

UNIVERSITÉ ZIANE ACHOUR DE DJELFA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Master

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

Semestre: 2

Unité d'enseignement : UEF 1.2.1

Matière 2 : Capteurs intelligents et MEMS

Chapitre 1 : Rappels sur les capteurs

Définitions.

Mesurande: La grandeur physique qui est l'objet de la mesure et qui est représentée par le symbole "m" .

Les domaines d'évolution sont:

- statique → peu ou pas de changement dans le temps
 - dynamique → évolution continue elle dans le temps
- Mesurage ou mesure: Ensemble des opérations expérimentales qui concourent à la connaissance dans le temps de la valeur numérique du mesurande

1.1 LES CAPTEURS

Définition

C'est un composant qui permet de prélever une grandeur physique (température, pression, vitesse, force, etc.) et de la transformer en grandeur électrique : tension, courant ou charge.

Les différents éléments qui accompagnent le capteur constituent le conditionneur ou transmetteur.

Le conditionneur est l'environnement du capteur qui lui permet de produire le signal image de la mesure.

Exemple : amplificateur d'instrumentation pour le capteur de pression MPX2200 (TP9).

Le signal est disponible en sortie sous forme analogique (ex : sonde Pt100) ou numérique (USB, RS232, CAN, ... ex : LFIIP).

1.1.1. Capteur passif

Il s'agit en général d'une impédance dont la valeur varie avec la grandeur physique, il faut l'intégrer dans un circuit avec une alimentation.

Exemples : résistance à fil de platine (sonde Pt100), thermistance (alerte température dans le SGA, TD11), capteur de niveau capacitif, inductance de fin de course.

1.1.2. Capteur actif

Il est directement générateur d'une tension, d'un courant ou d'une charge à partir de la grandeur physique.

La valeur fournie étant généralement faible, il faudra l'amplifier.

Exemple : photodiodes, phototransistors (capteur de vitesse LFIIP), thermocouples.

1.1.3. Capteur intelligent

Le capteur intelligent est un capteur intégrant une interface de communication bidirectionnelle et un microcontrôleur/DSP.

L'interface de communication permet de commander à distance le capteur et d'en gérer plusieurs ; le microcontrôleur permet de gérer les différentes mesures et de corriger les erreurs dues à des variations de grandeurs physiques parasites (exemple : mesure simultanée de la température pour corriger la dérive thermique).

1.1.4 Propriétés statiques

1. Justesse

Un capteur est juste si ses valeurs ne changent pas quand on les compare à des valeurs étalon, des valeurs données par d'autres capteurs normalisés.

2. Sensibilité S_c

C'est le coefficient qui lie la grandeur physique d'entrée à mesurer à la grandeur électrique de

$$S_c = \frac{d(\text{entrée})}{d(\text{sortie})}$$

Exemple : Capteur de pression (TP9) : $V(P) = a.P + V_0$ (P : pression) =>
 $S_c = dV/dP = a = 1\text{mV/hPa}$.

3. Linéarité

Un capteur est linéaire si sa sensibilité est constante. La relation entre grandeur physique à mesurer et grandeur électrique est alors linéaire (équation d'une droite).

Exemple : variation de la résistance avec la température :

Cas d'une résistance à fil de platine (sonde Pt100):

$R(T) = R_0 (1 + a T)$ => $S_c = dR/dT = a.R_0 = 0,385\Omega/^\circ\text{C}$ est une constante => capteur linéaire.

Cas d'une thermistance (matériau semi-conducteur – TD12) :

$$R(T) = a \cdot e^{b/T} \Rightarrow S_c = \frac{\partial R}{\partial T} = -\frac{ab}{T^2} e^{\frac{b}{T}} \Rightarrow S_c \text{ dépend de } T \Rightarrow \text{capteur non linéaire.}$$

4. Fidélité

Un capteur est fidèle si ses valeurs ne changent pas au cours du temps (mesures reproductibles) : si on mesure deux fois la même grandeur à deux moments différents, on doit obtenir deux fois la même valeur.

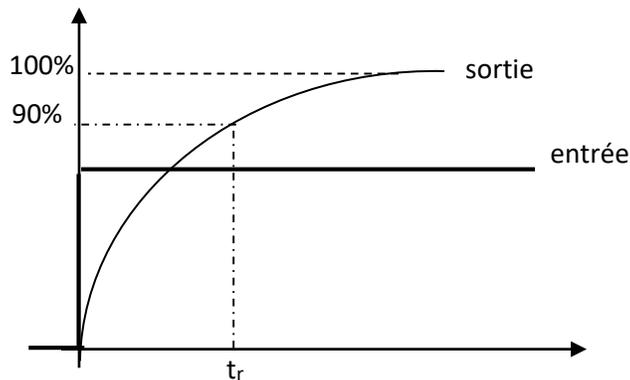
5. Plage de mesure

C'est la gamme des valeurs d'entrée qu'il peut traiter sans dégrader son fonctionnement.

1.1.5 Propriétés dynamiques

1. Rapidité/temps de réponse

Un capteur est caractérisé par son temps de montée t_m (ou t_r : rise time) à 90% ou 95% : c'est le temps au bout duquel la sortie atteint 90% ou 95% de sa valeur finale quand la grandeur d'entrée est un échelon.



Exemple : quelques secondes pour la sonde Pt100.

Bande passante

C'est la plage de fréquence pour laquelle le fonctionnement du capteur est correct.

On lui applique une variation périodique de la grandeur physique d'entrée, on mesure la sortie associée et on trace la sensibilité du capteur en fonction de la fréquence (sensibilité dynamique).

Ceci permet de mesurer sa bande passante à -3dB.

1.2. Grandeurs mesurables

Une grandeur est définie comme attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance chimique, physique ou biologique, qui est susceptible d'être distinguée qualitativement et déterminée quantitativement (tirée de la Norme française NF X 07-001 de décembre 1994 "Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie").

La grandeur est caractérisée par une valeur numérique et une unité, qui sont indissociables.

Ainsi, attribuer une valeur numérique à une grandeur sans en préciser l'unité n'a aucun sens.

On peut classer les grandeurs en deux catégories: les grandeurs mesurables et les grandeurs repérables

Grandeur mesurable : Une grandeur est dite mesurable si on peut lui affecter une valeur numérique à partir d'observations. En outre, la somme et/ou le produit de grandeurs mesurables a une signification. Parmi les grandeurs mesurables, on peut citer la longueur, la température absolue, la résistance,...

Grandeur repérable : Une grandeur est dite repérable si la somme et le produit de cette grandeur n'ont pas de sens. Parmi les grandeurs repérables, on peut citer la température centésimale ($^{\circ}\text{C}$), la date, le potentiel électrique,...

Dimension : La dimension caractérise la nature de la grandeur et définit les unités utilisables.

On peut ramener la dimension de grandeurs physiques, chimiques ou biologiques à une combinaison de sept grandeurs fondamentales:

Longueur (L)

Masse (M)

Temps (T)

Intensité de courant (I)

Température thermodynamique (θ)

Quantité de matière (N)

Intensité lumineuse (J)

Unité : L'unité est l'expression de la dimension qui permet de quantifier la grandeur.

La dimension et l'unité doivent donc être cohérentes entre-elles. Une grandeur possède une unique dimension mais peut être exprimée en plusieurs unités.

Par exemple, la vitesse linéaire a pour dimension $L.T^{-1}$ et peut être exprimée, entre autres, en $m.s^{-1}$ ou en $km.h^{-1}$.

Grandeurs de base

dimension	unité SI
longueur (L)	mètre (m)
masse (M)	kilogramme (kg)
temps (T)	seconde (s)
courant électrique (I)	ampère (A)
température	Kelvin (K)
quantité de matière	mole (mol)

Unités dérivées

grandeur	dimensions	unités SI	autre nom
force	M.L.T-2	kg.m.s-2 = J.m-1	newton (N)
pression	M.L-1.T-2	kg.m-1.s-2 = N.m-2 = J.m-3	pascal (Pa)
puissance	M.L2.T-3	kg.m2.s-3 = J.s-1	watt (W)
charge électrique	I.T	A.s	coulomb (C)
potentiel électrique	M.L2.T-3.I-1	kg.m2.s-3.A-1 = J.C-1	volt (V)
résistance électrique	M.L2.T-3.I-2	kg.m2.s-3.A-2	ohm (Ω)
champ électrique	M.L1.T-3.I-1	kg.m1.s-3.A-1 = V.m-1	
capacité électrique	M-1.L-2.T4.I2	kg-1.m-2.s4.A2 = C.V-1	farad (F)
fréquence	T-1	s-1	Hertz (Hz)

1 .3. Classification des capteurs

On peut classer les capteurs de plusieurs manières :

par le mesurande qu'il traduit (capteur de position, de température, de pression, etc)

par son rôle dans le processus industriel (contrôle de produit finis, de sécurité, etc)

par le signal qu'il fournit en sortie qui peut être numérique ou analogique.

par leur principe de traduction du mesurande (capteur résistif, piézoélectrique, etc)

par leur principe de fonctionnement : capteur Actif ou Passif

Toutes ces classifications permettent d'avoir une vue d'ensemble des capteurs et bien sur aucune des méthodes de classification n'est meilleure que l'autre car toutes présentent des avantages et des inconvénients.

Dans la suite de notre cours, nous avons décidé de classer les différents capteurs par le mesurande qu'il traduit. Nous aurions très bien pu faire d'une autre manière mais celle-ci nous paraissait être la plus avantageuse pour nous.

1.3.1 Les différents types de capteurs

1) Les Capteurs de Lumière

- La Photorésistance : Résistance dont la valeur varie (diminue en général) en fonction de l'intensité lumineuse.

→ Utilisé notamment pour faire varier la lumière artificielle en fonction de la lumière du jour.

- La Photodiode : Diode qui lorsqu'elle est polarisée en inverse, produit un courant (IR) qui augmente proportionnellement à l'intensité lumineuse.

→ Utilisé dans la fibre optique.

- Le Phototransistor : transistor dont la base est sensible aux rayonnements lumineux. Il crée un courant lorsque qu'il est éclairé sa sensibilité est entre 100 et 400 fois supérieure à celle d'une photodiode mais le courant d'obscurité est aussi plus important. De plus la constante de temps est plus importante (base plus épaisse) et donc la fréquence de coupure plus basse que celle des photodiodes.

→ Utilisé dans les optocoupleurs.

- La Capteur Photographique : Il convertit un signal rayonnement électromagnétique (UV, visible ou IR) en un signal électrique analogique.

→ Utilisé dans les appareils photos afin de convertir une lumière en un signal qui sera numérisé afin d'obtenir une image numérique.

2) Les Capteurs de Force

Les capteurs de force sont des capteurs de type, jauges de contrainte. La jauge de contrainte est une pièce qui sous l'effet d'une force va s'étirer longitudinalement.

Elle est utilisée principalement pour la pesée d'objet ou de personne, ou pour mesurer des efforts de traction et de compression.

Il y a différentes types de capteurs à jauges de contraintes tel que:

- les capteurs de mesures de flexions qui sont des capteurs de force précis & stables de type à flexion, généralement d'étendue de mesure allant de 0.5N à +/- 125N. Ils trouvent généralement leurs applications dans des mesures de forces avec un encombrement réduit.

- capteurs de mesures de tractions & de compression:

● en "s" qui sont des capteurs conçus pour mesurer des efforts de 0N à ± 20000 daN. On les retrouve généralement dans des applications de mesures de tractions et de compressions.

● Pan-Cake qui est un capteur conçu pour les mesures de poids allant de 0kg à 100tonnes. On les trouve aussi dans des mesures de tractions et de compressions.

- Etalons pouvant mesurer de 0N à 30 MN. Il est utilisé pour la même chose que le précédent, donc les mesures de tractions et de compressions.
- Miniature mesurant de 0kgf à 5000kgf. Retrouvé dans des applications telles que la pesée de camion, silos, réservoirs...

3) Les Capteurs de Son

Entendre la voix d'un ami, cela peut sembler banal. Pourtant ce n'est pas possible sur la lune.

En effet, le son est une onde, une vibration qui se propage dans un milieu matériel en l'occurrence dans l'air. Ce sont les molécules qui en se serrant puis en s'écartant permettent au son de se propager. Sur la lune, il n'y a pas d'air donc pas de son. Le premier microphone a été inventé le 4 mars 1877 par Emile Berliner, mais c'est Alexandre Graham Bell qui inventa le premier microphone réellement utilisable.

Les trois types de micro (électrodynamique) :

- Le microphone dynamique à bobine mobile :

Une membrane vibre suivant les molécules d'air, cette membrane entraîne en vibration une petite bobine de cuivre dans l'entrefer d'un aimant, ce qui produit une petite tension induite aux bornes de la bobine qui sera ensuite exploitée pour le traitement. Ce type de micro ne nécessite pas d'alimentation la tension image du son et produite directement par la bobine.

Le Shure SM-58 est un microphone dynamique cardioïde unidirectionnel pour voix. Le SM-58 est considéré comme le micro chant de référence pour la sonorisation live. Il est robuste et bon marché.

Pression acoustique= 1Pa=94 dB SPL

Bande passante 50Hz à 15 000 Hz

Impédance 150ohm

- Le microphone électrostatique à condensateur :

Cette technologie est une référence en matière de réponse transitoire.

Le microphone électrostatique à électret est un proche voisin du micro à condensateur mais qui possède un composant à polarisation permanente.

Pression acoustique=140dB SPL

Bande passante 20Hz à 20 000Hz

Impédance 150ohm

- Le microphone électrostatique magnétique :

Il est utilisé principalement sur les guitares électriques, les basses les pianos électriques ou encore les violons électriques, pour capter la vibration des cordes métalliques.

Le champ magnétique de l'aimant traverse notamment la bobine, laquelle est soumise aux variations de ce champ induit par les cordes en mouvement – elles jouent le rôle d'un diaphragme mobile qui fait varier la force contre-électromotrice parcourant la bobine. Ces micros ne peuvent pas directement produire de tension en sorti il est nécessaire de leur apporté une alimentation appeler alimentation fantôme.

4) Les Capteurs de Vitesse

- Tachymétrie (génératrice tachymétrie)

Elle délivre une tension proportionnelle à sa vitesse de rotation. Son principal domaine d'application se situe dans la régulation de vitesse d'un moteur électrique.

- Codeur incrémental

Principe: une lumière émise par une diode électroluminescente est réfléchiée par les graduations d'un disque vers un phototransistor qui se sature et se bloque à la cadence du défilement des graduations.

Découplément mécanique Butterworth 2nd order, $Q=0,6$

Impédance nominale 1500Ohm/1000Hz

Courbe de réponse 60 à 18kHz +/- 3dBu

Dynamique 139 dB, 145 dB typique

Equivalence sortie bruit 16dB/0dB=0,002dyn./cm²

Sensibilité 20mV/g

Sensibilité (sur instrument) ca.-30dBu

Température supportée -20° à +70°C

Contacts Or

Connectique XLR symétrique

Longueur de câble 1,80m

Le codeur incrémental est surtout utilisé dans les systèmes dont le traitement de l'information est entièrement numérique. Ses impulsions sont comptabilisées de façon à donner une information concernant la position (nombre d'impulsions délivrées depuis une position d'origine) ou /et une information concernant la vitesse (nombre d'impulsions par unité de temps). Dans ce dernier cas, il évite l'emploi d'une génératrice tachymétrique (il est cependant peu précis aux très basses fréquences de rotation).

5) Les Capteurs Météorologiques

- Capteur de Température

Les applications sont nombreuses : appareils électroménagers (four, réfrigérateur,...), automobile (moteur, habitacle), l'industrie de transformation (plastique, alimentaire, chimie, automobile, électronique,...) et les installations de chauffage urbain ou industriel.

- Les thermocouples :

Il existe des thermocouples J (fer/constantan), K (Nickel chrome / nickel allié), S (platine /platine rhodié), ...

