

La pénurie de semi-conducteurs

Le terme « semi-conducteur » désigne un composant essentiel intégré à des millions d'appareils électroniques utilisés, entre autres, dans les secteurs de l'industrie, de la recherche, des communications, de la santé, de l'éducation, des transports et de l'énergie. Les robots, PC, smartphones, voitures, serveurs de centres de données, consoles de jeu actuels ... dépendent des semi-conducteurs pour leurs opérations de base et leurs fonctionnalités avancées. La 5G, la conduite autonome et tout ce qui touche à la connectivité est gourmand en puces électroniques.

Dans le secteur de l'automobile, Peugeot, Fiat, Citroën, Volkswagen, Ford, Toyota ont annoncé à la fin du mois de septembre 2021 l'arrêt d'une bonne partie de leurs usines. Celle d'Opel à Eisenach, en Allemagne, a stoppé ses machines pour au moins trois mois. Toyota a réduit sa production mondiale de 40 % en septembre 2021 et les analystes prévoient désormais pour le secteur un manque à gagner sur l'année de plus de 200 milliards d'euros.

1- Définition

Un **semi-conducteur** est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé, en physique de l'état solide, à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction.

La conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage, en introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau afin de produire un excès d'électrons ou un déficit. Des semi-conducteurs dopés différemment peuvent être mis en contact afin de créer des jonctions, permettant de contrôler la direction et la quantité de courant qui traverse l'ensemble. Cette propriété est à la base du fonctionnement des composants de l'électronique moderne : diodes, transistors, etc.

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle même s'il existe également des dizaines d'autres semi-conducteurs utilisés, comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium.

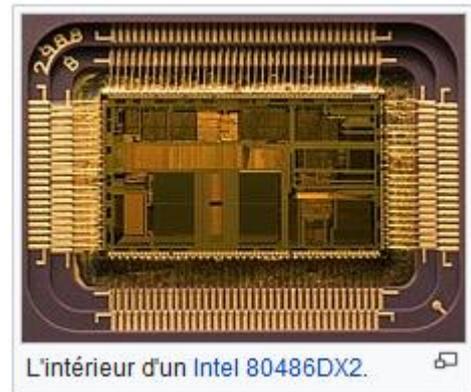
2- Historique

- 1833 : Michael Faraday remarque l'augmentation du pouvoir conducteur de certains métaux lorsque l'on augmente la température, contrairement aux métaux classiques dont la résistivité augmente avec la température.
- 1839 : Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque. Il constate une différence de potentiel en éclairant le point de contact entre un conducteur et un électrolyte.
- 1879 : Effet Hall. Edwin Herbert Hall découvre une différence de potentiel dans le cuivre dans la direction perpendiculaire au courant et au champ magnétique.
- 1931 : Théorie moderne des semi-conducteurs. Alan Herries Wilson décrit les semi-conducteurs comme isolant à faible bande interdite.
- 1947 : John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain découvrent l'effet transistor.
- 1947 : Herbert Mataré et Heinrich Welker développent à Aulnay-sous-Bois, à la CFSW, le premier « transistor français » réellement opérationnel en même temps et indépendamment des travaux des chercheurs américains, entre 1945 et 1948.
- 1951 : Herbert Mataré fonde la première compagnie au monde à proposer sur le marché des diodes et des transistors : Intermetall à Düsseldorf.
- 1954 : Fabrication des premiers transistors en silicium par Gordon Teal de Texas Instruments.
- 1958 : Réalisation du premier circuit intégré par Jack Kilby de Texas Instruments
- 1962 : La technologie MOS (Metal Oxyde Semiconductor) développée par THOMSON révolutionne l'électronique
- 1969 : Invention du microprocesseur par Marcian Hoff et Federico Faggin: un ingénieur et un physicien de Intel. Le microprocesseur traite les données et instructions à une certaine vitesse
- 1971: 1^{er} microprocesseur commercialisable: Intel 4004

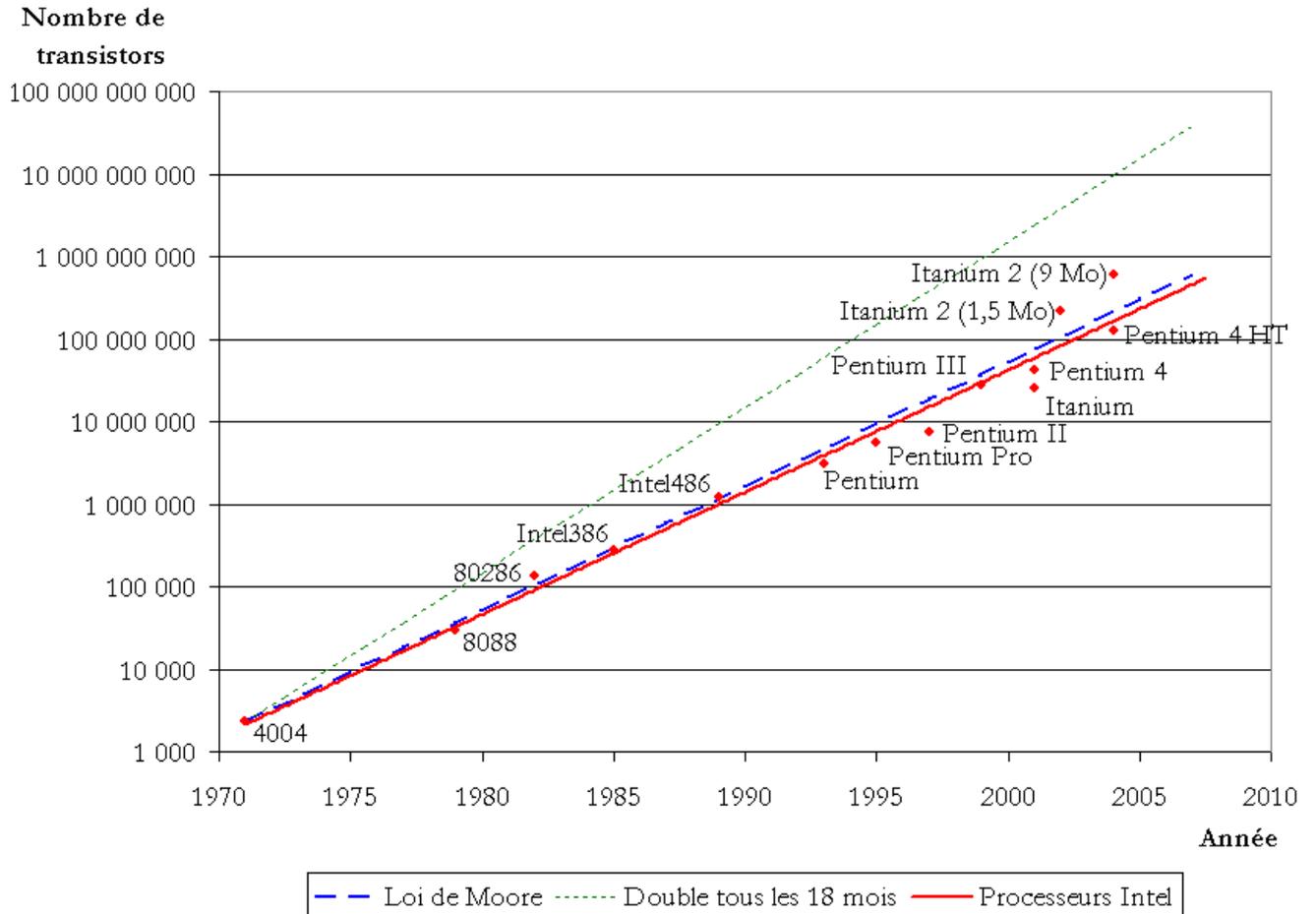
Date	Nom	Nombre de transistors	Finesse de gravure (nm)	Nombre de cœurs	Fréquence de l'horloge	Largeur des données	MIPS
1971	Intel 4004	2 300	10 000	1	740 kHz	4 bits/4 bits bus	0,06
1974	Intel 8080	6 000	6 000	1	2 MHz	8 bits/8 bits bus	0,64
1979	Intel 8088	29 000	3 000	1	5 MHz	16 bits/8 bits bus	0,33
1982	Intel 80286	134 000	1 500	1	6 à 16 MHz (20 MHz chez AMD)	16 bits/16 bits bus	1
1985	Intel 80386	275 000	1 500	1	16 à 40 MHz	32 bits/32 bits bus	5
1989	Intel 80486	1 200 000 (800nm)	1 000 à 800	1	16 à 100 MHz	32 bits/32 bits bus	20
1993	Pentium (Intel P5)	3 100 000	800 à 250	1	60 à 233 MHz	32 bits/64 bits bus	100

