerne les composants électroniques.

ATMEL fabrique donc des **circuits intégrés** (ou puces) sur des wafers.

Mais qu'est-ce qu'un circuit intégré ?

C'est un circuit réalisé à partir de **transistors** qui permettent la mémorisation de données et le traitement autonome de l'information. L'avantage d'un circuit intégré est d'être petit, léger et peu consommateur d'énergie.

Un transistor est un modulateur de signaux électriques binaires (0, 1). Lorsqu'on applique une tension supérieure ou égale à la tension de seuil, les électrons passent alors de la source au drain, créant un courant électrique. Plus la distance est petite, plus la tension de seuil sera petite, donc il y aura moins d'énergie requise (gain de place et d'énergie).



La fabrication d'un circuit intégré nécessite plusieurs étapes, répétées plusieurs fois (ce qui peut donner 300 étapes en tout).

Ces étapes sont la diffusion, la photolithographie, la gravure, le dépôt/implantation, le polissage. Elles ont lieu dans la salle blanche (Fab).

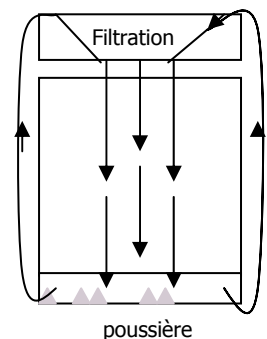
2.2 LIEU DE TRAVAIL

La Fab (ou salle blanche)

C'est l'endroit où se déroulent toutes les opérations de fabrication des circuits imprimés sur les wafers (diffusion, photolithographie, gravure, polissage). Cet endroit nécessite une extrême propreté, afin de ne pas abîmer les wafers. Tous les paramètres sont contrôlés : purification et filtration de l'air, de l'eau, température ambiante, pression et hygrométrie.

La classe de la salle blanche est donnée par le nombre maximal de particules supérieures à 0.5 micron contenues dans un pied cube d'air. Elle est de 1.

La Fab est constituée d'un double plancher (1mètre de hauteur environ), constitué de grilles. L'air est filtré, puis envoyé dans la Fab grâce aux grilles du plafond. L'air est envoyé dans une seule direction, vers le bas (flux laminaire) et la poussière reste stockée sous le double plancher où elle est ensuite évacuée. L'air remonte sur les côtés au-dessus de la fab où il est de nouveau filtré. L'air de la Fab est constitué à 90% d'air refiltré et à 10% d'air extérieur.

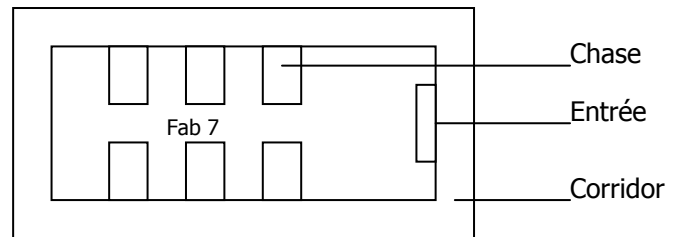


L'homme étant la principale source de contamination, une tenue spéciale est exigée pour accéder à la Fab. Comme on voit sur la photo, il faut porter des chaussures, un masque, des lunettes, des gants et une combinaison pour ne laisser aucune partie de la peau en contact avec l'air et contaminer l'air purifié.

La Fab est en surpression par rapport au reste du bâtiment : aucune particule extérieure ne peut donc s'y introduire.



La Fab est divisée en tunnels de production et en tunnels de maintenance. Le corridor et les chases ne nécessitent pas la tenue de Fab : la tenue de bureau est conservée. La superficie totale de la Fab est de 8000 m².