La tension produite est faible et doit être amplifiée pour être exploitable. Mais de fait dans un usage réel il y a 3 métaux, les 2 servant à la mesure et le câble de connexion, typiquement du cuivre. Le montage réel part donc avec un "alliage" cuivre, connecté au premier métal, de là à la soudure froide, de cette soudure part le second métal vers la soudure chaude.

Sondes thermocouples :

Où se trouve-t-il ?

Les thermocouples se trouvent dans les fours (le thermocouple est une sécurité qui autorise le maintien du gaz uniquement si la flamme est présente, il est obligatoire dans tous les fours gaz depuis quelques années).

· Les sondes à résistances utilisent la variation de résistivité d'un matériau en fonction de la température. Aux valeurs mesurées (ohms) correspondent des températures suivant une norme internationale. L'information est récupérée par un indicateur et/ou régulateur de température. Il existe entre autre des sondes platine (PT 100) normalisées, des sondes à thermistances...

Ex. : Un pyromètre optique pour des températures élevées

● La diode et le transistor

La diode et le transistor peuvent être utilisés comme capteur de température. La tension présente aux bornes d'une jonction PN, sous un courant constant, est en effet dépendante de la température. La variation de la tension est de l'ordre de 2 mV/°C. Exemple d'utilisation d'un transistor comme capteur de température : le Thermomètre 002.

- Capteur de pression

Il existe deux types de capteur de pression : les capteurs de pression absolue, et les capteurs de pression différentiels. Ce type de composant est généralement construit autour d'une "puce" composée d'un élément piezorésistif au silicone, qui permet de délivrer une tension continue proportionnelle à la pression mesurée, avec une très bonne linéarité.

Les capteurs de pression peuvent être utilisés pour la réalisation d'altimètres ou de baromètres, mais leur usage ne s'arrête pas là : on en trouve aussi en robotique, dans le domaine médical, dans des systèmes de contrôle de pompes. Certains capteurs peuvent travailler sur une plage de mesure de 0 à 100 hPa, d'autres sont capables de travailler entre 0 et 2 bars (200 kPa).

Exemples : capteurs Motorola série MPX2010, MPX2100, MPX2101, MPX2200, MPX2201, MPX5100.

● Capteurs de pression absolue

Les capteurs de pression absolue sont, comme leur nom l'indique, capable d'effectuer une mesure de pression en un point donné.

● Capteurs de pression différentiels

Les capteurs de pression différentielle sont dotés de deux entrées de mesure, et la tension qu'ils délivrent est proportionnelle à la différence de pression entre les deux entrées.

Ces entrées peuvent être toutes deux raccordées par un tuyau jusqu'à l'emplacement où la mesure de pression d'air est désirée, mais on peut aussi laisser libre une des deux entrées pour effectuer une mesure différentielle directe par rapport à la pression d'air ambiante.

- **Capteur d'hygrométrie (capteur d'humidité)** Appelé aussi Humidistance, ce type de composant permet une mesure d'humidité relative. La plage de mesure possible est généralement de 20% à 80%, mais certains capteurs (bien plus chers) sont toutefois capables de travailler sur une plage de mesure de 10% à 90%. La précision est de l'ordre de quelques pourcents.

Remarque : certains capteurs d'hygrométrie sont montés sur un circuit imprimé qui associe un convertisseur analogique / numérique.

6) Les Capteurs de Position

- Les capteurs de position

Les déplacements ou les positions que l'on mesure peuvent être linéaires ou angulaires. Les deux types de mouvement peuvent être convertis l'un dans l'autre grâce à des dispositifs mécaniques (crémaillère, vis sans fin, ...), mais ceux-ci entraînent des erreurs (jeux, hystérésis, influence de la température, ...).

On considèrera également les capteurs à sortie analogique et les capteurs à sortie binaire ou digitale.

La plupart des capteurs de déplacement à sortie analogique sont des capteurs à impédance variable.

Les capteurs à résistance variable :

- potentiomètre linéaire = déplacements de qq. millimètres à plusieurs dizaines de centimètres
- potentiomètre angulaire = déplacements de qq. degrés à une dizaine de tours
- jauges extensométriques = micro-déplacements.
- Capteur effet hall

Un capteur a effet hall sert a capter la position de l'arbre a came pour VILEBREQUIN

- Capteurs capacitifs

Un changement de capacité peut être induit par une variation de permittivité du milieu entre les armatures. La variation de permittivité peut être due à une variation de niveau d'un liquide entre les armatures du condensateur et permet de mesurer ce niveau.

La variation de distance entre les armatures traduit des déplacements rectilignes. Le condensateur à écartement variable ne peut être utilisé que pour des étendues de mesure faibles (en général inférieures au mm). La capacité varie en fonction inverse de la distance.

La variation de surface est réalisée dans un condensateur plan avec une armature tournante ou dans un condensateur cylindrique dont une armature coulisse le long de l'axe. Le condensateur à surface variable a une étendue de mesure supérieure au cm.

L'influence des capacités parasites des armatures du capteur avec les surfaces métalliques voisines de même que celle des câbles de liaison est importante. L'utilisation de circuits électroniques de conditionnement connectés directement au capteur permet de réduire ces influences.

- Accéléromètre

Ces deux réglages permettent de transformer le capteur en accéléro peu sensible à la pesanteur ou bien en inclinomètre extrêmement sensible à l'inclinaison par rapport à la verticale.

Principe des réglages :

Axe 1 : le réglage du niveau de zéro est le plus près du connecteur, la sensibilité est le plus loin.

Axe 2 : le réglage du niveau de zéro est le plus loin du connecteur, le gain est le plus près.

Les réglages de gain des deux axes sont côte à côte.

Flèche montante ou descendante : indique le sens de variation du paramètre quand on tourne le potentiomètre dans le sens des aiguilles d'une montre.

Un capteur d'accélération est toujours sensible aussi à l'inclinaison. C'est une caractéristique inhérente à son principe de mesure. L'inclinaison traduit en effet l'accélération de la pesanteur.

En réglage accéléromètre, le capteur est très réactif pour la détection des mouvements rapides, surtout des gestes brusques. Il mesure aussi l'inclinaison mais y est peu sensible. Lorsque le gain augmente, la composante inclinaison augmente. Un réglage moyen donne un inclinomètre pleine course de la verticale dans un sens (-180°) à la verticale dans l'autre ($+180^\circ$). Un gain maximal donne une très grande sensibilité à l'inclinaison, avec un signal pleine course pour quelques degrés de pente.

Chapitre 2 : Capteurs intelligents

Le développement industriel nécessite une instrumentation coûteuse et la maîtrise des procédés de fabrication.

et de la qualité des produits finis → mise en place de capteurs sur l'ensemble de procédé de fabrication :

La capacité du capteur à tenir compte de son environnement, et à définir son état de fonctionnement et une Introduction d'une capacité locale de calcul grâce à la miniaturisation → Capteurs Intelligents

Définitions :

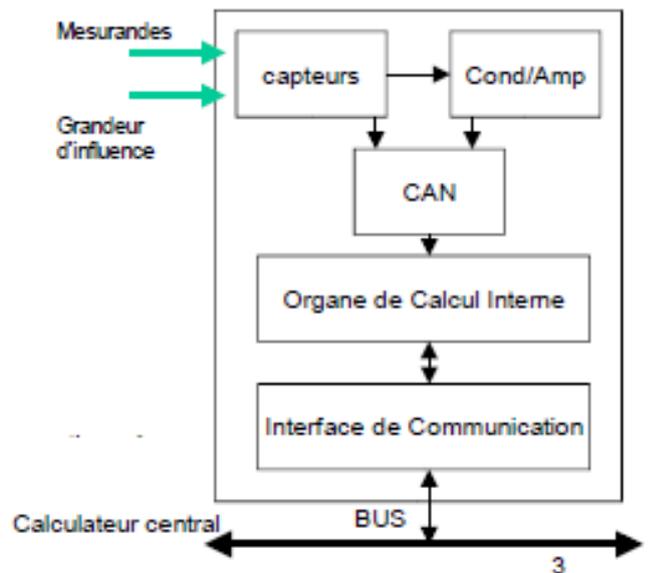
. Propriétés statiques et dynamiques. Structure interne d'un capteur intelligent : Circuits de conditionnement, Organe de traitement des données, Interface de communication. Métrologie des capteurs intelligents : Calibration, Précision et validation des mesures, Mise en service à distance, Autodiagnostic. Réseaux de capteurs

Donc un Capteur Intelligent est un système composé de plusieurs sous-systèmes dont les fonctions sont clairement distinctes dont les principaux sont :

- un ou plusieurs capteurs
- les conditionneurs associés
- organe de calcul interne
- interface de communication

Différence Capteur intelligent / capteur classique

- Capacité de calcul interne
- Interface de communication bidirectionnelle



2.1. Structure d'un capteur intelligent

Les capteurs intelligents intègrent des fonctionnalités supplémentaires leur permettant de relier le monde physique avec le monde numérique en capturant et en révélant des phénomènes physiques du monde réel et la conversion de ceux-ci dans une forme qui peut être traitée et stockée dans le but d'agir et de prendre une décision.

Un Capteur sera intelligent lorsqu'il sera capable en plus de participer au système de contrôle, permis par une interface de communication bidirectionnelle. Il est également capable d'envoyer sa mesure à la demande ou de manière systématique à destination du système qui devra l'exploiter. En outre, ce système doit être reconfigurable et capable d'effectuer l'interprétation de données nécessaires, diagnostic avancé, la fusion de données provenant de multiples capteurs et la validation des données locales et recueillies à distance. Le capteur intelligent contient donc une fonctionnalité de traitement embarquée qui fournit des ressources de calcul pour effectuer des tâches de détection et d'actionnement plus complexes avec des applications de haut niveau. Cette différence est illustrée par la figure I.1

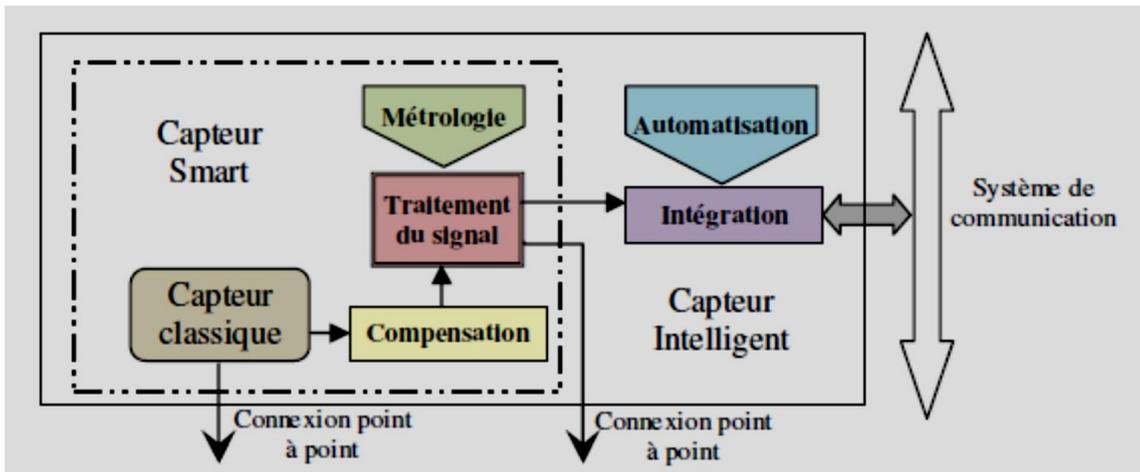


Figure 2.1 Architecture générale d'un capteur intelligent

D'un point de vue matériel, un capteur intelligent se compose alors de quatre unités montrées sur la figure 2 .2

- 1) Un capteur principal spécifique au mesurande avec ses dispositifs d'acquisition et de numérisation du signal de sortie du capteur : transducteur, conditionneur qui adapte le signal électrique en vue de sa transmission, multiplexeur, amplificateur, échantillonneur bloqueur, convertisseur analogique/numérique ;
- 2) Un organe de calcul numérique (microcontrôleur, microprocesseur, dsPIC) servant au calcul et à la gestion de l'acquisition, la correction des effets des grandeurs d'influence au moyen de paramètres stockés en mémoire PROM, la linéarisation, le diagnostic des capteurs ;
- 3) Une interface de communication assurant la liaison du capteur à un ordinateur central et permettant un dialogue bidirectionnel de données numériques avec le système d'automatisation.

Cette interface radio ou filaire est caractérisée par :

- plage fréquentielle ;
- technique de modulation ;
- type de multiplexage ;
- type de canal ;

-étalement de spectre ;

4) Une alimentation assurant une stabilisation des tensions est nécessaire à l'électronique de l'instrument. Une batterie peut être envisagée pour maintenir certaines activités en l'absence de source d'énergie extérieure (horloge, mémoire,...).

Le transducteur permet de détecter toute variation de la grandeur physique en entrée du capteur. Sa conception est étroitement liée au domaine d'application pour lequel le capteur sera utilisé. L'interface de communication permet également au capteur intelligent de recevoir les informations

du système nécessaires à l'élaboration de sa mesure et à sa validation. Elle peut également être utilisée dans les phases de calibration et de mise en service de l'équipement dans son environnement du travail.

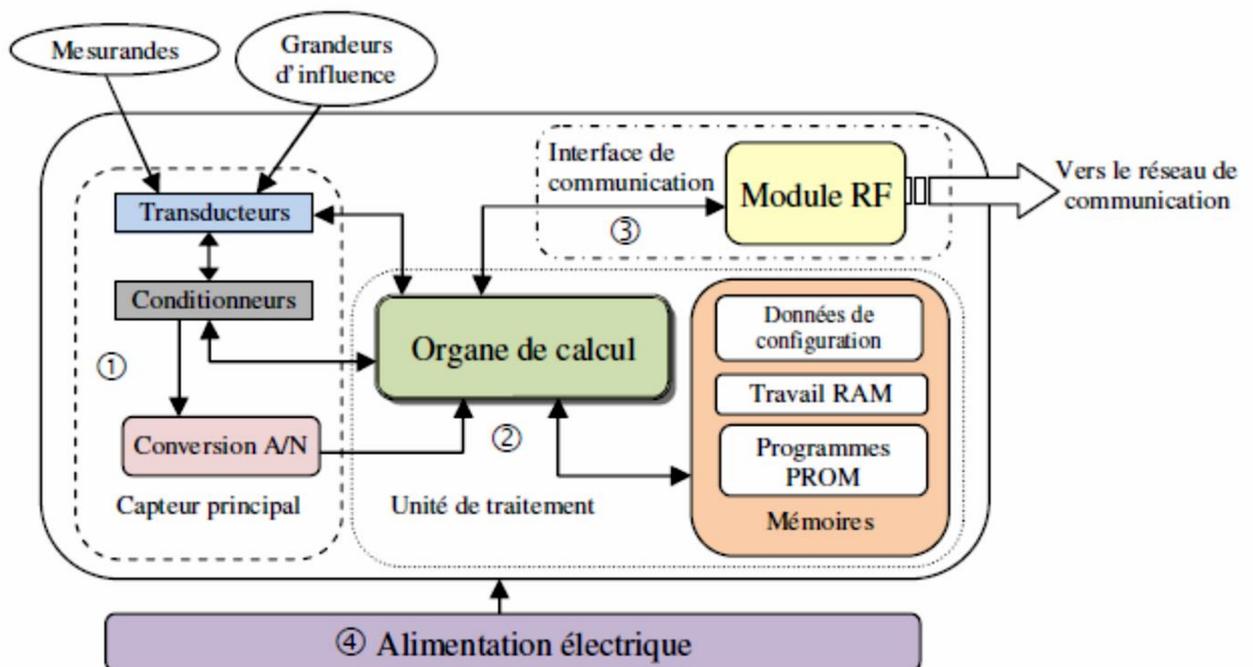


Figure 2.2 Architecture matérielle d'un capteur intelligent

Donc un capteur intelligent peut être considéré comme un véritable système embarqué autonome, qui devra posséder son propre système d'exploitation lui permettant de coopérer au sein d'une organisation.