1997	Pentium II	7 500 000	350 à 250	1	233 à 450 MHz	32 bits/64 bits bus	300
1999	Pentium III	9 500 000	250 à 130	1	450 à 1 400 MHz	32 bits/64 bits bus	510
2000	Pentium 4	42 000 000	180 à 65	1	1,3 à 3,8 GHz	32 bits/64 bits bus	1 700
2004	Pentium 4 D (Prescott)	125 000 000	90 à 65	1	2.66 à 3,6 GHz	32 bits/64 bits bus	9 000
2006	Core 2 Duo (Conroe)	291 000 000	65	2	2,4 GHz (E6600)	64 bits/64 bits bus	22 000
2007	Core 2 Quad (Kentsfield)	2*291 000 000	65	4	3 GHz (Q6850)	64 bits/64 bits bus	2*22 000 (?)
2008	Core 2 Duo (Wolfdale)	410 000 000	45	2	3,33 GHz (E8600)	64 bits/64 bits bus	~24 200
2008	Core 2 Quad (Yorkfield)	2*410 000 000	45	4	3,2 GHz (QX9770)	64 bits/64 bits bus	~2*24 200
2008	Intel Core i7 (Bloomfield)	731 000 000	45	4	3,33 GHz (Core i7 975X)	64 bits/64 bits bus	?
2009	Intel Core i5/i7 (Lynnfield)	774 000 000	45	4	3,06 GHz (i7 880)	64 bits/64 bits bus	76 383
2010	Intel Core i7 (Gulftown)	1 170 000 000	32	6	3,47 GHz (Core i7 990X)	64 bits/64 bits bus	147 600
2011	Intel Core i3/i5/i7 (Sandy Bridge)	1 160 000 000	32	4	3,5 GHz (Core i7 2700K)	64 bits/64 bits bus	
2011	Intel Core i7/Xeon (Sandy Bridge-E)	2 270 000 000	32	4 à 6	3,5 GHz (Core i7 3970X)	64 bits/64 bits bus	1 ou 2
2012	Intel Core i3/i5/i7 (Ivy Bridge)	1 400 000 000	22	4 à 6	3,5 GHz (Core i7 3770K)	64 bits/64 bits bus	
2013	Intel Core i3/i5/i7 (Haswell)	1 400 000 000	22	4 à 6	3,8 GHz (Core i7 4770K)	64 bits/64 bits bus	
2014	Intel Core i3/i5/i7 (Broadwell)	1 400 000 000	14	4 à 10	3,8 GHz (Core i7 5775R)	64 bits/64 bits bus	
2015	Intel Core i3/i5/i7 (Skylake)	1 750 000 000	14	4 à 8	4 GHz (Core i7 6700K)	64 bits/64 bits bus	
2016	Intel Core i3/i5/i7 (Kabylake)	?	14	4	4.2 GHz (Core i7 7700K)	64 bits/64 bits bus	
2017	Intel Core i3/i5/i7 (Coffee Lake)	?	14	6 à 8	5.0 GHz (Core i7 8086K)	64 bits/64 bits bus	
2019	Intel Core	?	10	4	4.1 GHz (Core	64 bits/64	

	i3/i5/i7/i9 (Ice Lake)				i7-1068NG7)	bits bus	
2019	Intel Core i3/i5/i7/i9 (Tiger Lake)	?	10	4	5.0 GHz (Core i7-11375H)	64 bits/64 bits bus	
2020	Intel Core i3/i5/i7/i9 (Comet Lake)	?	10	8	5.3 GHz (Core i9-10900K)	64 bits/64 bits bus	
2021	Intel Core i3/i5/i7/i9 (Rocket Lake)	?	14	8	5.3 GHz (Core i9-11900K)	64 bits/64 bits bus	
2021	Intel Core i3/i5/i7/i9 (Alder Lake)		14		?	64 bits/64 bits bus	



Cofondateur de la société Intel, Gordon Moore (né en 1929 à San Francisco) avait affirmé dès 1965 que le nombre de transistors par circuit de même taille allait doubler, à prix constants, tous les ans. Il rectifia par la suite en portant à dix-huit mois le rythme de doublement. Il en déduisit que la puissance des ordinateurs allait croître de manière exponentielle, et ce pour des années. Il avait raison. Sa loi, fondée sur un constat empirique, a été vérifiée jusqu'à aujourd'hui. Il a cependant déclaré en 1997 que cette croissance des performances des puces se heurterait aux environs de 2017 à une limite physique : celle de la taille des atomes.



"Comparaison entre l'augmentation théorique du nombre de transistors sur un circuit intégré selon la loi de Moore et l'augmentation réelle sur les processeurs Intel entre 1970 et 2010." © par The original uploader sur le Wikipedia

3- Les fabricants dans le monde

Dans les années 1980-90, les sociétés de fabrication de circuits intégrés investissaient dans leurs propres usines de fabrication, même pour de faibles volumes de production. Mais le coût d'une « fab » de dernière génération augmente continuellement, et dépasse le milliard de dollars. Dans ces conditions, l'industrie s'est spécialisée et il est de plus en plus courant de voir émerger des sociétés dites fabless et des sociétés dites de fonderie.

Les sociétés fabless n'ont pas d'outils de production et sous-traitent la fabrication de leurs puces aux sociétés de fonderie. Les fondeurs ne vendent pas de puces, mais des wafers diffusés. Le sciage et la mise en boîtier sont sous-traitées à d'autres sociétés. C'est pourquoi ils n'apparaissent pas toujours dans le classement des 20 premiers fabricants de semi-conducteurs.

Il existe donc trois types de sociétés de semi-conducteurs :

- les fabricants traditionnels de circuits intégrés communément appelés IDM (Integrated Device Manufacturers) qui réalisent eux-mêmes toutes les étapes de la conception à la

fabrication puis la vente des puces, comme les américains Intel, Texas Instruments, les européens STMicroelectronics ou Infineon, le japonais Renesas.