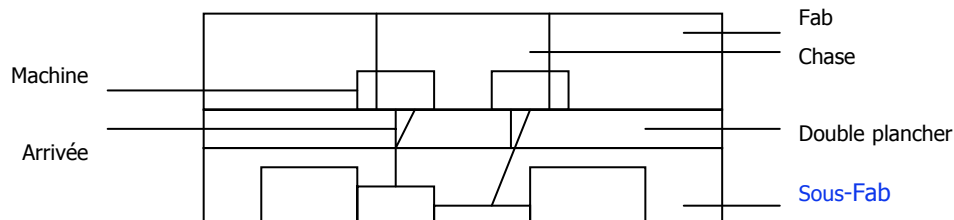


[La Sous Fab](#)

C'est l'endroit qui se trouve sous la Fab et qui regroupe toutes les arrivées d'air, d'eau, gaz et de courant vers la Fab. C'est aussi ici que se trouvent tous les générateurs des machines.

Des techniciens contrôlent généralement leur état de fonctionnement.

Ce sont des ingénieurs qui, grâce à des plans, choisissent le placement des générateurs.



Coupe de la Fab et de la sous-Fab

Certaines machines sont très lourdes (plusieurs tonnes), ont besoin d'une grande quantité d'énergie et sont très fragiles et extrêmement coûteuses c'est pourquoi il faut les manier avec précaution.

[Production](#)

La Fab est sans cesse en production : 24/24h, tous les jours, pendant les vacances et les jours fériés.

Pour ceci, les employés se relayent toujours. S'il y a un problème, la Fab doit toujours avoir une solution au plus vite. Si une machine ne marche plus, l'entreprise peut alors faire appel à son fournisseur.

L'entreprise possède une petite station prête à fonctionner, pour produire de l'énergie.

Pratiquement tous les équipements existent en plusieurs exemplaires pour assumer le volume de production, même en cas de panne d'une machine.

[Les bureaux](#)

Pour mieux protéger la Fab et effectuer la transition du monde extérieur à la Fab, les employés doivent porter une tenue spéciale aussi dans les bureaux : c'est le clean concept (l'ensemble des règles pour maintenir cet environnement propre et contrôlé).

3.1 LA DIFFUSION

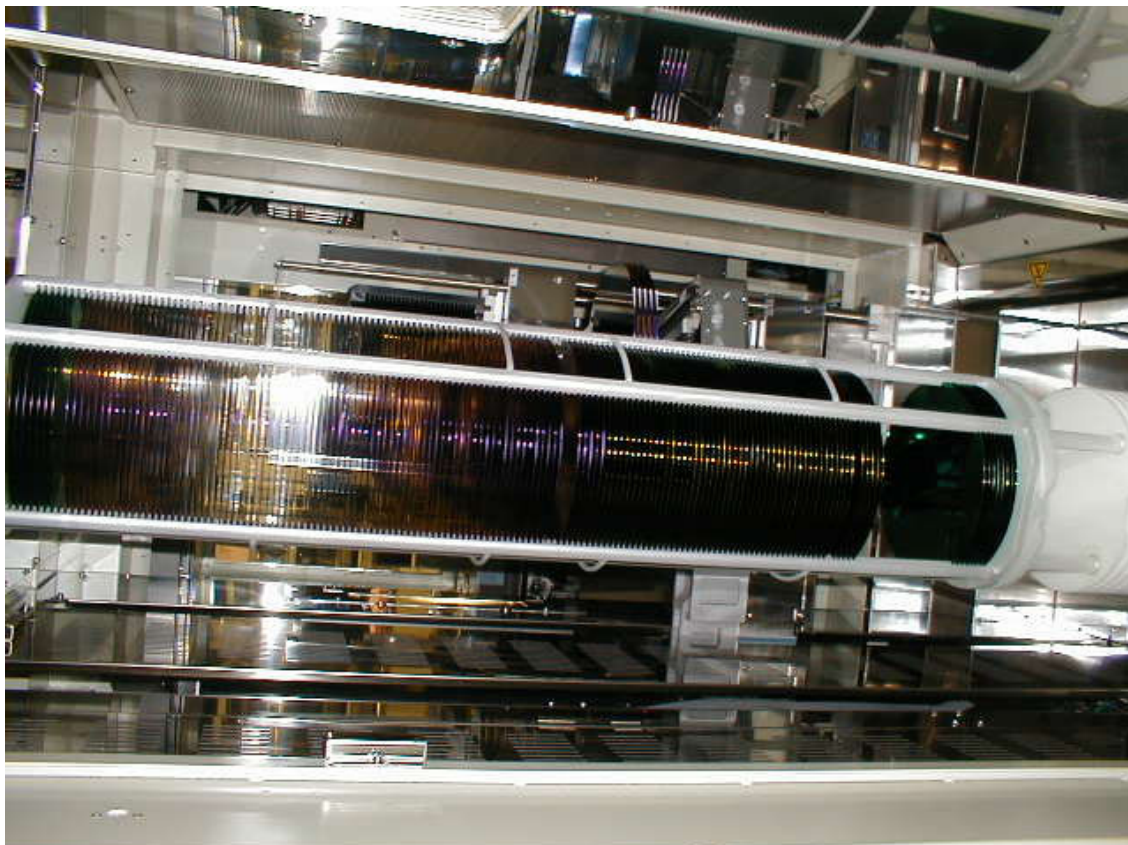
C'est la partie qui s'occupe de faire croître de l'oxyde sur les wafers. Pour cela, on met les wafers dans une nacelle en quartz, le boat, qui est extrêmement fragile. On met ces boats chargés dans des fours (on peut mettre jusqu'à 6 lots dans un four, soit 150 wafers). Cette étape est assez longue : elle peut prendre jusqu'à 10 heures. Les fours chauffent à très haute température pour permettre au silicium de s'oxyder et de former de l'Oxyde de Silicium. Cette étape permet également de faire diffuser les espèces implantées.