2.2 Structure de software

Langages

Dans la plupart des cas, on utilise le langage machine propre au micro-processeur (Texas, Motorola...) , sinon on utilise le C.

Avantages du langage machine : optimisation en vitesse et en mémoire.

Avantages du C : Langage généraliste, code portable.

Mode de traitement des données

- Bloc : attente d'un certain nombre de données avant de lancer un traitement

Exemple : moyenne statistique sur les 100 dernières valeurs

- Flux: traitement des données à l'arrivée de chaque donnée.

Exemple : test de validité des données.

Exemple d'applications classiques

- Transformée de Fourier
- étude de l'onde de forme (classification, reconnaissance)
- Filtrage

2.3. Avantages de l'intelligence d'un capteur

L'intelligence du capteur intelligent réside dans sa capacité de vérification du bon déroulement d'un algorithme de métrologie. Cette intelligence est liée à l'amélioration de performances de capteur (exactitude, temps de réponse,...) par l'accroissement de la crédibilité de la mesure. Un capteur intelligent offre des avantages spécifiques tels que :

- la possibilité de configurer le capteur à distance ;
- la crédibilité accrue des mesures ;
- la coopération via un système de communication dédié en temps réel ;
- l'aide à la maintenance et à la prise de décision grâce aux informations d'état fournies ;
- la participation à la commande du système en intégrant des fonctions de commande-régulation;
- a participation à la sécurité du système en offrant des possibilités d'alarme ;
- la télésurveillance ;

Les fonctions d'un système aux capteurs intelligents peuvent être décrites en termes de :

- _ compensation ;
- _ validation ;
- _ traitement de l'information ;
- _ communications ;
- _ intégration ;

La combinaison de ces éléments respectifs permet aux capteurs intelligents un mode de fonctionnement autonome effectuant une détection active. La compensation est la capacité du système à détecter et à réagir aux changements dans l'environnement réseau à travers les routines d'autodiagnostic, d'auto-calibrage et d'adaptation. Un capteur intelligent doit être en mesure d'évaluer la validité des données recueillies, les comparer à celles obtenues par

d'autres capteurs et de confirmer l'exactitude de toute variation de données suivantes. Ce processus comprend essentiellement l'étape de configuration du capteur. Ce type de capteurs offre des avantages :

- Métrologiques : accroissement de la précision (fusion de données, auto-calibrage, coopération,...) ;
- Fonctionnels : aide à la maintenance par autotest intégré susceptible de déterminer automatiquement quel est l'élément défaillant, de transmettre des indications d'erreurs, mémorisation des événements redoutés, configuration à distance, alarme ;
- Economiques : réduction des durées d'étalonnage et de calibration, fiabilité accrue, allègement de la charge du calculateur central,...

2.4 Fonctionnalités d'un capteur intelligent

Capteur intelligent = capteur fournissant une mesure + d'autres services

Fonctionnalités nécessaires à une instrumentation industrielle

Métrologie :

Auto-adaptabilité, remplacement des données manquantes, validation de mesure
traitement du signal

Maintenance :

Auto-surveillance, auto-diagnostic, contrôle à distance
Mise en service : Configuration à distance

Auto-adaptabilité :

Capacité du capteur intelligent à s'adapter au signal mesuré.

Exemples

Amplificateur à gain variable

Filtre à fréquence de coupure variable

Remplacement des données manquantes :

Défaillance ponctuelle du capteur => données non disponible à un temps t

Technique permettant d'estimer les données manquantes à partir des données disponibles

Précision et validation des mesures :

Précision → prise en compte et compensation des grandeurs d'influence (température, pression...)

Validation des mesures-> évaluation de la qualité de la mesure, détection de mesures aberrantes

Traitement du signal

Mise en place à proximité de la source de données d'un système de traitement de l'information → Filtrage des résultats pour n'obtenir que l'information utile

Configuration à distance

Communication bidirectionnelle + traitement numérique des données → flexibilité instrumentale

Exemples

Transmission d'un fichier d'initialisation ou d'un programme de traitement approprié

Exploitation, détection de défaut, recherche de diagnostic

Après configuration, le système est autonome.

- Transmission de l'information utile

- Surveillance de processus

- Détection d'anomalie

→ déclenchement d'une alarme

Détection de défaut, recherche de diagnostic

Étude des relations de cause à effet, entre l'anomalie et sa cause

Analyse statistique : test d'hypothèses, calcul d'estimée et comparaison avec des données réelles

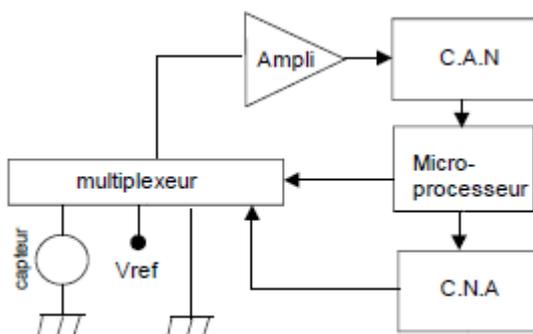
La connaissance des propriétés statistiques du bruit est importante puisqu'elle permet de mieux modéliser les aléas du signal

Auto-diagnostic

Définition

Capacité d'un capteur à effectuer l'évaluation de son état de fonctionnement et de diagnostiquer l'élément éventuellement en dysfonctionnement

Exemple de montage pour auto-diagnostic

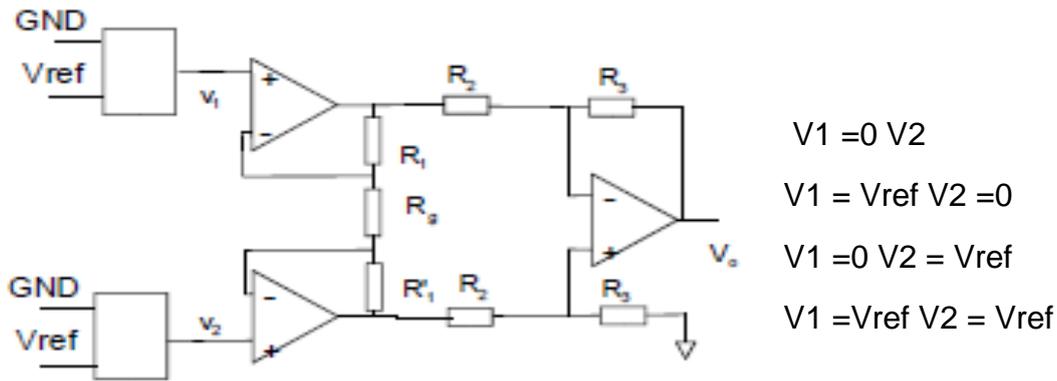


Mise à la masse de l'entrée → mesure d'une tension de décalage

Entrée mise à une tension de référence → mesure du gain

Contrôle de l'entrée via un CNA → validation du bon fonctionnement du CAN et CNA

Auto-diagnostic d'un amplificateur différentiel



Validation du G différentiel et du Taux de réjections du mode commun

Auto-diagnostic des capteurs

Difficile, car il faudrait appliquer au capteur une grandeur physique d'amplitude connue.

Questions

- La grandeur mesurée est-elle comprise dans l'EM?
- La grandeur mesurée est-elle compatible avec l'historique?
- La rapidité de variation de la grandeur mesurée est-elle raisonnable?
- Est-ce que la grandeur mesurée fluctue?

Solution simple : Duplication ou Triplification des capteurs.

2.5. Classification des capteurs intelligents

Le choix d'un capteur à intégrer pour une application dépend de la grandeur physique à surveiller. Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs, etc.), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, etc.). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

La classification des capteurs peut être également basée sur les méthodes qui s'appliquent sur les phénomènes électriques et qui se servent pour convertir les mesurandes physiques en signaux électriques. Le tableau I.1 résume quelques grandeurs physiques y compris les technologies de détection utilisées pour les convertir.

Tableau I.1 Classification et exemples de capteurs

Type	Exemple
Température	Thermistance, voltage transistor base-émetteur
Pression, tactile	Piézorésistive, capacitive
Optique	Photodiodes, phototransistors, infrarouge
Acoustique	Piézoélectrique résonateurs, microphones
Mécanique	Piézorésistive, capacitive, Piézoélectrique
Déplacement, vibration	Réductance variable, effet Hall, optoélectronique
Humidité	Résistive, capacitive
Position et distance	GPS, radar, ondes ultrasoniques, infrarouge
Chimique	pH, gaz infrarouge
Radiation	Détecteurs d'ionisation, compteurs Geiger-Mueller
Débit	Pression
Vitesse (linéaire/angulaire)	Réductance variable, effet Hall, optoélectronique
Courant/tension	Flux magnétique, résistance
Electromagnétique	Effet Hall, magnétomètres

2.6. Topologies des capteurs intelligents sans fil

Les systèmes à base de capteurs intelligents sont classifiés selon leur topologie de communication sous forme des deux classes suivantes.

2.6.1 Capteurs intelligents autonomes

Dans cette architecture, lorsque la portée du module radio-fréquence est suffisamment large, les capteurs intelligents réalisant une mission de détection relative à un procédé peuvent transmettre directement les mesures d'une manière autonome à la station de base à travers une communication point à point en formant une topologie en étoile comme le montre la figure 2.3.

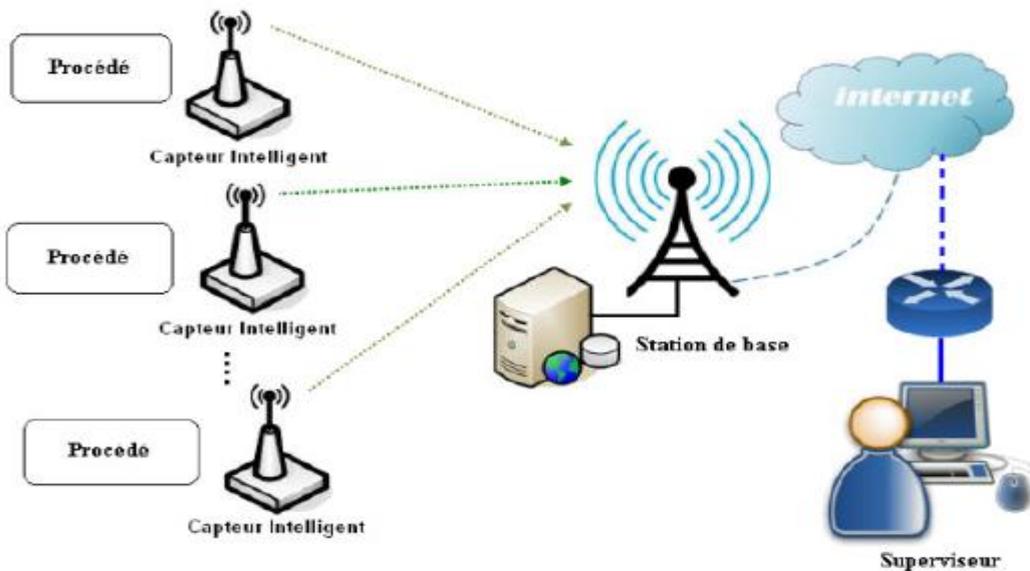


Figure 2.3 Topologie en étoile des capteurs intelligents autonomes

La station de base envoie ensuite les données collectées pour les superviseurs via une passerelle, souvent en utilisant Internet ou tout autre canal de communication. Cependant, ce modèle de liaison directe n'est pas pratique car la communication entre un capteur et sa station de base n'est pas toujours possible vue la limitation de la portée de transmission et les atténuations causées par des obstacles ou par des bruits dans le canal de communication .

2.6.2 Réseau de capteurs intelligents

Dans une zone géographique de déploiement plus vaste ayant une dimension dépassant la portée de la couverture radio-fréquence des capteurs, la détection devient une tâche très difficile. Pour pallier à cette difficulté, un réseau ad-hoc de capteurs appelé réseau de capteurs sans fil RCSF ou WSN est construit au fur et à mesure en fonction des besoins et des ressources disponibles et sans infrastructure comme représenté sur la figure 2.4.

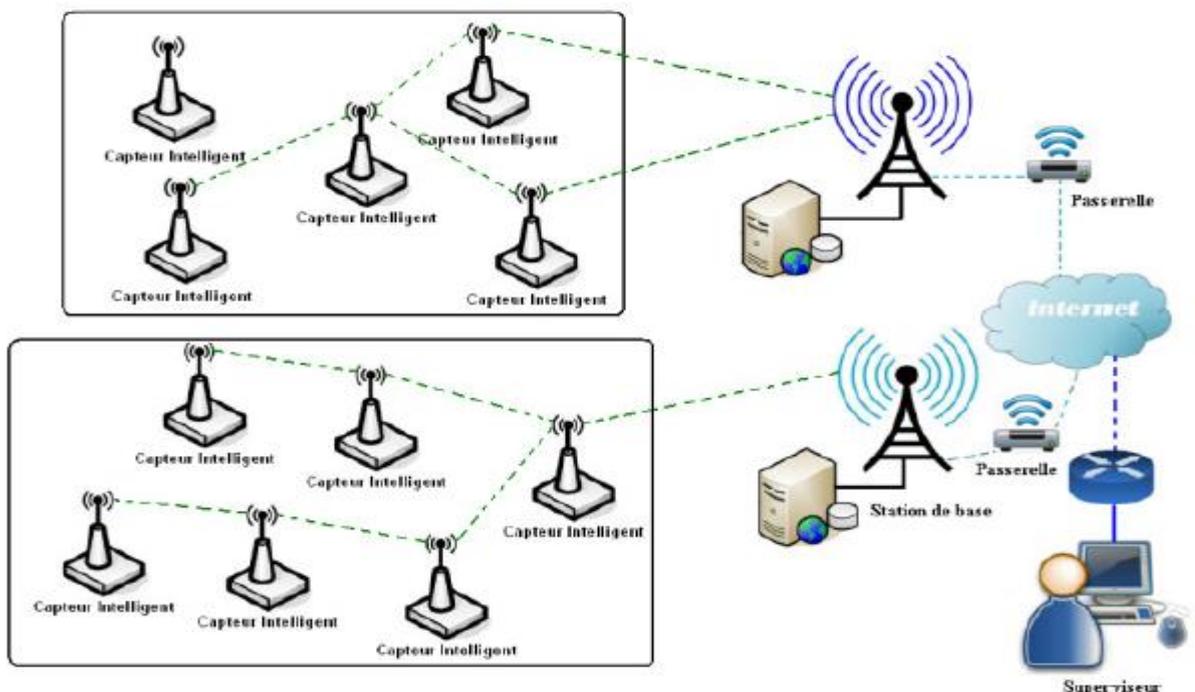


Figure 2.4 Communication multi-sauts ou coopérative dans un RCSF

Les capteurs autonomes distribués dans l'espace doivent coopérer en formant un réseau de capteur sans fil maillé pour accomplir une tâche de détection globale demandée. Chacun de ces noeuds ne doit pas seulement collecter et diffuser ses propres données à la station passerelle, mais aussi servir de relai pour transférer les données de ses voisins qui sont plus proches par une liaison multi-sauts. La station de base transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite à l'ordinateur central gestionnaire de tâches pour analyser ces données et prendre des décisions. Les paquets de données se propagent point à point en collaboration depuis le capteur source jusqu'à ce qu'ils arrivent à la station de base. Ce problème de routage, qui est la tâche de trouver un chemin multi-sauts d'un noeud de capteur à la station de base, est l'un des défis les plus importants. Il a reçu une immense attention de la communauté de recherche [9-16]. Cependant, cette architecture a l'inconvénient de la forte consommation d'énergie par les noeuds de capteurs pendant l'envoi des paquets de données vers la station de base. Pour résoudre ce problème, les noeuds de capteurs sont regroupés en un certain nombre dans de petits ensembles nommés Clusters ou groupements. Ce sont l'unité d'organisation pour les réseaux de capteurs sans fil. Chaque groupement a un noeud coordinateur appelé chef de cluster CH et des noeuds membres qui lui sont attachés. Les CHs sont nécessaires pour organiser des activités dans le cluster comme l'agrégation des données et la direction des paquets délivrés avec succès vers d'autres CHs dans le réseau dans le but d'assurer des communications fiables entre chacun. Cette opération a pour principal but de limiter le trafic sur le réseau. La figure 2.5 illustre cette topologie .