- les sociétés fabless qui conçoivent et vendent leurs puces, mais sous-traitent leur fabrication à des fondeurs : c'est le cas de Nvidia, Qualcomm, Xilinx, AMD (depuis 2009), ATI, Apple.
- les sociétés de fonderies qui fabriquent les wafers à partir des plans de leurs clients, comme les taiwanais TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. Ltd.) et UMC (United Microelectronics Corp.), GlobalFoundries (à l'origine filiale de AMD et fusionnée avec Chartered Semiconductor) .

De plus, il devient courant de voir des fabricants de circuits intégrés sous-traiter une partie de leur production à ces sociétés de fonderie. C'est par exemple le cas pour Freescale Semiconductor ou Philips, devenu en 2006 NXP. À l'inverse, certains fabricants de circuits intégrés (comme IBM et Samsung) proposent maintenant des services de fonderie à des sociétés fabless.

A la suite de la rupture du quasi-monopole américain au milieu des années soixante-dix, le secteur de la microélectronique a été un des premiers domaines d'activité largement mondialisés en recherche comme en production. Il est donc entièrement soumis aux aléas de la demande mondiale. Son cycle de recherche et de production est particulièrement long et coûteux. Entre le début du développement d'une nouvelle génération de "puces intelligentes" et sa mise en ligne de production, il s'écoule plusieurs années, période pendant laquelle le risque financier est entièrement supporté par les fabricants. Mais ce risque financier, amplement plus pesant que dans d'autres activités, s'accompagne d'un risque industriel non dérisoire. Le moment de mise sur le marché peut être largement décalé par rapport à la conjoncture mondiale, mais également par rapport aux marchés des produits qui incorporent des semi-conducteurs. En conséquence, ces composants, mal connus car microscopiques et dont la fabrication est complexe, pourraient même venir à manquer durablement.

Au début des années quatre-vingts, la production des Etats-Unis représentait 37% de la production mondiale et celle de l'Europe environ 40%. Ces pourcentages sont actuellement tombés respectivement à 12% de la production mondiale pour les USA et à 9% pour l'Europe. L'Asie a pris la principale part du marché mondial de la production de semi-conducteurs. Par contre, ce sont les Etats-Unis qui remportent la palme des ventes, la production de leurs puces étant partagée entre l'Asie et les Etats-Unis.

Voir ci-dessous le tableau de classement des leaders mondiaux des ventes de puces en 2019 et 2020.

2020F Top 15 Semiconductor Sales Leaders (\$M, Including Foundries)

2020 Rank	2019 Rank	Company	Headquarters	2019 Total IC	2019 Total O-S-D	2019 Total Semi	2020F Total IC	2020F Total O-S-D	2020F Total Semi	2020/2019 % Change
1	1	Intel	U.S.	70,797	0	70,797	73,894	0	73,894	4%
2	2	Samsung	South Korea	52,486	3,223	55,709	56,899	3,583	60,482	9%
3	3	TSMC (1)	Taiwan	34,668	0	34,668	45,420	0	45,420	31%
4	4	SK Hynix	South Korea	22,578	607	23,185	25,499	971	26,470	14%
5	5	Micron	U.S.	22,405	0	22,405	21,659	0	21,659	-3%
6	7	Qualcomm (2)	U.S.	14,391	0	14,391	19,374	0	19,374	35%
7	6	Broadcom Inc. (2)	U.S.	15,521	1,722	17,243	15,362	1,704	17,066	-1%
8	10	Nvidia (2)	U.S.	10,618	0	10,618	15,884	0	15,884	50%
9	8	TI	U.S.	12,812	839	13,651	12,275	813	13,088	-4%
10	9	Infineon (3)	Europe	7,734	3,404	11,138	7,438	3,631	11,069	-1%
11	16	MediaTek (2)	Taiwan	7,972	0	7,972	10,781	0	10,781	35%
12	14	Kioxia	Japan	8,760	0	8,760	10,720	0	10,720	22%
13	15	Apple* (2)	U.S.	8,015	0	8,015	10,040	0	10,040	25%
14	11	ST	Europe	6,475	3,058	9,533	6,867	3,085	9,952	4%
15	18	AMD (2)	U.S.	6,731	0	6,731	9,519	0	9,519	41%
Top-15 Total				301,963	12,853	314,816	341,631	13,787	355,418	13%

(1) Foundry (2) Fabless (3) Includes acquired company's sales in 2019 and 2020 results.

Source: Company reports, IC Insights' Strategic Reviews database

*Custom processors/devices for internal

4.1. TSMC

L'État taïwanais a choisi des développements stratégiques pensés sur plusieurs décennies. Il y a une montée en gamme progressive à partir des années 60 avec l'industrie textile jusqu'à l'assemblage de produits électroniques. Dans les années 80, Taïwan commence à assembler des écrans, des souris d'ordinateur, des moniteurs, des PCs. C'est à la fin des années 80 que Taïwan fait le choix de pousser les semi-conducteurs dans cet écosystème de l'électronique. D'où le recrutement de Morris Chang chez TSMC, un homme avec un fort ADN américain : formé à Stanford au MIT et avec une carrière de 25 ans chez Texas Instruments

TSMC, pour Taïwan Semiconductor Manufacturing Company, est aujourd'hui l'entreprise la plus stratégique au monde. Parce qu'elle est pratiquement la seule à savoir fabriquer les puces électroniques de dernière génération. Taïwan, où elles sont produites, est au centre d'un bras de fer entre Chine et Etats-Unis qui pourrait bien déboucher sur un conflit armé. Avions de chasse et cuirassés sillonnent le ciel et les eaux du détroit de Taïwan qui sépare l'île de sa grande sœur communiste. Avec notamment pour enjeu, le contrôle de... TSMC.

TSMC qui fournit 52% du marché mondial des puces électroniques est aux premières lignes d'une pénurie mondiale qui affecte depuis un an plus d'une centaine d'industries. TSMC fait face à des pressions importantes de la part de ses clients, mais aussi des gouvernements américains, européens et japonais, pour augmenter ses capacités de production afin de répondre à cette pénurie.

En avril dernier, le mastodonte taïwanais a annoncé une enveloppe de 100 milliards de dollars (85 milliards d'euros) pour augmenter ses capacités de fabrication dans les trois prochaines années, soit l'équivalent du PIB annuel de l'Equateur. Ses principaux rivaux, l'américain Intel et le sud-coréen Samsung, ont également révélé des investissements conséquents dans de nouvelles lignes de production.

TSMC projette de construire 2 usines à Kahosiung, 3^{ème} ville de Taïwan sur un ancien site pétrochimique. La première unité serait dédiée aux puces de 6/7 nm (dont TSMC détient 85% du marché mondial), et la seconde aux circuits de 22/28 nm. La production, qui doit débiter

en 2024, pourrait servir aux processeurs de Nvidia, AMD ou MediaTek, ainsi qu'à certaines demandes de sous-traitance d'Intel ou de Google.

TSMC est lié à deux grandes universités de technologie taïwanaise qui fonctionnent avec cette industrie. C'est pourquoi lorsque la Chine a cherché à attirer les meilleurs ingénieurs de Taïwan, la réponse taïwanaise a été de créer une loi interdisant aux ingénieurs de la haute technologie d'accepter des emplois en Chine.