Si lors de la cuisson, la résine utilisée en photo n'a pas été bien enlevée sur quelques wafers en gravure humide, les particules qu'elle va dégager dans le fur risquent de contaminer tous les autres wafers, ainsi que l'équipement en quartz qu'il faudra alors changer.

La diffusion revient à chaque fois que l'on ajoute une nouvelle via ou une nouvelle ligne de métal pour les connexions. Il faut constamment surveiller la température des fours car si un four s'arrête, les lots sont, la plupart du temps, irrécupérables.

Il y a un grand nombre de fours, contrairement aux équipements dans d'autres services, car la "cuisson" est très longue et la production ralentirait.

Un boat chargé de plusieurs lots de wafers



3.2 LA PHOTOLITHOGRAPHIE

Ce procédé consiste à créer un motif dans un matériau (oxyde, nitrure,...). Cette étape du procédé est itérative : elle est réalisée plusieurs fois tout au cours de la création du wafer. L'ensemble des deux machines utilisée pour ces trois étapes s'appelle un cluster.

Ce procédé est divisé en trois étapes :

Le dépôt : On dépose un peu de résine sur le wafer en rotation sur un robot, on l'étale afin d'avoir la même épaisseur de résine sur tout le wafer.

Grâce à un solvant, on enlève la résine qui s'est glissée sous le wafer lors de la rotation. Ensuite, on fait tourner le wafer à très grande vitesse pour éliminer le résidus sur les bords.

L'exposition : On réalise un masque que l'on projette sur le wafer (ce masque porte un motif particulier qui permet de travailler sur 6 puces à la fois). Grâce à une lentille, l'image du masque est réduite de quatre fois. On décompose la lumière blanche et on insole la résine avec une certaine longueur d'onde (dans les ultraviolets) qui réagit le mieux avec la résine. Il y a différents modèles de lumière envoyée : on parle de sigma (in et out).

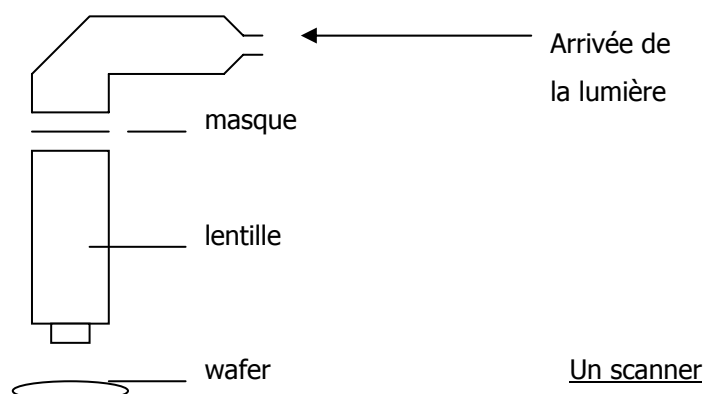
Cette opération est répétée environ 50 fois pour que tout le wafer soit terminé. Le robot effectue cette opération très rapidement, il met 30 secondes pour chaque wafer. La machine utilisée s'appelle un scanner.