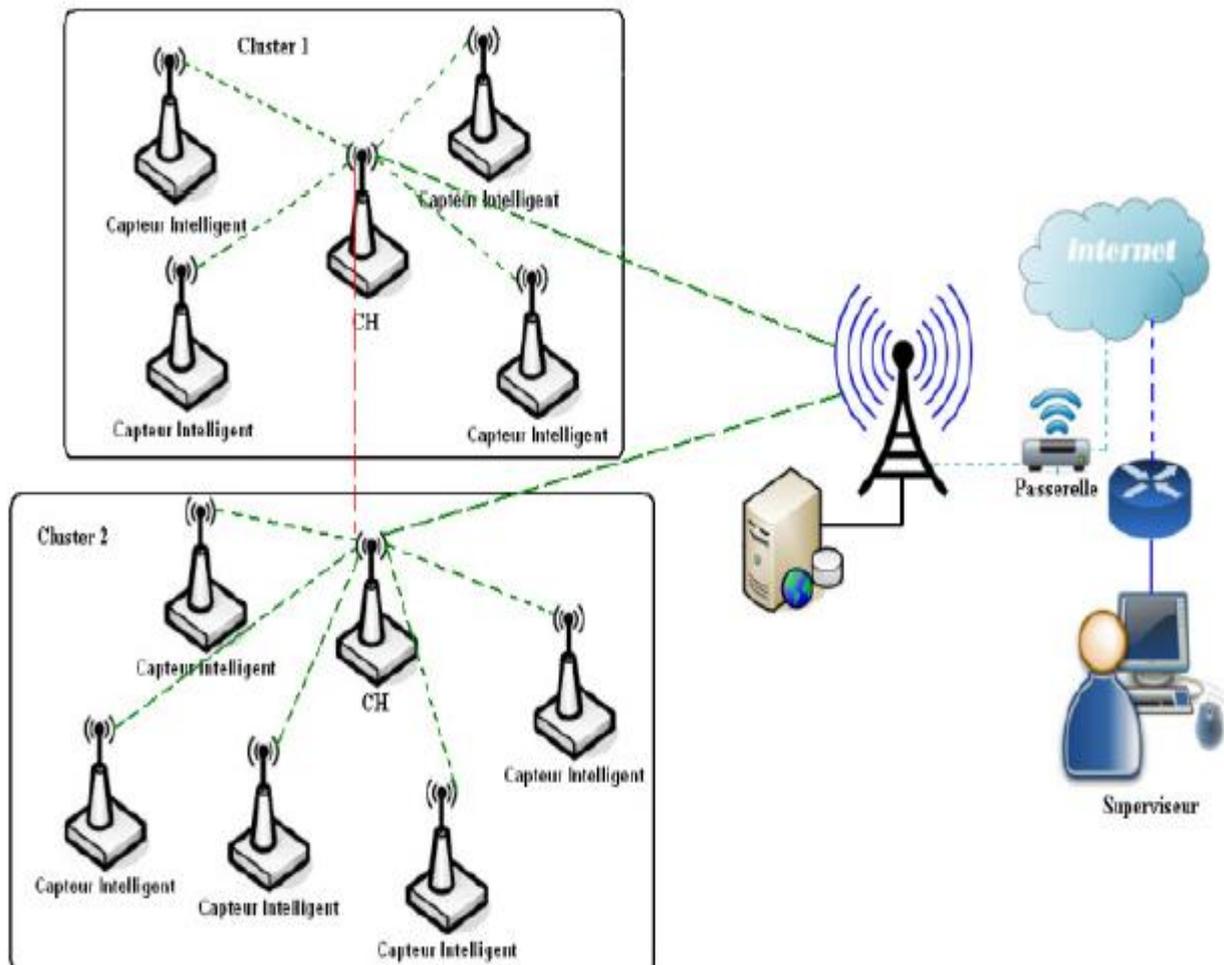


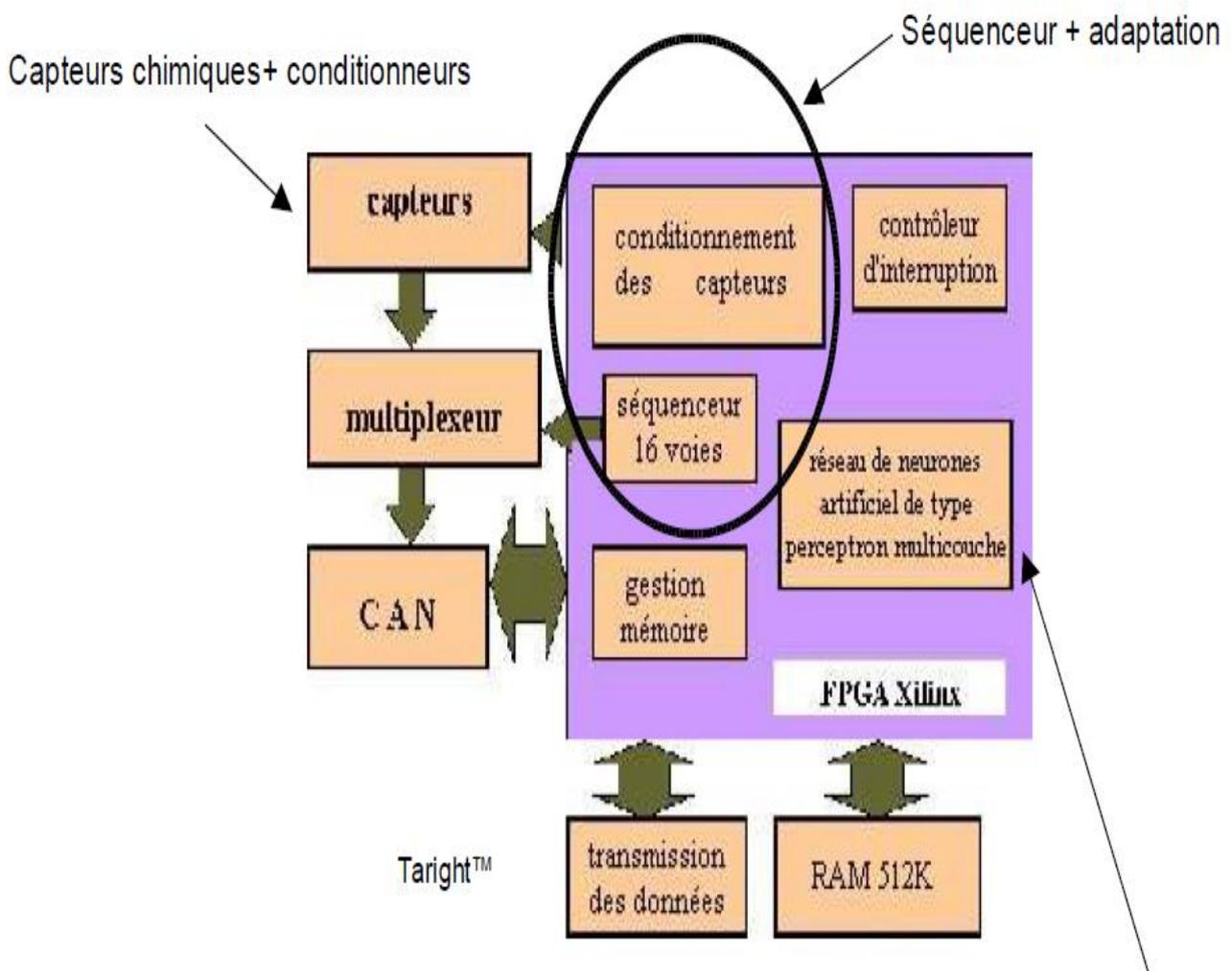
Figure 2.5 RCSF avec Clustering

Le clustering donc est un mécanisme important qui offre, pour un large réseau de capteurs, les avantages suivants :

- _ l'évolutivité ;
- _ la réduction de la consommation d'énergie ;
- _ l'augmentation du nombre de paquets de données ;
- _ le prolongement de la durée de vie du réseau ;
- _ la diminution du temps de retard de l'envoi des paquets de données dans le réseau ;

Exemples de capteurs intelligents

Objectifs : Mesure et reconnaissance automatique de composants chimiques



Structure classique d'un capteur intelligent + un module de reconnaissance de forme évolué.

Capteurs intelligents et l'automobile

L'industrie automobile est fortement consommatrice de capteurs intelligents, et truffent les voitures de ces systèmes.

Niveau d'essence

• capteur traditionnel "Mesure de profondeur"

Volume \leftrightarrow profondeur mais fonction monotone croissante de la profondeur

Solution intelligente :

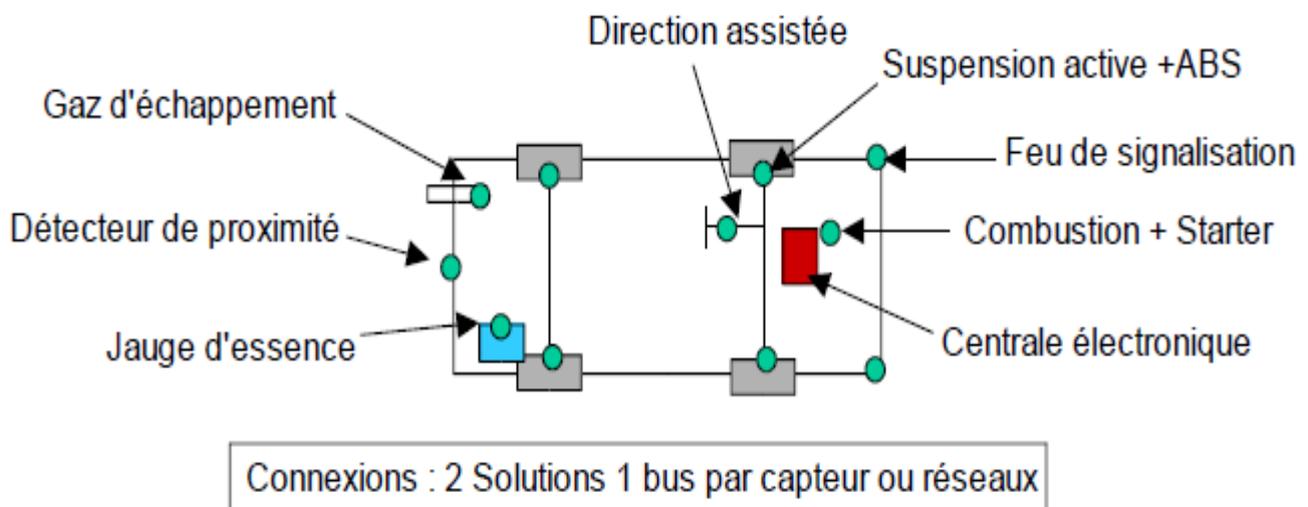
Mesure de profondeur + Microprocesseur pour calcul de la fonction

ABS

Mesure de la vitesse de rotations des roues (codeur) et de la vitesse du véhicule (effet Doppler)

Si non concordance entre les vitesses \rightarrow dérapage

\rightarrow communication entre capteurs et superviseur



Chapitre 3 : Etude des capteurs à base de MEMS et leurs applications

Introduction

Les MEMS, acronyme de Micro Electro Mechanical Systems, sont des dispositifs miniaturisés combinant plusieurs principes physiques. Ils intègrent généralement des éléments mécaniques couplés à de l'électronique et sont réalisés par des procédés de fabrication issus de la micro-électronique. Les MEMS exploitent, entre autres, des effets liés à l'électromagnétisme, la thermique et la fluïdique.

Les MEMS (Micro Electro Mechanical System), nés il y a une vingtaine d'année, sont des microcapteurs et/ou micro-actuateurs.

Ils sont micro-usinés et « intégrables » avec leur électronique. Ils utilisent pour leur fabrication la microtechnologie qui est une technologie d'usinage du silicium employant des procédés généralement collectifs et utilisés dans l'industrie de la microélectronique. L'électronique peut être associée sur le même substrat (intégration monolithique) ou assemblée par report dans le même boîtier ou sur le même substrat. Ils sont utilisés dans l'automobile (air bag, mesure de pression des pneus...), dans des applications grand public (téléphones mobiles, console de jeux, vidéo projecteur), dans l'industrie pétrolière (systèmes de mesure dans le puits), le médical (pacemakers), l'agroalimentaire et l'environnement (capteurs chimiques), etc.

Leur taille est de l'ordre du millimètre carré (figure 3.1) ; les éléments de leurs structures (mécaniques) sont à l'échelle du micron ; à titre de comparaison, le diamètre moyen d'un cheveu est $75\ \mu\text{m}$ et un globule rouge a une taille de $7\ \mu\text{m}$. Utilisé en tant que capteur, un MEMS possède une partie mobile sensible à la variation d'une grandeur physique (vitesse, pression, direction ...). Cette variation est alors traduite en une grandeur électrique, analysée ensuite par la partie électronique du MEMS. Il possède parfois un micro-actionneur intégré qui, à partir d'un signal électrique, va agir sur la partie mécanique.



Figure 3.1 : Visualisation de l'échelle d'un MEMS

3.1 – Le contexte : pourquoi la miniaturisation ?