Le projet de TSMC est une bonne nouvelle pour le gouvernement taïwanais, qui cherche à retenir sur l'île la production de son fleuron national. Les semi-conducteurs taïwanais, outre leurs retombées économiques, font en effet office de protection face aux menaces d'invasion de la Chine communiste. Les Taïwanais ont même affublé l'entreprise du nom affectueux de "Hu Guo Sheng Shan" : *"la montagne qui protège le pays"*.

Mais satisfaire les projets d'expansion de TSMC reste un défi pour Taïwan. Son territoire, équivalent en taille à celui de la Belgique, est déjà couvert d'usines d'électroniques, très énergivores. Au printemps dernier, une sécheresse inédite avait conduit les autorités à imposer des restrictions d'eau, menaçant directement la production de semi-conducteurs.

Des contraintes qui expliquent en partie le choix de Kaohsiung, située à l'extrême sud du pays, où TSMC ne disposait encore d'aucun site de fabrication. En s'installant à Kaohsiung, TSMC s'adapte à la saturation des terres dans les parcs industriels existants, et cherche à diversifier ses risques en matière d'approvisionnement en eau et en électricité.

Taïwan doit aussi faire face à la volonté des grandes puissances de réduire leur dépendance en matière de semi-conducteurs, après l'électrochoc provoqué par la pandémie. Les Etats-Unis ont ainsi réussi à obtenir de TSMC la construction d'une unité de production de puces dernière génération (5 nm) en Arizona à Phoenix, pour un montant de 12 milliards \$.

L'entreprise taïwanaise étudierait également la possibilité d'installer des sites de production en Allemagne et au Japon, où elle dispose déjà d'un centre de recherche.

En avril 2021, TSMC a annoncé un nouvel investissement de 2,89 Md USD pour augmenter la capacité de production de son usine de Nanjing (Jiangsu) en Chine. Il s'agit de développer la production des semi-conducteurs de 28 nm qui sont principalement destinés au marché de l'industrie automobile.

4.2. SAMSUNG

Le conglomérat industriel Samsung, qui contrôle Samsung Electronics, réalise outre les produits grands publics (téléviseurs, électroménagers, ...) et les Smartphones dont il détient le titre de numéro un mondial, avec 20% du marché mondial, possède une unité de conception et fabrication de semi-conducteurs, marché lui permettant d'assurer la moitié des profits opérationnels de l'entreprise.

Le groupe est déjà le numéro un mondial des puces mémoires DRAM et NAND mais veut grandir sur le marché des puces logiques, telles que les processeurs d'application, les ASIC ou les capteurs Cmos, que le groupe compte produire dans ses fonderies ultra-technologiques pour les autres grands noms de l'électronique mondiale, comme Qualcomm, Nvidia, Google ou Tesla.

Samsung ne dissimule pas sa volonté de dépasser le taïwanais TSMC, qui domine largement ce marché extrêmement lucratif en pleine expansion. Pour atteindre cet objectif, Samsung Electronics prévoit de consacrer, sur les trois prochaines années, une large part de son budget de 175 milliards d'euros d'investissement à sa division semi-conducteurs.

Malgré les difficultés liées à la chaîne d'approvisionnement, Samsung Electronics a annoncé une hausse de plus de 30% de son bénéfice net au troisième trimestre 2021, grâce à une forte demande mondiale.

Samsung Electronics et Micron Technology, deux des plus grands fabricants de puces, ont prévenu que le confinement décrété dans la ville chinoise de Xian, en décembre 2021, en raison de l'épidémie de coronavirus pourrait affecter leurs chaînes de production situées dans la région. Micron Technology produit les puces DRAM, et met en avant la réduction d'effectif dans son usine de Xian. SAMSUNG produit les puces NAND à Xian (mémoire flash pour smartphone), qui représente environ 7% du coût d'un smartphone.

4.3. INTEL



Le géant américain, présent sur les marchés des semi-conducteurs depuis près de 50 ans, lance une nouvelle offensive sur un marché poussé à la concentration et en pleine pénurie liée au contexte du Covid. L'industriel va choisir plusieurs sites sur le Vieux continent, dont deux unités de production à dix milliards d'euros chacune, avant d'en ajouter potentiellement six autres, dans les 10 prochaines années.

Déjà, Intel s'est montré offensif durant l'été 2021 en se plaçant en embuscade pour le rachat d'un autre géant, GlobalFoundries (propriété de Mubadala Investment, une société d'investissement appartenant au gouvernement d'Abou Dhabi), pour environ 30 milliards de dollars.

Ce n'est pas le premier coup d'accélérateur que l'Américain veut mettre sur la production - principalement localisée en Asie. En début d'année 2021, il annonçait son intention d'investir plus de 20 milliards de dollars dans deux nouvelles usines en Arizona, et ce, pour renforcer la production en Occident.

Alors que la part de composants électroniques explose dans les véhicules, Intel prévoit que le chiffre d'affaires des puces électroniques dans l'automobile atteigne 115 milliards de dollars en 2030, contre 50 milliards en 2021.

Depuis la fin 2020 et la levée progressive des restrictions liées au Covid-19 qui ont fait exploser la demande, l'offre de puces peine à suivre. L'Europe essaie aussi désormais de les rapatrier, ce qui est essentiel dans des secteurs stratégiques.

Au salon automobile de Munich, en septembre 2021, Intel a également présenté le premier "robotaxi" de sa filiale de conduite autonome Mobileye, qui devrait tester le transport de passagers dès 2022 dans les rues de la ville bavaroise, en collaboration avec le loueur Sixt.

4.4. ST Microelectronics

STMicroelectronics (souvent appelée simplement **ST**) est une multinationale franco-italienne, dont le siège opérationnel et exécutif est situé à Plan-les-Ouates, près de Genève en Suisse, qui conçoit, fabrique et commercialise des puces électroniques. Elle est l'un des tout premiers acteurs mondiaux du secteur économique de la production de semi-conducteurs. La société est née de la fusion en 1987 de la société italienne SGS - Società Generale Semiconduttori SpA, et de la société française Thomson Semiconducteurs, filiale de Thomson. Initialement nommée *SGS-Thomson*, elle a ensuite été renommée STMicroelectronics en 1998 à la suite du retrait de Thomson du capital.

Après de multiples fusions et désengagement avec d'autres compagnies dans le domaine des semi-conducteurs, des accords de coopération avec des sociétés américaines et asiatiques, entre 2002 et 2007, l'entreprise se stabilise. Elle subit des pertes importantes entraînant début 2016 un licenciement collectif de 1 400 personnes. L'entreprise recentre également sa stratégie sur les applications industrielles et l'automobile notamment, après avoir perdu beaucoup d'argent sur les décodeurs numériques. En 2017, la situation financière de STMicro s'améliore nettement, avec une progression du chiffre d'affaires, des bénéfices et de la marge brute.

Depuis 2018, et particulièrement en 2020 et 2021, les commandes affluent, les chiffres d'affaire et marges se sont très nettement redressés.

4- Processus de fabrication

La fabrication des puces électroniques nécessite des installations et machines très spécifiques pour réaliser toutes les étapes dans un environnement d'ultra propreté, assuré par une salle blanche. Elle doit aussi être amortie pour éliminer les vibrations, et contrôler étroitement la température et l'humidité. Les salles blanches servant à la fabrication de microélectronique et de semi-conducteurs varient de la classe ISO4 (maxi 10000 particules de taille $0,1\mu\text{m}^3$) à la classe ISO2 (maxi 100 particules $0,1\mu\text{m}^3$), selon les processus qui se déroulent à l'intérieur de celles-ci. La plupart des opérations sont robotisées et surveillées à distance, les machines fonctionnant sous atmosphère d'azote.