Le développement : Une fois que le masque est imprimé sur la résine, on enlève la résine insolée (qui n'a pas été protégée par le masque) grâce à un solvant. Il existe deux types de résine : la résine positive (la partie insolée est enlevée) et la résine négative (la partie insolée est conservée). Ensuite, on rince et on sèche le wafer.

Les paramètres pouvant être modifiés au niveau de l'équipement sont l'illumination, le sigma (modèle de lumière) et l'ouverture numérique de la lentille (NA).

Après ce procédé, il y a une inspection qui vérifie les lots de wafer pour détecter les éventuelles anomalies (décollement de résine, déchirement de la pellicule du masque, manque de résine au centre du wafer,...).

Si des erreurs sont décelées, on enlève la résine, on nettoie le wafer et on recommence le procédé.



3.3 LA GRAVURE

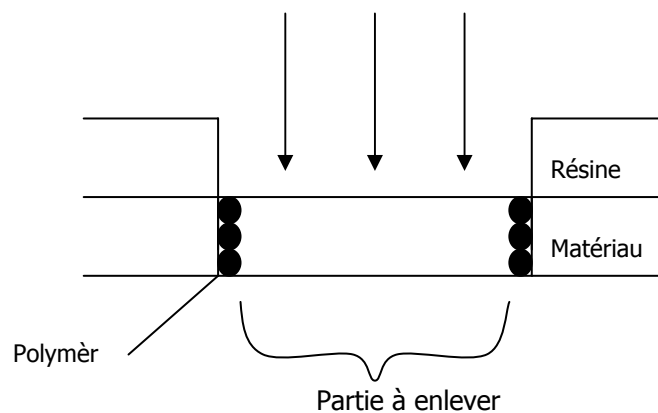
La gravure consiste à retirer (graver) une couche déposée en thin films ou en diffusion. Il existe deux types de gravure : la gravure sèche (dry etch) et la gravure humide (wet etch)

Dry Etch (ou gravure sèche, plasma)

La gravure sèche consiste donc à éliminer un matériel non protégé par la résine à l'aide d'un **plasma**. On crée un champ électrique dans la chambre où se trouve le wafer, et on y ajoute une certaine quantité de différents gaz (qui varient selon l'élément à enlever : aluminium, nitrure, oxyde etc..). Il se passe alors une réaction chimique : des atomes créés réagissent avec les atomes du matériau à graver, et forment des molécules très volatiles qui sont ensuite absorbées par des pompes.

D'autres réactions se créent à l'intérieur du plasma, en particulier la création de **polymères**, résidus issus de la résine et des produits de la gravure (ou de l'implant), qui viennent se coller sur les parois verticales de l'oxyde, empêchant alors la gravure dans cette direction.

On dit que c'est une gravure **anisotrope** : elle ne grave que dans une seule direction, perpendiculaire au wafer. De plus, elle est extrêmement rapide (de 30s à 2mn), et réalisée sur le wafer en une seule fois.



Wet Etch strip (ou gravure humide)

La gravure humide consiste aussi à retirer différents matériaux, mais à l'aide de produits chimiques (sprays ou bains chimiques). On appelle « **strip** » le retrait de la résine photosensible déposée en photolithographie. Cette gravure, qui possède une très grande sélectivité face au matériau à graver, est **isotrope** : elle grave dans toutes les directions.

On inclut aussi dans le « wet etch », les scrubbers qui nettoient les wafers par brossages.