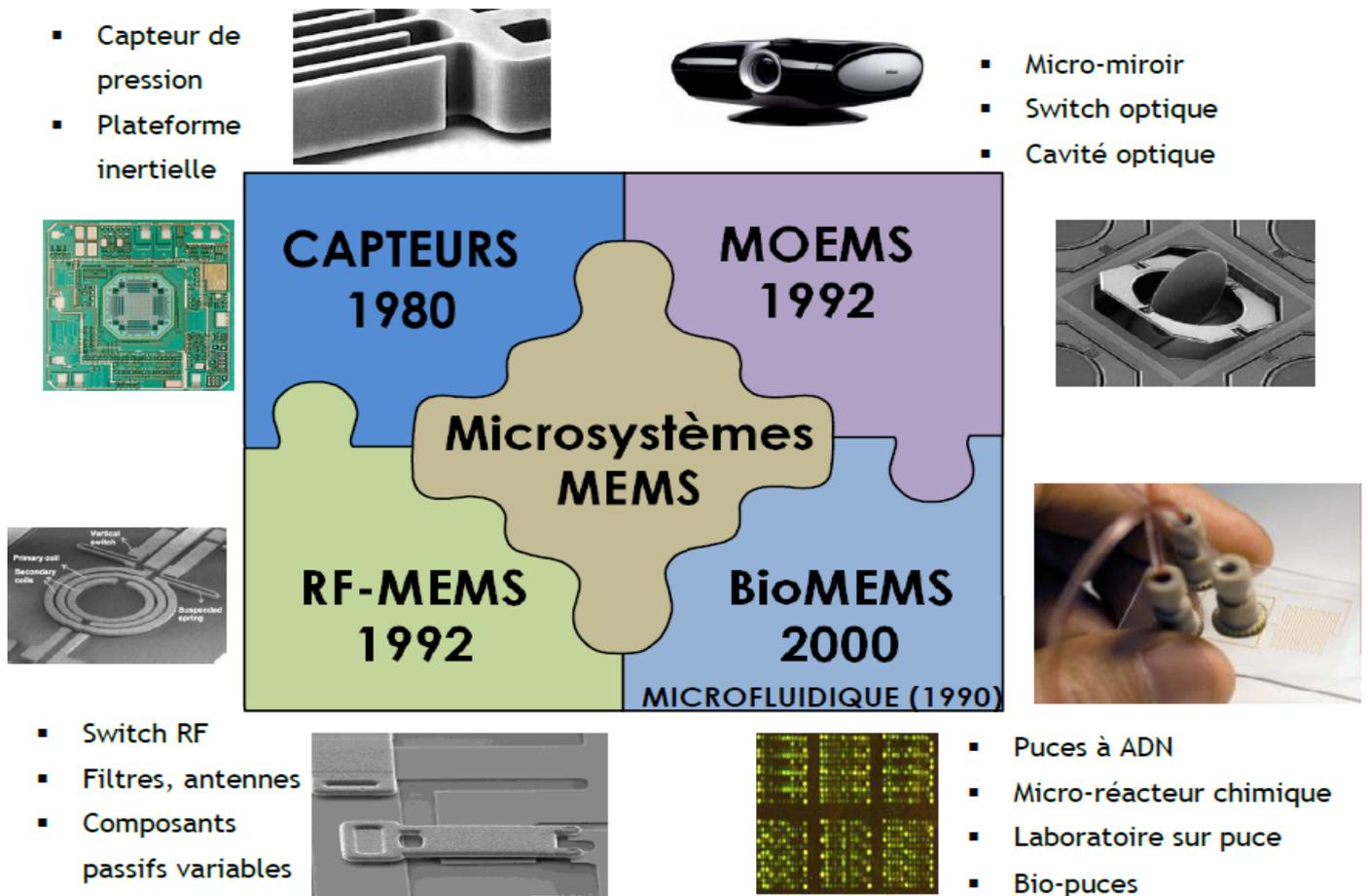
L'utilisation de microsystèmes s'est développée du fait de leur faible encombrement parallèlement à une forte sensibilité et une grande précision liées à la miniaturisation. Les critères de poids, taille et volume ont permis leur généralisation dans des objets qui se devaient légers et/ou petits (automobile, avionique). Embarqués dans un véhicule, ils ne

déprécient pas les efforts de poids et de consommation énergétique réalisés pour satisfaire les normes environnementales dans les domaines du transport. Les disques durs ont vu leur taille diminuer en même temps que leur densité de stockage augmentait, conséquences de la diminution de la taille des têtes de lecture-écriture. La miniaturisation des systèmes MEMS comme dans le domaine des capteurs s'est répercutée par l'ajout de fonctions qui n'auraient pas été possibles sans les critères d'encombrement, de coût de production et de consommation énergétique à l'usage.

La miniaturisation accompagne les progrès technologiques depuis l'invention du transistor (fin des années 1940) suivie par l'arrivée du circuit intégré une dizaine d'années plus tard. La diminution progressive du volume des composants a permis la mobilité des objets, leur portabilité en même temps que l'augmentation de leur capacité. Dans un volume d'encombrement donné et un poids raisonné, la miniaturisation permet aux fabricants une concentration de fonctions d'usage ; elle autorise aussi leurs combinaisons, leurs multiplications et donc la diversité d'utilisations d'un même objet. La miniaturisation a eu des conséquences sur les recherches et les applications devenues imaginables par les dimensions. Citons par exemple le médical avec les micro-caméras endoscopiques ou les laboratoires sur puce, la sécurité automobile avec les capteurs d'accélération ou de pression, la téléphonie mobile et toutes ses fonctions associées, etc.

3.2 – Les différents secteurs des MEMS

Les avancées autour de la micro-technologie de réalisations des MEMS (basées sur le principe de la photolithographie) ont engendré une explosion des applications et une segmentation du domaine. On trouve quatre familles associées à leurs cadres applicatifs (figure 3. 2).



Les capteurs MEMS : qui mettent en lien direct une déformation mécanique avec une variation électrique. On trouve par exemple des capteurs de pression (de type résistif) pour la surveillance de pneumatiques ou encore des chauffe-eaux, des capteurs d'accélération (de type capacitif) dans les airbags, la téléphonie portable, ou les manettes de consoles de jeux. (Voir ressource « Les MEMS : Réalisation de capteurs résonnants »)

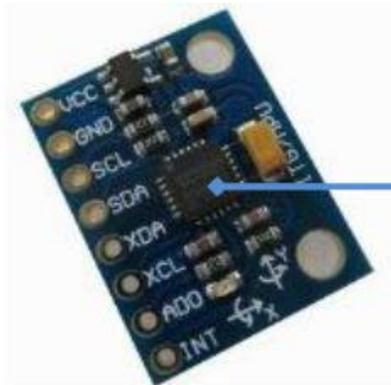


Figure 3.2 : Exemple d'un capteur gyroscopique Contenu gyroscopique dans la puce MPU-6050 au centre du circuit imprimé GY-521 environ 800 µm

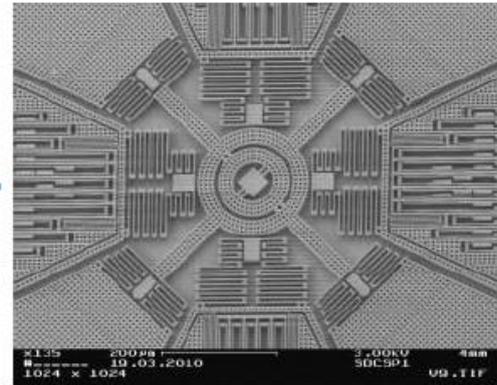


Figure 3.3 : Vue intérieure du capteur MEMS. La structure mesure

Les MEMS Optiques (MOEMS) : Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems, permettent la manipulation d'une information lumineuse ou électromagnétique. Les MOEMS sont désormais omniprésents dans les vidéoprojecteurs où des millions de miroirs (de quelques microns chacun) définissent chaque pixel de l'image (technologie DMD : Digital Micromirror Device ou encore DLP : Digital Light Processor).

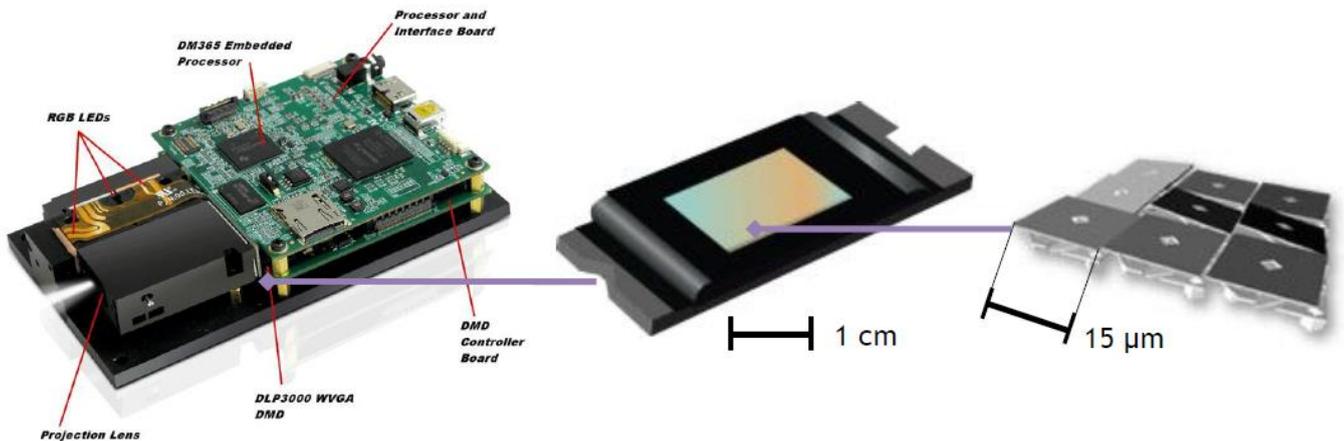


Figure 3.4: Vidéoprojecteur DLP LightCrafter™

Figure 3.5 : le contrôleur DMD numérique DLP3000 WvGA.

Figure 3.6 : Les micro-miroirs de la puce DMD, chaque miroir est un pixel de l'image projetée

Les MEMS RF : ils trouvent leurs applications dans l'ensemble de la chaîne d'émission-réception d'un signal informatique. Les systèmes de communication sans fils utilisent des

technologies MEMS RF, dispositifs micro-ondes avec une compacité importante, à consommation faible pour des performances RF sur une bande large.

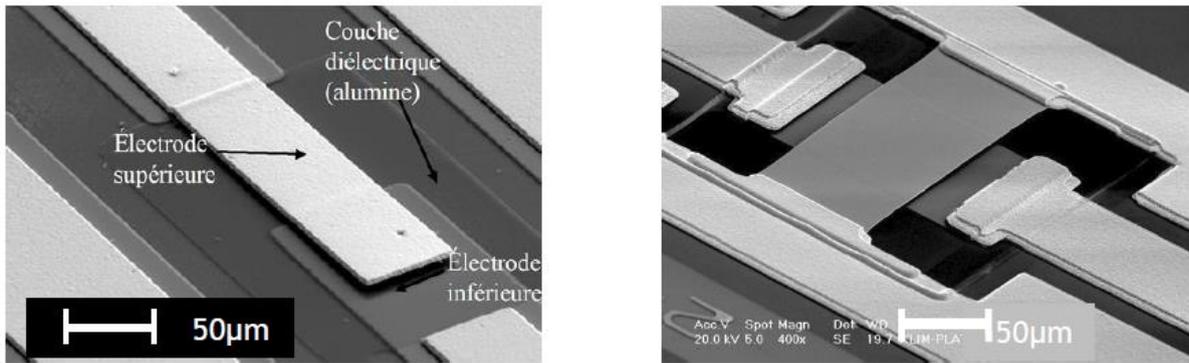


Figure 3.7 : Composants MEMS RF réalisés par XLIM (Unité Mixte de Recherche de l'Université de Limoges) : commutateurs de type cantilever (à gauche) et de type pont (à droite) Images SPCTS (Science des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface)

Les BioMEMS : associés au laboratoire sur puce (LOC : Lab On Chip) ils permettent de développer des applications permettant d'interagir avec le vivant que ce soit à l'échelle des protéines (quelques nanomètres) à l'échelle cellulaire (quelques dizaines de microns) ou encore à l'échelle d'un tissu (quelques millimètres). Les BioMEMS intègrent des réseaux de micro-canaux où sont gérés les écoulements microfluidiques. Ils visent l'intégration de l'ensemble des étapes d'un protocole biologique sur un système miniaturisé de la taille typique d'une carte de paiement. On les retrouve sous l'application biopuces.

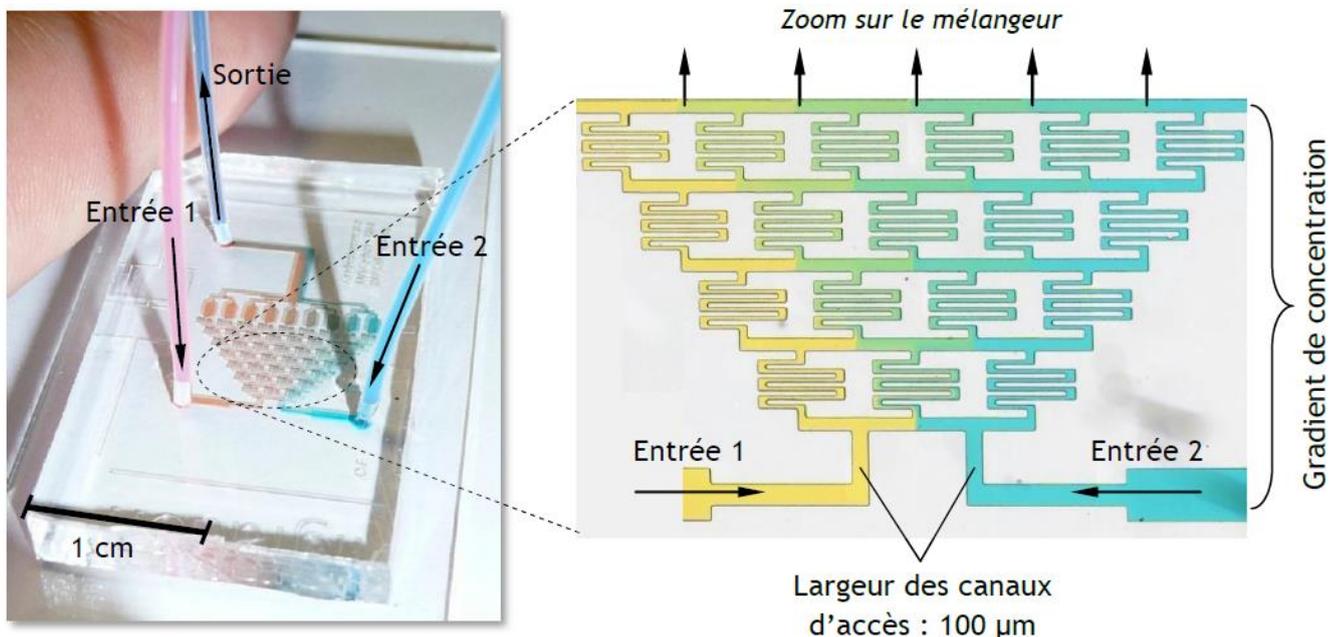


Figure 3.8 : Générateur de gradient développé au laboratoire SATIE de l'ENS Cachan

3.3 – Les principes physiques du microsystème

Le principe de conception d'un microsystème ne diffère pas fondamentalement de celui d'un macro-système puisque les lois physiques et les équations qui les décrivent restent principalement les mêmes. Cependant, au regard des lois d'échelle, l'importance des effets physiques dans ces équations changent en lien avec la taille du système. En effet les rapports entre les différentes forces en jeu sont modifiés avec les réductions des dimensions :

les forces de gravité sont proportionnelles au volume des objets, diminuer les dimensions diminue le poids dans des proportions au cube ; une pression s'exerçant sur une surface, la force résultante diminue avec les dimensions dans des proportions au carré. On peut aussi évoquer la capillarité dont l'impact sur un système à dimensions réduites a un impact prédominant.

La microélectronique s'intéresse à l'étude et à la fabrication de composants électroniques à l'échelle sub-micrométrique. Hors une adaptation aux dimensions, l'architecture micro-électronique n'a pas de différences fondamentales avec l'électronique. La différence est dans la conception puisque l'électronique nécessaire au capteur est directement intégrée au capteur. Les technologies de production permettent de fabriquer des composants à partir de matériaux semi-conducteurs comme le silicium, les fonctions électroniques sont intégrées directement en surface de ce substrat.

3.4 Les capteurs MEMS

Les capteurs MEMS ont permis d'augmenter de façon considérable les performances des dispositifs dans lesquels ils se sont greffés. L'ergonomie a fait de gros progrès dans des applications comme la téléphonie mobile, car ils ont permis de créer des téléphones légers et à faible encombrement. Le bond gigantesque de la densité de stockage d'informations des disques durs a été rendu possible par la diminution de taille des têtes de lecture/écriture et cela a permis de réduire la taille des disques durs. La miniaturisation des capteurs MEMS a rendu possible l'ajout de fonctions qui n'auraient pas pu l'être sans cela (exemple : les accéléromètres pour détecter les chocs, dans ces mêmes disques durs dans les ordinateurs portables). Leur faible poids a permis, dans l'industrie automobile, de réduire la consommation d'énergie des voitures et ils seront indispensables pour satisfaire les nouvelles normes environnementales dans le domaine des transports. Parce qu'ils utilisent des procédés de fabrication collectifs de gros volumes, ces MEMS sont beaucoup plus économiques pour chaque pièce produite.

3.4.1 Procédés de fabrication

La technologie des MEMS est basée sur les étapes de fabrication des circuits intégrés. Au cours de la fabrication, sont créés des zones de conductivité différentes, dites « dopées », des pistes métalliques, et des zones isolantes, toutes gravées selon des motifs (obtenus par photolithographie) afin d'obtenir les composants élémentaires (figure 3.9). L'enchaînement de ces étapes, ou filière technologique, est un procédé collectif qui permet la réalisation de nombreux dispositifs sur un même substrat, pour aboutir finalement à leur séparation en puces élémentaires et à leur mise en boîtier individuel (figure 3.10).