Partant du silicium, les opérations s'enchaînent en six grandes étapes communes aux procédés de fabrication de tous les composants à semi-conducteurs: l'oxydation, la photolithographie, la gravure chimique, le dopage, le dépôt chimique en phase vapeur et la métallisation.

Viennent ensuite l'assemblage, les essais, le marquage, l'emballage et l'expédition.

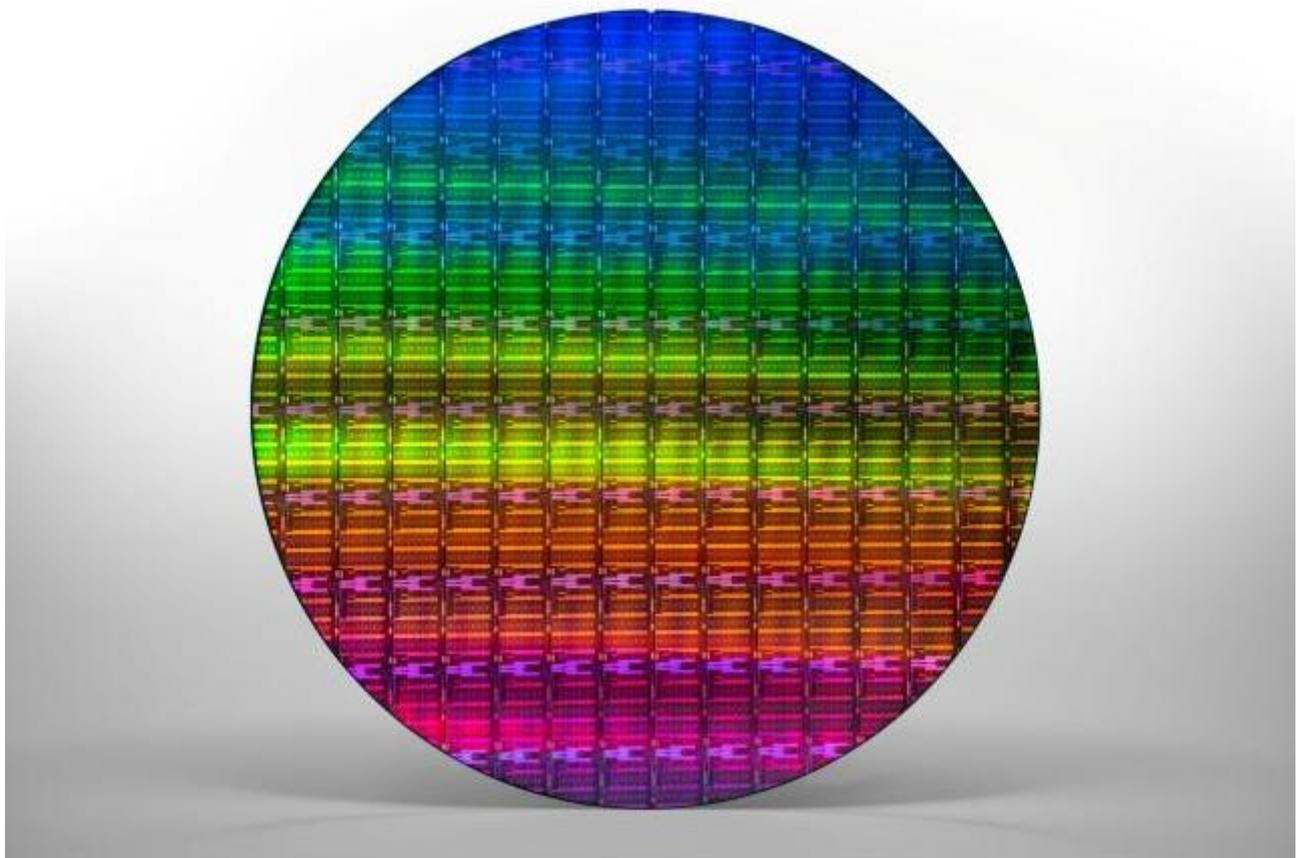
Ce qui fait la complexité du système, c'est le dépôt de couches successives, superposées, qui peuvent atteindre une centaine.



5.1. Wafer

Les wafers se présentent sous forme de tranches circulaires principalement en silicium, destinées à recevoir des couches successives de matériau. Le silicium est obtenu à partir de la silice que l'on trouve en abondance dans le monde. Le silicium utilisé pour réaliser des wafers est extrêmement pur, à plus de 99,99%. Mais l'élaboration d'un silicium très pur a un impact négatif considérable sur l'environnement, du fait de l'extraction de volumes importants de sable, mais aussi des quantités importantes de produits chimiques utilisés (chlore, acides, solvants) générant des effluents. De plus, c'est une industrie très énergivore (160 fois plus d'énergie est nécessaire que pour du silicium de qualité métallique) et qui consomme des quantités considérables d'eau ultra pure.

L'industrie électronique est considérée comme une industrie plus propre que ses voisines (mines, chimie, pétrole) mais en réalité, son impact environnemental est bien plus important en regard de la quantité de ressources, d'eau, d'énergie et de produits toxiques en jeu par unité de produit final.



Au fil des années, le diamètre des wafers s'est accru, passant de 12,7 mm (en 1960) à 300 mm (à partir de 1998) pour des épaisseurs de l'ordre de 0,7 mm. Les wafers subissent des opérations de polissage, traitement chimique et traitement au four à diffusion. L'état de surface final obtenu et mesuré par interféromètre laser, ne dépasse pas 1 nm. Les wafers

servent de support à la fabrication de microstructures par des techniques telles que le dopage, la gravure, la déposition d'autres matériaux (épitaxie, *sputtering*, dépôt chimique en phase vapeur, etc.) et la photolithographie. Ces microstructures sont une composante majeure dans la fabrication des circuits intégrés, des transistors, des semi-conducteurs de puissance ou des MEMS.

On imprime les circuits intégrés, les transistors et les semi-conducteurs de puissance sur ces *wafers* en quadrillage serré afin d'en mettre le plus possible sur un seul *wafer*. Les circuits sont généralement tous identiques sur un même *wafer* bien que certaines techniques permettent de placer des circuits différents, ce qui est utile lors des phases de conception.

5.2 Photolithographie

La lithographie, également appelée photolithographie ou simplement masquage, permet de créer avec précision les impressions sur la plaquette oxydée. Le circuit microélectronique est formé couche après couche, chacune recevant une forme d'impression fournie par l'un des masques composant le circuit complet.

Les procédés de microfabrication des semi-conducteurs sont directement hérités des techniques de l'imprimerie. Ils s'apparentent à la confection de plaques d'impression, généralement métalliques, à la surface desquelles l'enlèvement de matière par attaque chimique produit une forme en relief. Cette même technique de base est employée pour obtenir les masques primaires qui serviront à réaliser chacune des couches de fabrication du composant.

ASML, société dont le siège social est aux Pays-Bas, figure parmi les premiers fabricants mondiaux de matériel de lithographie destinés à l'industrie des semi-conducteurs. Les équipements du groupe sont destinés à l'impression des circuits intégrés sur des plaques très fines de silicium. Le CA par activité se répartit comme suit :

- vente de matériel de lithographie (73,8%). Le groupe propose également des produits et des composants optiques de lithographie. Il figure en position de leader sur les marchés des semi-conducteurs

- prestations de services (26,2%).