Deux matériaux très souvent gravés en « wet etch » sont l'oxyde de silicium et le nitrure de silicium. Pour retirer des couches de ces deux matériaux, on utilise de l'acide.

Afin de réaliser une bonne gravure, il est nécessaire de respecter certains paramètres tels que :

- la durée de chacune des étapes (acide, rinçage, séchage)
- la température des bains (qui peut être basse ou très élevée selon le matériau à retirer)
- la concentration des bains en acide : un bain trop acide peut ne pas avoir l'effet souhaité
- la durée de vie des bains : il est nécessaire de changer les bains au bout d'un certain nombre d'utilisations.

Des tests sont effectués après chaque gravure afin de vérifier que les plaques ne sont pas salies, que la vitesse avec laquelle les matériaux sont attaqués par l'acide est bien contrôlée et que l'on ne grave pas trop la couche du dessous.

Les Scrubbers

Un « scrubber » est un équipement qui brosse les wafers sous un flux d'eau ou de produit chimique : il allie force mécanique et chimique pour enlever les particules. Il améliore donc le niveau de défektivité.

On utilise les scrubbers après scribe des wafers (créant des petites particules de silicium difficiles à enlever), après CMP tungstène, après certains retraits résine.

Le Strip

Les étapes de « strip » consistent à enlever la résine utilisée pour les étapes de gravure ou d'implant. Il y a différents « strips » selon l'avancement des étapes et la structure de la résine.

En « front end » (avant le dépôt métal), les procédés utilisés pour enlever de la résine non modifiée seront différents de ceux utilisés sur une résine faiblement modifiée (après certaines gravures « dry », « strip » et de faibles implants) ou fortement modifiée (après de forts implants, « strip » et certaines gravures dry).

Il en est de même en « back end », après le dépôt métal. (on n'utilise pas d'acides pour éviter la corrosion du métal).

Les retraits de résine par acide sulfurique dépendent eux aussi de certains paramètres (durée, débit, température et concentration).

Les Ashers

Ce sont des machines qui créent elles aussi un plasma (mais dans un tuyau) qui rend les gaz actifs et qui réagissent avec la résine. Des lampes chauffent le wafer pour activer la réaction. Le produit de la réaction est éliminé par pompage.

Ils sont utilisés pour le retrait de la résine et des polymères, et certains nettoyages / amélioration de l'état de surface du wafer avant photo.

3.4 LE DEPOT

Cette étape consiste à déposer des matériaux conducteurs afin d'établir les **connexions** entre les différents transistors.

On utilise de l'aluminium (connexions horizontales) et du tungstène (connexions verticales).

Des connexions spécifiques seront créées, donc on doit isoler tout autour afin que les électrons n'empruntent pas un autre chemin.

On ajoute donc une couche d'oxyde SiO_2 . On creuse plusieurs trous dans l'oxyde (gravure sèche) qui seront ensuite les points de connexions. On ajoute ensuite une fine couche de Tin pour que le Wf6 se transforme ensuite en tungstène (W). On polit la surface.

Puis il faut ajouter la couche d'aluminium pour relier ces connexions. Pour que le tungstène ne réagisse pas, on ajoute une fine couche de titane (de l'ordre de 0,2 microns) et une fine couche de TiN. On peut ensuite déposer de l'aluminium, puis une couche de TiN à nouveau (afin de ne pas obtenir d'alumine, qui est un isolant). Pour obtenir un chemin spécifique, on utilise le procédé **photo** (résine photosensible) et le procédé **dry etch** (plasma qui attaquera le métal non protégé par la résine).

On isole ensuite les chemins de métal dans de l'oxyde, qui sera poli.

On peut répéter cette étape plusieurs fois. Plus les fonctions sont nombreuses, plus il sera nécessaire de mettre des couches de connexions (chaque couche est reliée à la précédente : la couche 4 ne touche pas la couche 2, elle est en contact uniquement avec la couche 3).

L'élimination d'une partie de l'aluminium est très difficile lorsque les connexions sont très rapprochées les unes des autres.