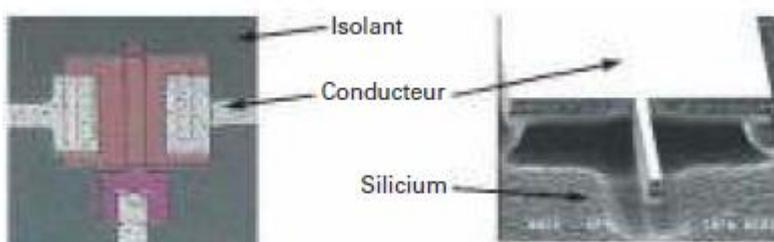


Figure 3.9 – Élément d'un circuit intégré et d'un MEMS

Le substrat est un cristal semi-conducteur, principalement du silicium monocristallin, obtenu par découpe d'un lingot en tranches à partir d'un poly cristal fondu. Les procédés sont regroupés en familles (figure 3.11) : les procédés thermiques permettent la diffusion d'espèce oxydantes (O_2, H_2O) qui, réagissant avec le silicium, font croître du SiO_2 , ou la diffusion d'espèces dopantes (phosphore (P), bore (B)) qui, s'intégrant dans le réseau cristallin, modifient ses propriétés conductrices. Les dépôts font appel à une réaction chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition ou CVD) ou à une pulvérisation de cibles solides (Physical Vapor Deposition ou PVD) (figure 3.12), ou à une électrolyse. La photolithographie utilise une résine photosensible qui, après avoir été exposée à travers un masque comportant les motifs désirés, est dissoute et ne protège plus les zones qu'il est nécessaire de graver. Les motifs du masque sont alignés avec ceux déjà présents sur la plaque (figure 3.14). La gravure est réalisée par voie liquide ou sèche par plasma gazeux.

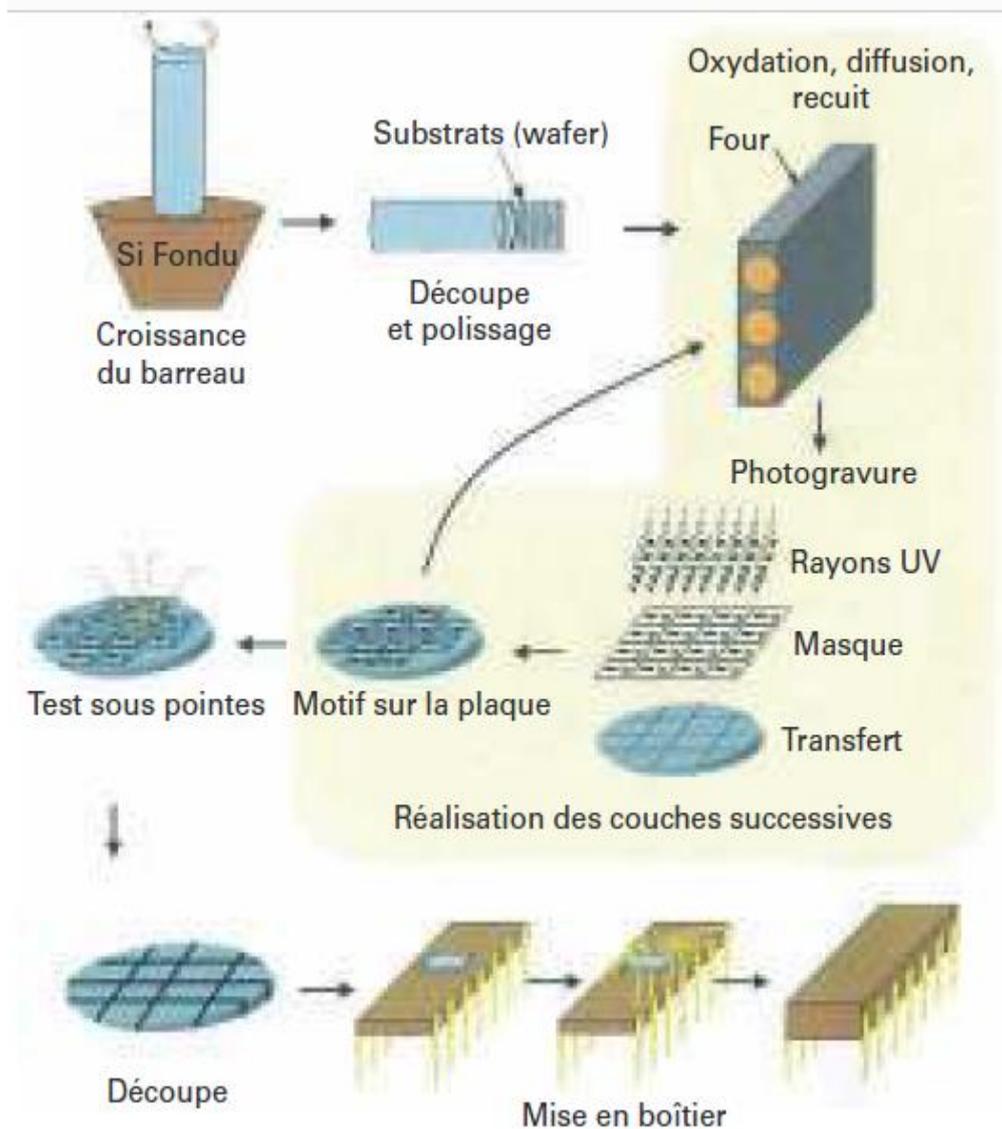


Figure 3.10 – Étapes technologiques de fabrication d'un circuit intégré

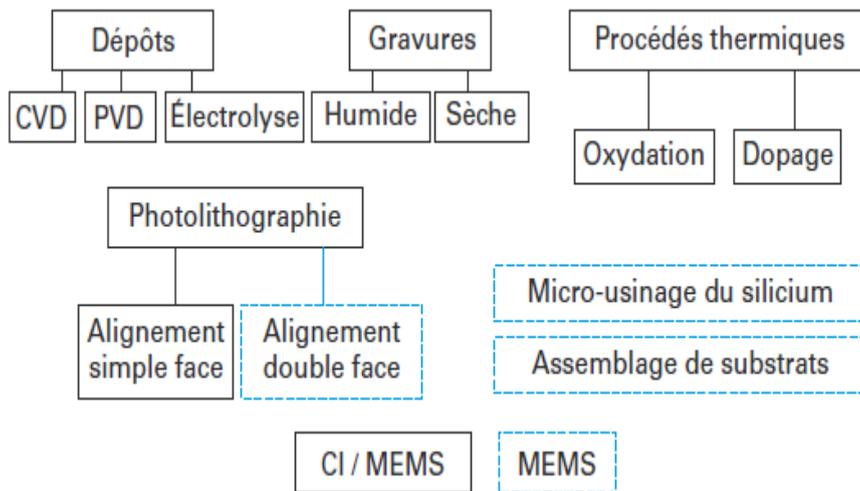
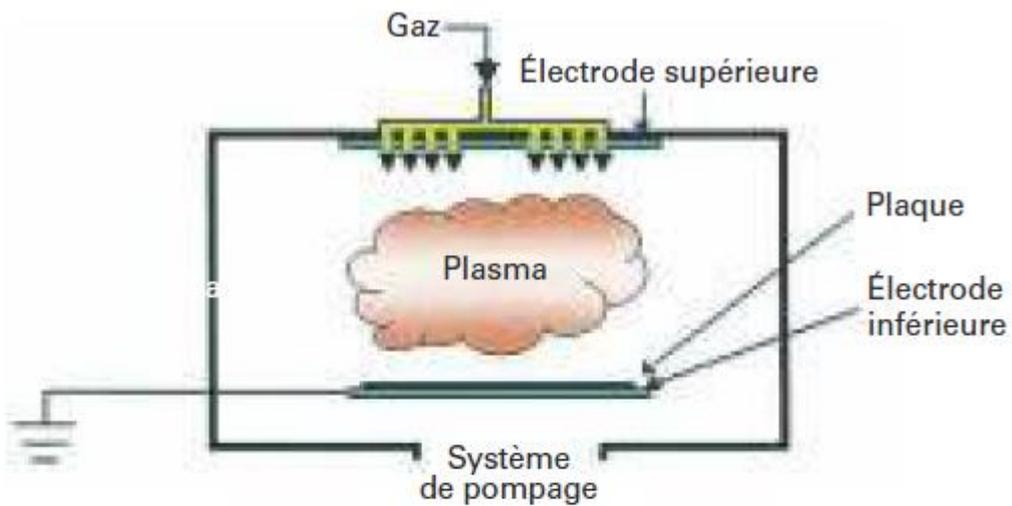
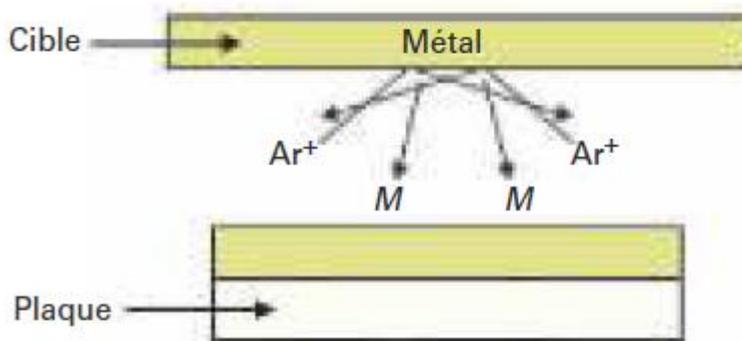


Figure 3.11 – Procédés technologiques des circuits intégrés et des MEMS



(a) Dépôt CVD assisté par plasma [1]



(b) Dépôt PVD par pulvérisation

Figure 3.12 – (a) Dépôt CVD assisté par plasma (b) Dépôt PVD par pulvérisation

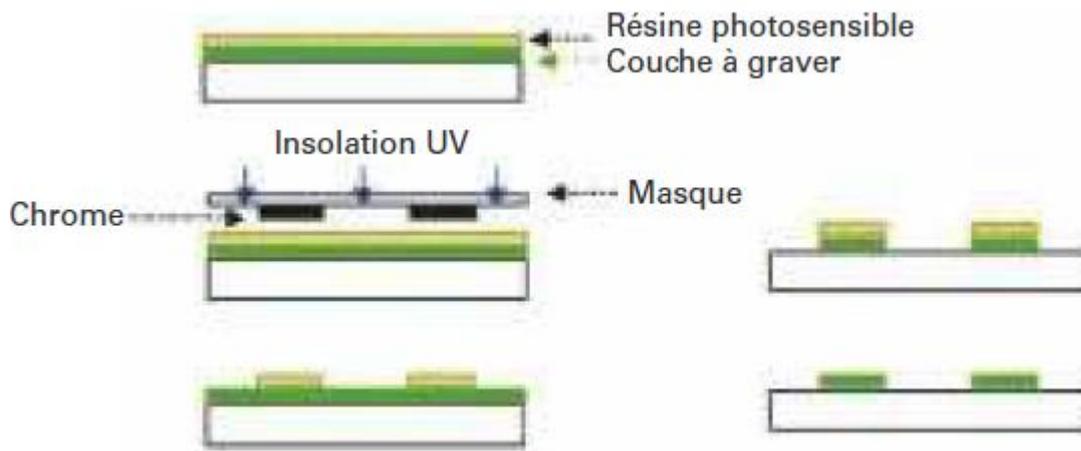


Figure 3.13 – Photolithographie suivie de l'étape de gravure

Encadrées en tirets bleus (figure 3.11), les étapes spécifiques aux micro technologies, comme l'alignement double face, le micro-usinage du silicium et l'assemblage de substrats, sont nécessaires pour obtenir des microstructures en 3 dimensions.

Exemple d'une chaîne de mesure d'un capteur de pression :

En général une mesure de pression utilise une membrane déformable comme corps d'épreuve. Dans le cadre des MEMS, celle-ci est gravée dans le substrat de silicium (figure 10). Les procédés de fabrication autres que la photolithographie, sont présentés dans la ressource « Les MEMS : Réalisation de capteurs résonnants ».

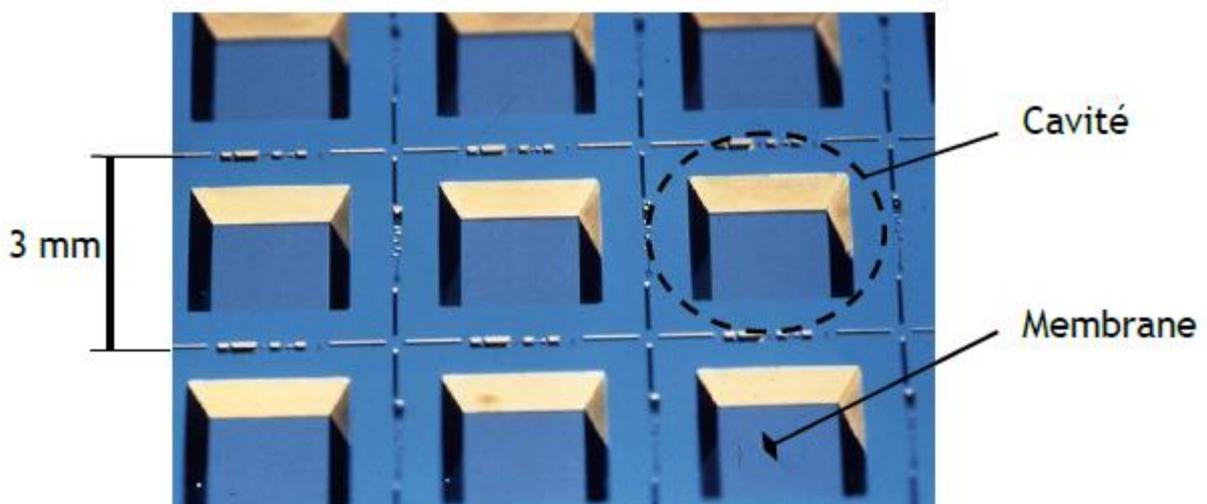


Figure 3.14 : Production collective de MEMS qui seront séparés en toute fin du procédé
 Visualisation de la cavité réalisée pour obtenir la membrane en silicium

La membrane du capteur de pression subit une déformation en présence d'une différence de pression (figure 3.15) :