La répartition géographique du CA est la suivante : Europe-Moyen Orient-Afrique (3,5%), Taïwan (33,8%), Corée (29,7%), Chine (16,6%), Etats-Unis (11,9%), Japon (3,9%) et Singapour (0,6%).

5.3 Dopage

La formation d'une jonction ou d'une barrière électrique entre les zones p et n d'une plaquette de silicium cristallin est la base du fonctionnement des semi-conducteurs. Les jonctions permettent au courant de circuler beaucoup plus facilement dans un sens que dans l'autre. C'est selon ce principe que fonctionnent les diodes et les transistors de tous les semi-conducteurs. Dans un circuit intégré, une quantité contrôlée d'impuretés élémentaires, appelées dopants, doit être introduite dans certaines zones gravées sélectionnées du substrat de silicium que forme le wafer. Ces dopants peuvent être sous forme solide, liquide ou gazeux. Les techniques de diffusion ou d'implantation ionique peuvent être employées à cet effet.

5.4. Autres opérations

Une fois les puces ou circuits du wafer testés, marqués et triés, les wafers sont découpés en dés qui doivent être physiquement séparés. Plusieurs méthodes ont été mises au point à cet effet: découpe au laser.

Les opérations hors fabrication, qui concernent la pose du boîtier, les fixations, l'encapsulage, l'assemblage et les essais, se déroulent généralement hors des lieux de production, et sont souvent effectuées dans les pays d'Asie du Sud-Est, où ces tâches, qui demandent beaucoup de main-d'œuvre, sont moins coûteuses. En outre, les exigences en matière de qualité de l'air et de teneur en particules sont généralement différentes (il n'est pas nécessaire de disposer d'une salle blanche) dans les zones autres que celles de production. Ces étapes finales de la fabrication comprennent des opérations de brasage, de dégraissage, d'essais avec sources de produits chimiques et de rayonnements, et de décoration et marquage au laser.

5- La course à la suprématie mondiale entre la Chine et les Etats-Unis

L'industrie du semi-conducteur est devenue un terrain d'affrontement capital entre la Chine et les Etats-Unis.

Lorsqu'en 2020, l'administration Trump ajoute coup sur coup Huawei puis SMIC sur la « *Entity List* », l'Amérique tire à boulets rouges sur le semi-conducteur chinois. Huawei est alors le premier fabricant de smartphones au monde. Quant à SMIC, ce n'est autre que le fer de lance de la fabrication de puces électroniques en Chine continentale. L'ajout sur cette liste est fortement incapacitant pour SMIC qui se retrouve privé de composants, produits chimiques et outillages indispensables à la conception et à la fabrication de ses puces.

Les États-Unis ont également fait pression sur les Pays-Bas afin de bloquer la livraison à la Chine de machines dites de lithographie EUV critiques pour le développement des puces les plus avancées. Ces manœuvres géoéconomiques s'inscrivent dans une stratégie plus globale d'abord de rapatriement vers les États-Unis des chaînes d'approvisionnement stratégiques dont font partie les semi-conducteurs, mais aussi du ralentissement du développement technologique de la Chine. En effet, la pénurie en puces électroniques, qui sévit depuis 2020, a révélé la forte dépendance américaine à l'égard des fonderies asiatiques de fabrication de semi-conducteurs. Le 31 mars 2021, le président Biden a donc annoncé vouloir investir 50 milliards de dollars afin notamment de construire plusieurs nouvelles fonderies sur le territoire américain.

En corollaire, Pékin est plus déterminé que jamais à accélérer ses propres efforts pour parvenir à l'autosuffisance. En effet, la Chine accuserait un déséquilibre important entre sa demande locale en puces électroniques et sa capacité de fabrication. Selon un rapport du cabinet spécialisé IC Insights, sur l'année 2020 seul 5,9 % de la demande chinoise est fabriqué par des entreprises chinoises. Si l'on ajoute à cela la fabrication sur le territoire chinois par des entreprises étrangères, la proportion augmente à 15,9 %. La Chine, qui a importé pour 300 mds US\$ en 2020, cherche donc à réduire sa dépendance à l'importation. Déjà en 2015, dans le cadre de son plan « *Made in China 2025* », Pékin annonçait sa volonté d'augmenter sa part de fabrication locale en semi-conducteurs à 40 % pour 2020 et 70 % en 2025. Même si les objectifs n'ont pas été atteints, loin s'en faut en 2020, l'ambition pour une grande réforme nationale est là. En 1958, Mao Zedong met en œuvre une campagne de restructuration de l'agriculture qu'il dénomme le « *Grand Bond en avant* ». Il mobilise l'appareil d'État, la propagande et contraint le peuple à le suivre dans cette campagne. Irréaliste, le « *Grand Bond* » est un tel fiasco qu'il entraînera la « *grande famine* » qui

décimera plusieurs dizaines de millions de Chinois. 30 ans plus tard, Deng Xiaoping entreprend l'ouverture économique de la Chine. Il libéralise le commerce extérieur, réforme les entreprises d'État et stimule l'agriculture. Par sa réforme, il hisse 200 millions de Chinois au-dessus du seuil de pauvreté. C'est un succès indéniable. Dans sa mise en œuvre de grandes réformes nationales, le parti communiste chinois est capable du meilleur comme du pire. Qu'en sera-t-il pour l'industrie du semi-conducteur ?

6.1 Ruée vers le silicium dans toute la Chine

Afin d'aider la nation à atteindre ses objectifs, un fond d'investissement a été créé avec pour mission de financer le secteur à hauteur de 150 milliards de dollars répartis sur 10 ans. Selon Douglas Fuller, professeur en sciences politiques à la City University of Hong Kong, « aucun État n'a investi autant d'argent dans le secteur ». Ce « méga projet », comme il l'appelle, a déclenché une véritable ruée vers le silicium dans toute la Chine. Mais le professeur reste prudent : « Il y a beaucoup de gaspillage. Chaque gouvernement local espère avoir une usine de fabrication dans son canton. » L'élan national n'est en effet pas sans ratés. On citera la mésaventure HSMC qui, après avoir reçu près de 20 milliards de dollars d'investissements entre 2018 et 2019, a finalement dû être mise sous tutelle de l'État pour cause de défauts de paiements.

« La Chine investit beaucoup d'argent, mais pour l'instant on ne constate pas de progrès majeurs, explique Mansun Chan, directeur de recherche à la Hong Kong University of Science and Technology. Le problème ce sont les bureaucrates qui ne restent jamais à leurs postes très longtemps. Leur objectif n'est pas de bâtir une nouvelle industrie nationale mais davantage de se mettre en avant. Ils trouvent un terrain, y construisent de beaux bâtiments, ajoutent une enseigne et prennent une photo. Tout cela pour s'afficher. » Finalement, près d'une dizaine de projets d'envergure, fortement financés par l'État chinois, se sont soldés par des échecs poussant le gouvernement à renforcer le contrôle de cette industrie qu'il qualifie de « chaotique ». Selon Mansun Chan, l'argent ne suffira pas : « Dans ce secteur, il faut du temps et accumuler de l'expérience. Le gouvernement chinois fixe un cap mais ne définit pas de feuille de route. Bien souvent, les objectifs sont inatteignables. » Le chemin vers l'autosuffisance s'annonce long et semé d'embûches.