Une **nouvelle technologie** permet de contourner ce problème. Elle consiste à ne plus creuser les connexions verticales puis les connexions horizontales, mais à tout créer d'un coup. On n'a plus besoin de rajouter une couche de résine photosensible qu'il faudra enlever.

3.5 LA DEFECTIVITE

C'est le service qui s'occupe de repérer tous les défauts sur les wafers.

Un ou plusieurs lots de wafers sont suivis dès le début, à certaines étapes. Des machines transmettent les données qu'elles obtiennent aux techniciens.

Les défauts apparaissant sont classifiés selon s'ils affectent ou non le fonctionnement des puces.

Lorsque les défauts apparaissent, l'équipe cherche à identifier leurs causes. Grâce aux mesures, elle peut savoir à quelle étape sont apparues les erreurs, quels sont les équipements à changer ou quel a été le problème, si une nouvelle recette est stable et ne se dégrade pas au fur et à mesure des étapes.

Par exemple, les erreurs possibles sont :

- un métal qui a fondu/coulé
- des particules qui se sont introduites sur le circuit (= contamination)
- un robot qui n'a pas manié les plaques avec précaution (si le wafer est rayé)
- une machine déficiente
- des bains d'acides trop efficaces/à changer.

3.6 LES STATISTIQUES

Le service statistiques analyse les différentes étapes que subit le wafer au cours de sa création. Il cherche aussi les causes des défauts qui peuvent arriver. Contrairement au service défectivité, le service statistiques travaille grâce à des données fournies par des outils d'analyse et d'extraction comme Ace, par des logiciels comme Workstream et par des méthodes.

Ace est une base de données (outil d'extraction et d'analyse) à laquelle toutes les fab d'Atmel (Colorado, Newcastle,...) ont accès. Cette base permet de faire des analyses sur différents paramètres tels que les corrélations, la comparaison des équipements,...

Mais il existe un autre logiciel créé à Atmel Rousset, StatsExcel, qui permet d'effectuer des analyses statistiques rapides et complètes à partir de données Excel. Ce logiciel permet aussi des analyses systématiques : e-tests hebdomadaires, trends automatiques, calcul de paramètres pour tous les paramètres critiques e-test.

On obtient donc des comparaisons d'équipements à chaque étape de fab (il y en a 300), des comparaisons de familles d'équipements, des analyses d'utilisation cumulée des équipements et des analyses par dates de passage.

Ces logiciels permettent donc de voir quels équipements sont la cause de défauts et à quelle étape du procédé.

Le but des statisticiens est de développer des programmes d'analyse interne très rapides et efficaces pour pouvoir arrêter, nettoyer ou réparer une machine dès le début de la création des wafers afin d'éviter une perte de temps, d'argent et d'énergie.

3.7 LE CONTROLE DE LA PRODUCTION

C'est le service qui suit la production : il donne les instructions aux opérateurs (quelles recettes utiliser, quels équipements utiliser, dans quel ordre), planifie la création des lots, peut faire passer prioritairement certains lots, où mettre les lots abîmés et invendables. Pour ceci, les employés utilisent le logiciel Workstream et un autre logiciel créé dans ce service.

Une autre partie de ce service s'occupe de la programmation et du codage.

Impressions du Stage

Cette semaine de stage à ATMEL m'a permis de mieux percevoir les différentes activités d'une grande entreprise, et de me faire une première opinion des différents métiers possibles.

J'ai beaucoup apprécié de voir tous les aspects de la production et de la fabrication au sein d'une même entreprise, les différentes opérations requises pour fabriquer un seul produit, et les différents moyens de fabrication existants. Ce stage m'a permis d'appréhender le fonctionnement d'une entreprise internationale de cette envergure et les importants enjeux commerciaux (concurrence, délais à respecter, etc...).

Le côté qui m'a un peu déçu est de comprendre que malgré un travail d'équipe, il y a beaucoup de travail individuel dans un bureau, ce qui peut donner un aspect assez monotone.

Je perçois plus clairement comment plusieurs entreprises s'articulent pour en constituer une grande et contribuer à son fonctionnement. J'aimerais beaucoup travailler dans un tel cadre professionnel par la suite.