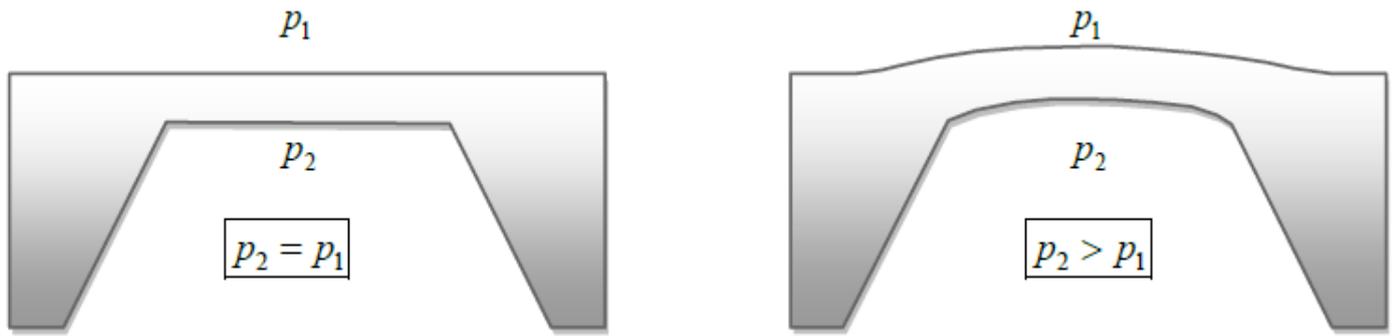
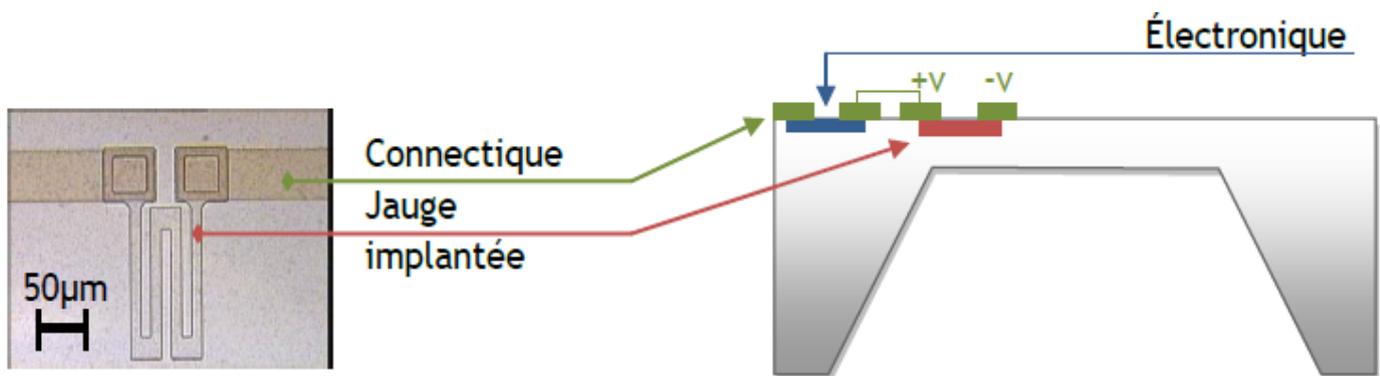


Figure 3.15 : Schéma de la déformation de la membrane d'un capteur de pression

Afin d'avoir une mesure de déformation, les micro-technologies permettent l'intégration de jauges piézorésistives directement implantées dans la structure des MEMS au cours de la production (figure 3.16). La jauge de contraintes voit sa longueur relative ($\Delta L/L$) varier lors de la déformation, entraînant la variation relative de sa résistance ($\Delta R/R$) :

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right] = K \left[\frac{\Delta l}{l} \right]$$

avec : facteur de jauge. K



Jauge de contrainte

Figure 3.16 : Schéma de l'implantation intégrée d'une jauge piézorésistive

L'électronique de mesure associée est le pont de Wheatstone (figure 3.17). Une variation de valeur d'une des résistances (jauge piézorésistive) du montage en pont, fait varier la mesure de sortie de la tension. La piézorésistivité des matériaux constituant les jauges de contrainte est la propriété de variation de conductivité sous l'effet d'une déformation mécanique.

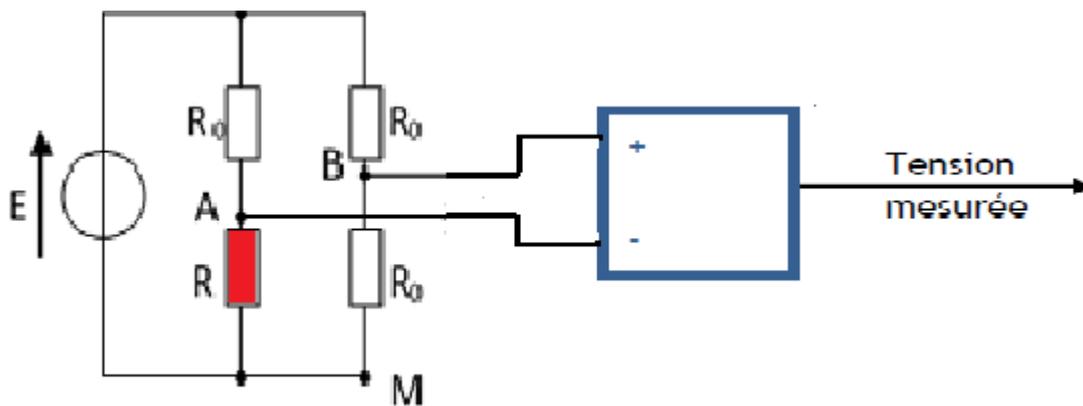


Figure 3.17: Schéma du pont de Wheatstone

3.4.2 Techniques de mesures

1. Différents types de mesure

1.1 Accélération

Les micro-accéléromètres utilisent généralement des structures mécaniques comportant une « masse sismique » (nom donné à la partie lourde qui sera sensible à l'accélération : (figure 3.18)). On est alors dans le cas d'une structure dite « statique ». Un second principe consiste à utiliser un mécanisme résonant constitué d'un système masse/ressort. Le dispositif verra sa fréquence de résonance changer avec l'accélération appliquée. On parle de « structure dynamique » ou « résonante » (voir figure 3.20).

1.1.1 Principe de la mesure par structure statique

- Les micro-accéléromètres utilisent généralement des structures mécaniques de type masse vibrante ou statique.

Une accélération a_x suivant l'axe x entraîne un déplacement de la masse m retenue par la force de rappel $F_R = -K \cdot x$ du système de ressort. On a : $x = m \cdot a_x / -K$ (1)

Ici x et K représentent respectivement le déplacement de la masse (en m) et la constante de raideur du ressort (en $N \cdot m^{-1}$).

- Mise en œuvre

Une masse est réalisée au bout d'une poutre. La détection se fait à l'aide de l'effet piézoélectrique, capacitif ou piezorésistif. L'avantage des deux derniers est de pouvoir réaliser la détection d'accélération constantes de type gravité terrestre et donc de réaliser des micro-inclinomètres.

1.1.2 Micro-accéléromètres résonants

- Un capteur d'accélération résonant MEMS utilise le principe précédemment exposé, mais avec toutefois quelques nuances. La masse est, en général, supportée par un système de ressorts et est mise en mouvement suivant l'axe x à la fréquence de résonance mécanique f_r du système (figure 3.18). Une accélération d'intensité A_T suivant un axe transverse à l'axe Ox entrainera une variation Δf de la fréquence de résonance du système. On a :

$$\Delta f = C \cdot F_r \cdot A_T \quad (2)$$

Ici C est une constante qui dépend du système.

D'un point de vue plus général, un système mécanique résonant est réalisé avec une masse supportée par un ressort et mise en mouvement sinusoïdal suivant l'axe x (figure 3.19). Il présente l'équation mécanique ci-dessous :

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + Kx = -F_x(t) \quad (3)$$

Avec c coefficient d'amortissement visqueux (dû aux frottements de l'air par exemple) sur la masse M (en N.s.m⁻¹),

M masse (en kg),

K constante de rappel du ressort (en N.m⁻¹),

x déplacement (en m),

$F_x(t)$ projection des forces extérieures suivant l'axe x (en N).

Si l'on effectue une analogie électrique de ce système mécanique, on peut alors identifier la dérivée du déplacement x au courant électrique i , la masse M à une inductance L , le coefficient d'amortissement visqueux c à une résistance R , la constante de rappel du ressort K à l'inverse de la capacité C . On obtient alors une équation caractéristique d'un circuit R, L, C série (voir figure 2) :

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i(t) dt = E(t) \quad (4)$$

– Mise en oeuvre

Concrètement la masse M est réalisée au milieu d'un pont. Le pont est mis en vibration à sa fréquence de résonance f_r à l'aide de la force électrostatique ou de l'effet piézoélectrique. La détection est généralement effectuée à l'aide de ces mêmes effets (capacitif ou piézoélectrique).

Le capteur résonant est vu comme un circuit électrique résonant RLC série, auquel on ajoute une capacité C_0 représentant la capacité statique entre les électrodes (figure 3.20). On utilise cette représentation pour l'électronique de conditionnement

Cette méthode autorise également la mesure des accélérations statiques et présente l'avantage de transformer l'accélération en une variation de fréquence électrique, plus simple de mise en oeuvre dans le circuit de mesure et pour la conversion en signaux numériques.

1.2 Rotation

1.2.1 Principe

Les capteurs de rotation utilisent généralement l'effet Coriolis qui est présenté sur la figure 3.21.

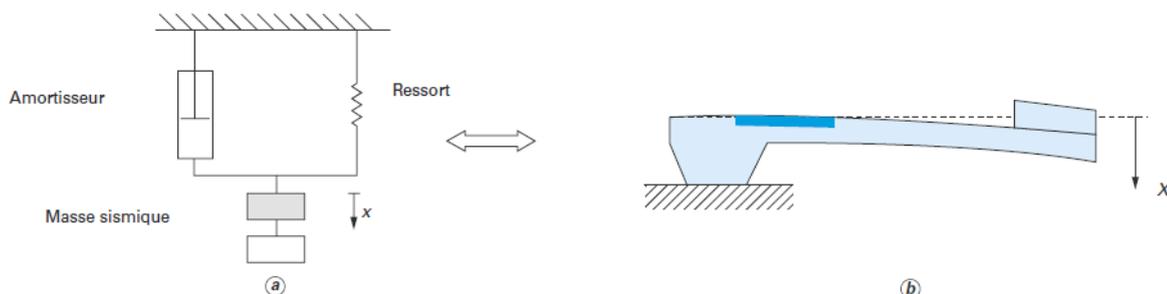


Figure 3.18 – Principe de l'accéléromètre statique

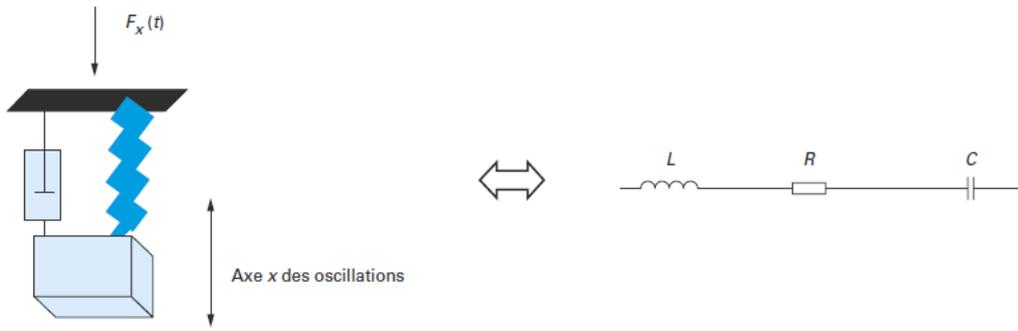


Figure 3.19 – Principe d'un système résonant et son schéma électrique équivalent

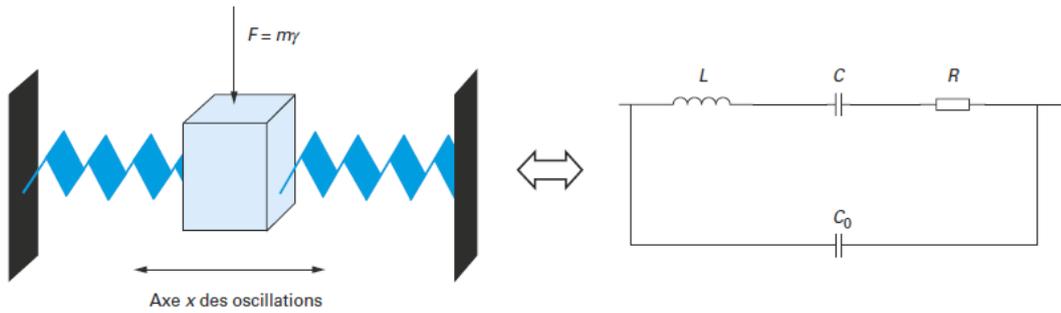


Figure 3.20 – Principe de l'accéléromètre résonant et son schéma électrique équivalent

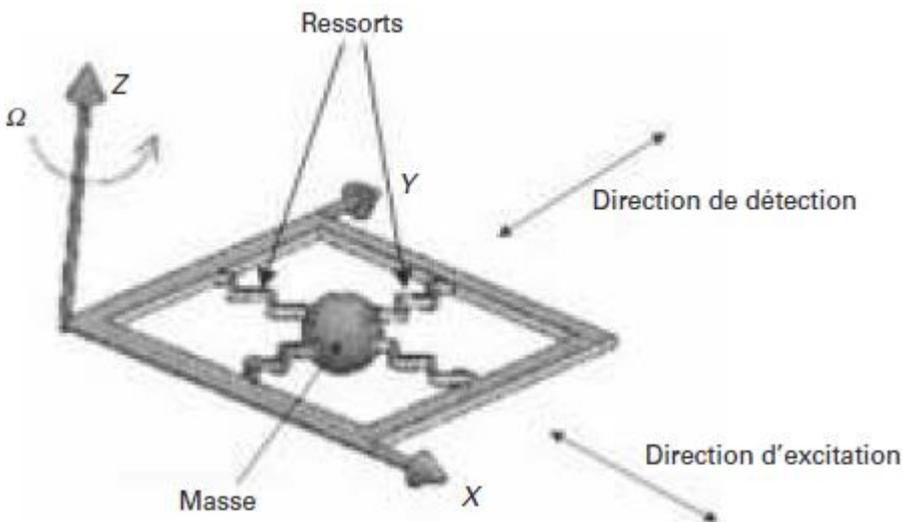


Figure 3.21 – Effet Coriolis

Une masse est supportée par deux systèmes à ressorts. La masse est mise en mouvement sinusoïdalement suivant l'axe Ox et la détection de la rotation se fait suivant l'axe Oy. On a :

$$x = A_x \cos(\omega_x t) \quad (5)$$

Ici x représente le déplacement suivant l'axe x, A_x l'amplitude du déplacement et ω_x la pulsation du déplacement.

Si on applique une vitesse de rotation Ω autour de l'axe z du système, une accélération A_y de la masse suivant l'axe y va être engendrée. On a :

$$A_y = 2\Omega x' = -2\Omega \omega_x A_x \sin(\omega_x t) \quad (6)$$

On mesure cette accélération par le déplacement suivant l'axe y.

On peut augmenter la sensibilité de la mesure de la rotation en augmentant le déplacement suivant l'axe x.

1.2.2 Mise en œuvre

L'excitation et la détection utilisent généralement l'effet capacitif ou l'effet piézoélectrique. Les micro gyromètres capacitifs utilisent généralement des peignes interdigités afin d'exciter efficacement la masse, et aussi pour détecter les variations de position suivant l'axe perpendiculaire, puis en déduire la vitesse de rotation donnée au capteur. La figure 3.22 présente un micro gyromètre fabriqué par Bosch.

1.3 Pression

Les capteurs de pression exploitent des membranes qui fléchissent sous l'effet d'une différence de pression $\Delta P = P_a - P_r$ (figure 3.23).