6.2. Technologies moins avancées

A la croisée des chemins justement se trouve SMIC. Pièce maîtresse des fonderies chinoises, l'entreprise doit décider de son avenir. À son sommet, plusieurs dirigeants jouent des coudes pour briguer sa direction et imposer leur vision. Ainsi, la nomination de Chiang Shang-yi au poste de vice-président n'est pas du goût du co-PDG, Liang Mong-song. Il présentera sa lettre de démission dans la foulée. Ce jeu de chaises musicales traduit une bataille des idées où se joue l'avenir de l'entreprise. Le perdant, Liang Mong-song, incarnait une direction technophile et souhaitait investir davantage en recherche et développement de semi-conducteurs de pointe. Le gagnant, Chiang Shang-yi, préfère se concentrer sur le développement de produits moins avancés mais industriellement matures.

Mansun Chan n'est pas surpris par cette stratégie. Lui-même directeur du laboratoire de fabrication de nanotechnologie de son université, il nous rappelle l'importance du rendement d'une ligne de production : « Sans un bon rendement, la production ne dégage pas de revenus intéressants. Or, pour améliorer le rendement d'une ligne de production de pointe, il faut des années d'expérience. » Le cas SMIC est certainement un bon indicateur de ce qui attend la Chine dans ce secteur hautement compétitif de la fabrication de semi-conducteurs. Des dires

de nos deux spécialistes Fuller et Chan, la Chine va certainement manquer à ses objectifs de production et se retrouver à des années si ce n'est des décennies de réellement maîtriser les dernières technologies en matière de fabrication de puces. Le pays va sans doute se concentrer sur les technologies moins avancées et y prendre des parts de marché.

6.3. *Facture salée pour rapatrier les fonderies aux États-Unis*

Le cabinet de conseil BCG s'est récemment penché sur l'épineuse question du coût d'un rapatriement des fonderies vers les États-Unis. Le coût d'opération d'une fonderie américaine serait ainsi 40 % plus important qu'une fonderie taïwanaise ou sud-coréenne et près de 50 % plus important qu'une fonderie chinoise. Un écart qui fait toute la différence lorsque l'on sait que l'investissement initial et le coût d'opérations étalés sur 10 ans d'une fonderie moderne peuvent grimper jusqu'à 40 milliards de dollars. La facture du rapatriement sera salée ! Selon Douglas Fuller, la proportion des puces électroniques réellement stratégiques pour la sécurité nationale américaine ne représente qu'une infime portion de la production. On pourra citer l'exemple des puces embarquées dans les avions de chasse F-35, actuellement fabriquées par le géant taïwanais TSMC. Au vu des coûts prohibitifs en cause, les Américains auraient donc tout intérêt à identifier les technologies réellement stratégiques et ne rapatrier que celles-ci. Ce scénario semble se vérifier dans une récente annonce de TSMC qui a décidé d'investir 12 milliards de dollars dans la construction d'une fonderie sur le sol américain, en Arizona. Pourquoi une telle décision ? « *Bien évidemment pour des raisons militaires !* » répond, catégorique, Mansun Chan. *Les Américains ne peuvent pas continuer à fabriquer leur matériel militaire à l'étranger. Je pense que la Chine va faire de même et rapatrier la fabrication chez SMIC.* » Un rapatriement oui, mais ciblé sur les technologies les plus cruciales.

Enfin, la course à la suprématie du silicium est avant tout une course au contrôle de la chaîne d'approvisionnement. La contrôler ne signifie pas nécessairement en rapatrier l'intégralité. S'assurer que celle-ci est dans la main d'alliés est un gage de sécurité suffisant dans la mesure où il a fait ses preuves depuis des décennies. Or aujourd'hui, la chaîne d'approvisionnement est partagée entre les États-Unis, l'Europe, le Japon, la Corée du sud et Taïwan, un bloc allié. En face, la Chine semble bien isolée.

6.4. *TSMC, l'une des raisons américaines de défendre Taïwan*

Taïwan justement est une pierre angulaire de l'industrie du semi-conducteur. L'île abrite le plus gros fabricant de puces électroniques au monde, l'entreprise TSMC. Aujourd'hui, cette firme contrôle près du tiers du marché mondial de la fabrication. De plus, l'entreprise a près d'une décennie d'avance technologique sur ses plus gros concurrents. Mais la tension est forte sur l'ancienne Formose et son joyau industriel. Le 2 Janvier 2019, Xi Jinping le clame dans les microphones alignés devant lui : « *Taïwan doit et sera réunie avec la Chine.* » Le président chinois propose à nouveau à l'île le principe « un pays, deux systèmes » calqué sur le modèle hongkongais, mais n'exclut pas l'usage de la force si nécessaire.

Depuis, de l'eau a coulé dans le détroit de Taïwan. La répression des gigantesques manifestations populaires de Hong Kong en 2019, l'instauration par la force de la loi sur la sécurité nationale en 2020 et enfin l'arrestation des démocrates hongkongais en 2021 a définitivement enterré le principe « un pays, deux systèmes ». Avec le seul modèle d'intégration pacifique « *officiellement mort* » des dires de l'ex-président de Taïwan Ma Ying-jeou, et au vu de l'importance capitale de TSMC et donc de Taïwan dans le secteur stratégique du semi-conducteur, la pression est à son comble.

Mais de l'autre côté du Pacifique, les États-Unis veillent au grain. Avec cette nouvelle grille de lecture que nous offre l'industrie du semi-conducteur, certaines des raisons qui poussent les États-Unis à défendre la demeure de TSMC deviennent plus claires. « *TSMC est l'une des raisons pour lesquelles les Américains défendent Taïwan*, confirme Mansun Chan. *Imaginez la perte pour le monde occidental si l'entreprise tombait aux mains des chinois !* » En invitant pour la première fois l'ambassadrice taïwanaise à la cérémonie d'inauguration d'un président américain, Joe Biden a réaffirmé sa volonté de renforcer les liens avec Taïwan.

Dans ce contexte, il est peu probable que la Chine se risque à une attaque militaire contre l'île. D'autant qu'il existe des solutions plus optimales pour arriver à ses fins. En effet, selon la spécialiste Linda Jakobson, l'empire du milieu emploiera « *tous les moyens sauf la guerre* » pour forcer Taïwan à négocier et accepter à terme les conditions d'une réunification. Cela peut inclure les pressions économiques, l'embargo, l'intimidation, la subversion, les cyberattaques voir l'assassinat. L'offensive sur TSMC n'a pas attendu l'analyse de Jakobson pour commencer : entre 2019 et 2020, près d'une centaine d'ingénieurs de TSMC se sont fait illégalement débaucher pour rejoindre les rangs d'entreprises chinoises. La bataille ne fait que commencer.

6- Causes de pénurie des composants dans l'industrie

La pénurie mondiale en semi-conducteurs est apparue en 2020, et est devenue de plus en plus critique. Les causes sont multiples et peuvent être résumées :

- **Vulnérabilité** - La fabrication des puces électroniques est entre les mains de quelques fonderies seulement, et situées sur l'île de Taïwan. Ce quasi monopole confère à l'île une place stratégique dans la guerre économique qui se joue entre les Etats-Unis et la Chine. Depuis la fin des années 1980 et l'envol de l'entreprise TSMC (Taïwan Semiconductor Manufacturing Company), l'archipel garantit environ 70% de la production globale rendant le monde entier dépendant. Le contexte de guerre économique entre Washington et Pékin, place Taïwan aux premières loges de cette concurrence économique entre les 2 puissances.
- **Globalisation** – Certaines tâches, moins nobles, consommatrice en main d'œuvre, telles que l'assemblage, l'encapsulation,...sont sous-traitées à des sociétés ayant des coûts de main d'œuvre moindre, mais augmentent les délais d'approvisionnement. De plus, ces opérations sont plus complexes et délicates, sur des composants plus sophistiqués, multicouches. Ces sous-traitants ont du aussi faire face à l'augmentation des commandes durant la période de pandémie.
- **Effets environnementaux** - TSMC, principal fabricant, détient 52% du marché mondial des puces. Il a subi les conséquences d'une sécheresse sans précédent en 2020 qui s'est abattue sur l'île de Taïwan (la pire des 67 dernières années). Le fonctionnement de l'usine nécessite 150 000 m³ d'eau par jour (capacité moyenne d'une piscine olympique : 3000 m³) malgré un recyclage de 85% de l'eau utilisée. Pendant que les habitants subissaient des restrictions d'eau, avec des coupures de 2 jours/semaine, l'usine était ravitaillée par camions citernes. Ces restrictions d'eau ont eu un impact non négligeable sur la production.
- **Effets de la pandémie** - Pendant la pandémie de COVID19, à partir de mars 2020, les ventes d'automobiles dans le monde se sont effondrées et la production a donc été fortement ralentie, voire arrêtée pendant plusieurs mois. Les commandes auprès des fournisseurs de cette industrie ont été stoppées, voir annulées, ce qui a été le cas aussi

pour les composants électroniques. Les fabricants de puces électroniques ont donc privilégié les fabrications pour l'informatique et le numérique en général, suite à une très forte demande d'ordinateurs et de tablettes pour le développement du télétravail dans les entreprises, le développement de visios, ... ainsi que les consoles de jeux, téléviseurs et autres appareils numériques et dont les ventes ont explosé. L'essor de l'intelligence artificielle, dans tous les domaines, favorise la demande de semi-conducteurs pour les processeurs, microcontrôleurs, mémoires, ... La production de robots a été aussi florissante pour faire face au sous effectif des entreprises. A la reprise de l'industrie automobile, fin 2020-début 2021, les usines de fabrication de semi-conducteurs, déjà submergées par les commandes, ne se sont pas adaptées instantanément au marché de l'automobile, ce qui a provoqué des ruptures de charge et a engendré un fort ralentissement, voir des arrêts de chaînes de montage par rupture d'approvisionnement de composants. Elon Musk, pour Tesla, est intervenu personnellement chez TSMC pour signer des accords, afin de garantir ses approvisionnements.

- Moyens techniques - La conception et l'élaboration des machines de fabrication est concentrée sur quelques sociétés essentiellement européennes (ASML aux Pays-Bas), qui constituent un passage obligé et ont du mal à faire face à l'actuelle très forte demande

Portée par une forte demande sur fond de pénurie, l'industrie des puces continue à jouir des faveurs de la Bourse avec un bond de ses actions de 45 % en 2021. Nvidia se targue de la meilleure performance, se propulsant en tête des capitalisations boursières du secteur, devant TSMC. Deux entreprises européennes figurent dans le Top 10 de la croissance en Bourse en 2021 :

- ST Microelectronic (+44,5%), dont le chiffre d'affaire a atteint en 2021 12,76 mdsUS\$, en augmentation de 25%.
- NXP (+43,8%)

Ces 2 entreprises se sont distinguées face à INFINEON pourtant plus grosse capitalisation boursière européenne dans le domaine des semi-conducteurs.

7- Conclusion

La crise sanitaire a eu un double effet : elle a accentué le besoin d'accélérer cette digitalisation des activités, mais elle a aussi engendré une forte perturbation des chaînes d'approvisionnement de composants électroniques. Les entreprises de toute taille sont affectées et les fronts d'actions ne manquent pas pour accompagner et aider à résoudre leurs problèmes d'approvisionnement mais aussi à progresser dans leur transformation numérique. En s'appuyant sur les chiffres du WSTS, la SIA (association américaine de l'industrie des semi-conducteurs) annonce que les ventes mondiales s'élèveront à 553Md\$ en 2021, soit une augmentation de 25,6% par rapport à 2020. En 2022, il est prévu une croissance de 8,8% pour atteindre 601,5Md\$ de ventes annuelles. L'Europe a, pour sa part, augmenté ses ventes annuelles en 2021 de 27,3%.

Alors que les pénuries de puces devraient persister dans les mois, voire les années à venir, des plans de résilience de l'approvisionnement devraient être élaborés à la fois pour financer et soutenir la conception et la fabrication des semi-conducteurs sur le continent. L'Europe doit aussi s'appuyer sur ses forces technologiques existantes. L'Union européenne abrite déjà des

fabricants de puces et des équipementiers de pointe comme STMicroelectronics, Infineon Technologies, NXP Semiconductors ainsi que Global Foundries avec ses usines allemandes, Intel et ASML. Compte tenu de cette richesse, l'Europe a besoin d'une stratégie durable et solide pour renforcer ces fournisseurs.

Sources de documents :

- Le Monde : article de Philippe Escandre (14 octobre 2021) : l'histoire de l'entreprise taïwanaise TSMC est celle de la mondialisation...et de ses limites
- L'usine digitale : article de Adrien Simore à Taïwan (16 sept 2021) : en pleine pénurie de puces, TSMC prépare la construction d'une immense usine à Taïwan
- Electroniques.biz : article Christelle Eremian (06/12/2021) : les ventes mondiales de semi-conducteurs devraient dépasser 600Mds\$ en 2022
- Wall Street Journal : article de Asa Fitch (13/09/2021) : la crise des semi-conducteurs a propulsé les substrats au rang de superstars
- Wikipédia : semi-conducteur
- Wikipédia : microprocesseur
- Futura-sciences.com : la loi de Moore qu'est-ce que c'est
- Arstechnica.com : article Tim de Chant (24/03/2021): fab fire and drought threaten to make chip shortages worse
- France culture: Taïwan champion du semi-conducteur : entretiens (17/05/2021) avec Mathieu Duchatel directeur du programme Asie à l'Institut Montaigne et Jean-Yves Heurtebise maître de conférence à l'université Fu-Jen à Taipei, chercheur associé au centre d'étude sur la Chine contemporaine et co-rédacteur en chef de la revue Monde Chinois Nouvelle Asie
- Revueconflits.com : article Gavekal (24/05/2021) : semi-conducteurs : la quête de la souveraineté
- <https://ecoinfo.cnrs.fr/2010/10/20/le-silicium-lelaboration-des-wafers/> : l'élaboration des wafers
- Asialyst.com : la course à la suprématie mondiale Chine Etats-Unis : article de Pierre-Arnaud Donet (15/05/2021)
- Advanced Plasma Processing : Etching, Deposition and Wafer Bonding Techniques for Semiconductor Applications- (2010) – Laboratory of Applied Physics California Institute of Technology
- <http://www.ilocis.org/fr/documents/ilo083.htm> : l'industrie de la micro-électronique et des semi-conducteurs