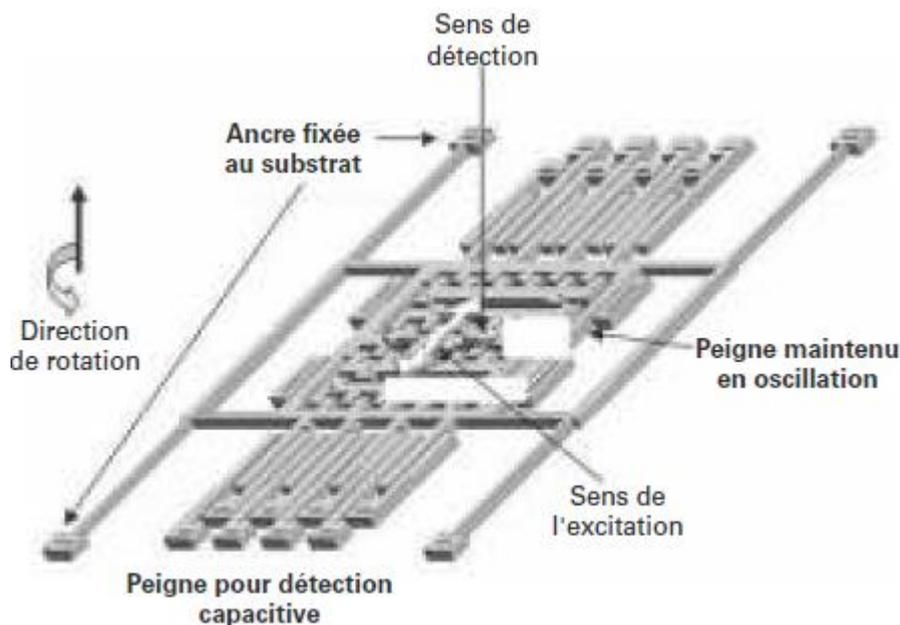


Figure 3.22 – Micro gyromètre électrostatique

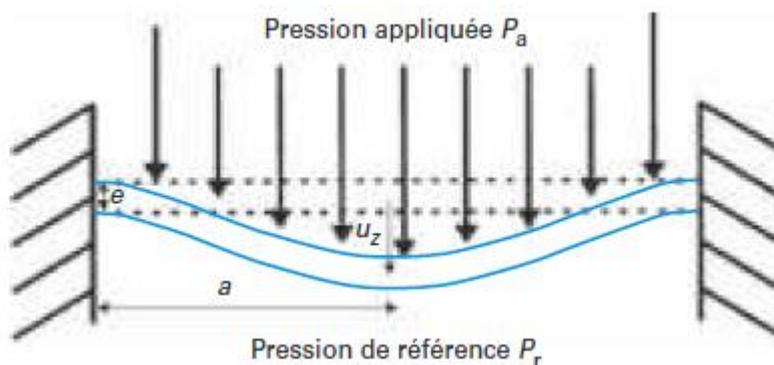


Figure 3.23 – Déformation d'une membrane sous l'effet d'une différence de pression

Du aux contraintes technologiques, les membranes sont généralement carrées. La relation entre la déflexion d'une membrane u_z carrée de côté $2a$ et d'épaisseur h , et la différence de pression appliquée ΔP , est donnée par :

$$\Delta P = \frac{E \cdot e^4}{(1 - \nu^2) a^4} \left(4,2 \frac{u_z}{e} + 1,58 \frac{u_z^3}{e^3} \right) \quad (7)$$

E et ν représentent respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson du matériau constituant la membrane.

Les capteurs de pression utilisent généralement des membranes en polysilicium ou en silicium cristallin afin d'exploiter l'effet piézorésistif .

1.3.1 Capteurs piézorésistifs

Pour les capteurs de pression piézorésistifs, quatre jauges de contrainte configurées en pont de Wheatstone sont réalisées par diffusion ou implantation ionique d'impuretés dans du silicium ou du polysilicium. Elles sont placées aux encastremets de la membrane ou les déformations sont maximales (figure 3.24).

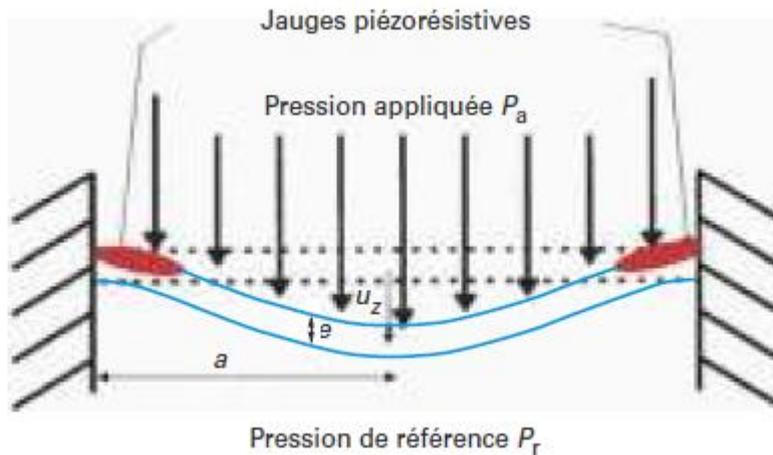


Figure 3.24 – Position des jauges piézorésistives

1.3.2 Capteurs capacitifs

Pour les capteurs de pression capacitifs, une membrane constituée d'un matériau conducteur, généralement du silicium ou polysilicium dopé, est mise en regard d'une contre-électrode fixe. La déformation de cette membrane sous l'effet d'une différence de pression engendre une variation de capacité (figure 3.25). La variation de capacité est donnée par l'équation (8) :

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{h_0 - h} \quad (8)$$

où ϵ_0 ($= 8,85 \text{ pF} \cdot \text{m}^{-1}$) est la permittivité du vide, S la surface de l'électrode (en m^2), h_0 la distance (appelée « entrefer ») au repos (en m) et h l'entrefer lorsque l'électrode est soumise à une force F_z (en m)

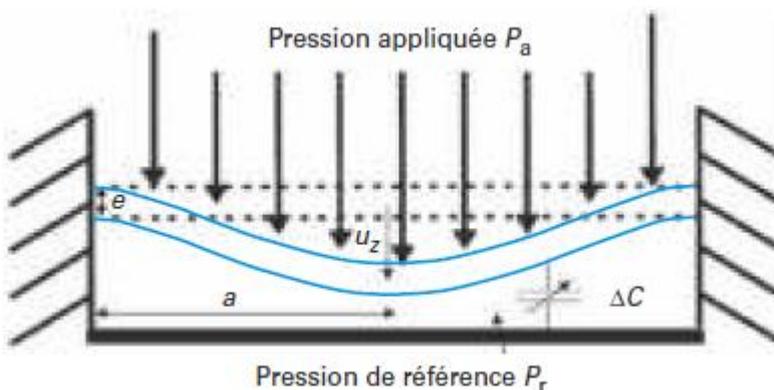


Figure 3.25 – Membrane pour détection capacitive

1.4 Acoustique

Les microphones utilisent généralement une membrane associée à l'effet capacitif, piézorésistif ou piézoélectrique. Le principe de fonctionnement est le même que celui des capteurs de pression, excepté qu'il n'est pas nécessaire de mesurer la pression statique mais seulement des variations de pression (à partir de quelques Hz ou dizaine de Hz, par exemple).

La membrane soumise à la surpression acoustique va vibrer à une fréquence et une amplitude qui dépendent respectivement de la fréquence et du niveau du signal sonore. La différence avec les capteurs de pression statique d'un point de vue technologique vient du fait que les membranes peuvent être percées de façon à effectuer l'équilibre des pressions statiques à l'intérieur et à l'extérieur du microphone. Ceci implique qu'il est possible d'utiliser le micro-usinage de surface.

1.5 Chimique

La réaction chimique de l'espèce détectée avec la surface du capteur peut créer :

- une nouvelle espèce chimique, qui va générer une variation de potentiel : capteur potentiométrique, type ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor) ;
- une libération de chaleur par la combustion du gaz ayant réagi (capteur calorimétrique ou catalytique) ;
- une modification des propriétés du capteur : résistivité (capteur à oxyde métallique), capacité, masse, fréquence de résonance.

On utilise aussi les propriétés du gaz à identifier, comme sa conductivité thermique, en mesurant la température d'un élément résistif modifiée par l'exposition à ce gaz.

Un capteur chimique est caractérisé par plusieurs paramètres :

- la réversibilité qui lui donne la possibilité d'usages répétés ;
- la sensibilité qui détermine son niveau de réponse à une espèce donnée ;
- la sélectivité qui se réfère à son degré de spécificité à une cible particulière ;
- le temps de réponse ;
- la durée de vie ;
- la consommation.

L'interférant principal est l'humidité. L'augmentation de la sensibilité à généralement pour conséquence une diminution de la sélectivité. La sélectivité peut être améliorée en implémentant des réseaux de capteurs, chaque capteur n'étant pas forcément à la même température, ni recouvert de la même couche sensible.

Chapitre 4 : Outils de simulation et de conception

4.1 Modélisation Comportementale

4.1.1 Les trois vues d'un circuit intégré

Dans la phase de synthèse physique, on peut décrire le composant à trois niveaux d'abstraction :

- vue comportementale (« behaviour ») : Elle permet de simuler et donc d'analyser le comportement, mais ne décrit pas la structure interne du composant modélisé.
- vue structurelle (« net-list ») : elle décrit la structure interne, c'est-à-dire la façon dont le composant peut se décomposer en une interconnexion de composants plus simples.
- vue physique (« layout ») : elle décrit le dessin des masques de fabrication qui sont utilisés pour graver le silicium.

Le processus de conception consiste à transformer progressivement la description comportementale en une description physique (utilisable par le fabricant de circuits). Les outils CAO de synthèse physique permettent d'automatiser cette transformation.

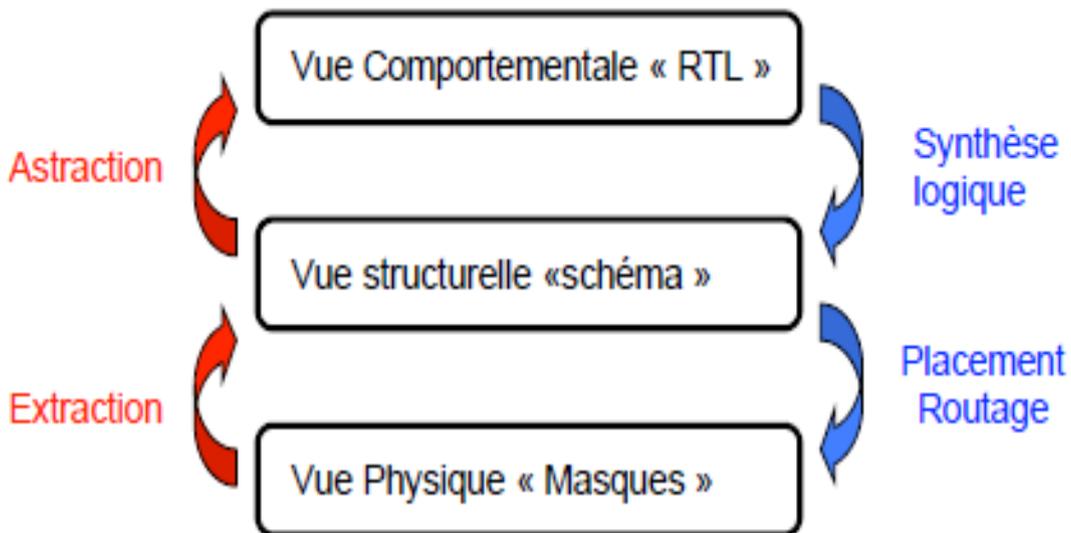
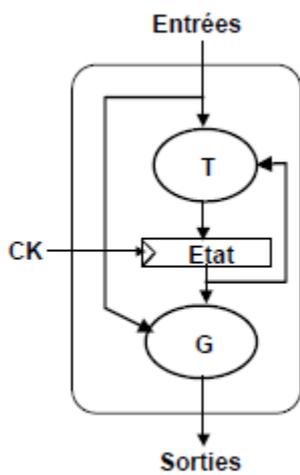


Figure 4.1 Les trois vues d'un circuit intégré

La vue comportementale RTL



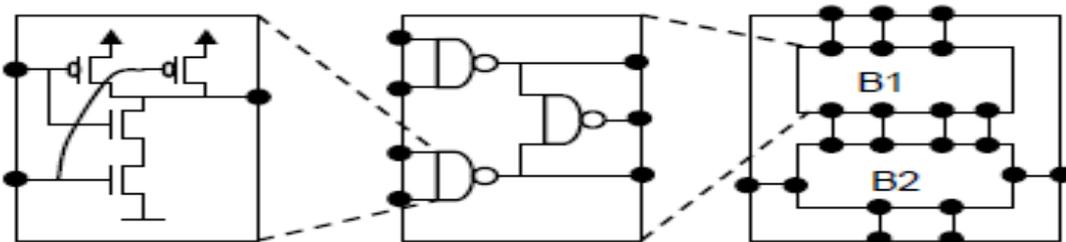
Modèle de référence :
 Automates d'états synchrones
Fonction de transition :
 $\text{NextEtat} \leftarrow T(\text{Etat}, \text{Entrées})$
Fonction de génération :
 $\text{Sorties} \leftarrow G(\text{Etat}, \text{Entrées})$

La vue structurelle

C'est une description hiérarchique du schéma d'interconnexion.

Les éléments terminaux de cette description sont

- soit des cellules logiques
- soit des transistors



Schéma

« Transistors »

Schéma

« Portes logiques »

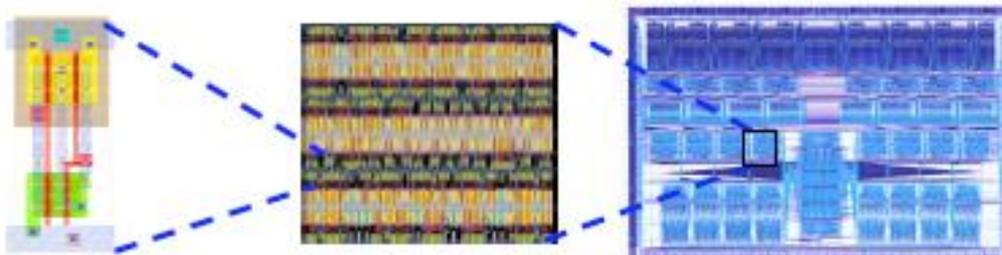
Schéma

« Blocs »

La vue physique

Elle représente le dessin des masques de fabrication.

C'est une description modulaire et hiérarchique



Schéma

« Transistors »

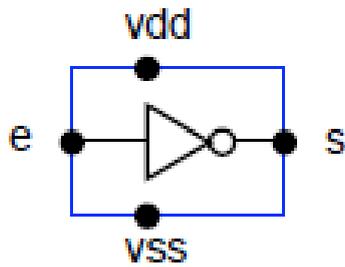
Schéma

« Portes logiques »

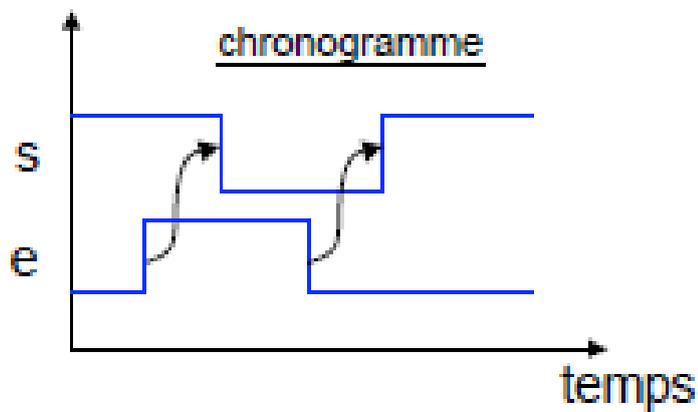
Schéma

« Blocs »

Vue comportementale inverseur CMOS



Ce composant matériel est décrit comme une « boîte noire », dont on ne connaît que l'interface (ports d'entrée/sortie), et le comportement logico-temporel :



LANGAGE VHDL

```
entity inverter is
```

```
-- liste des ports d'entrée/sortie
```

```
port (
```

```
e : in bit ;
```

```
s : out bit ;
```

```
vss : in bit ;
```

vdd : in bit

);

end inverter ;

architecture vbe **of** inverter **is**

-- comportement logico-temporel

begin

s <= **not** e **after** 200 ps ;

end vbe ;

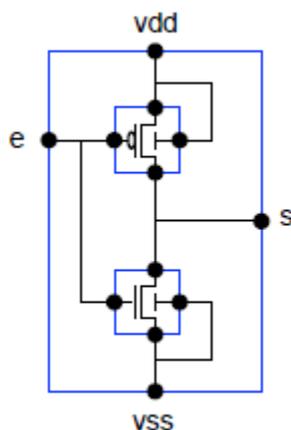
Vue structurelle inverseur CMOS

La structure interne du composant est décrite comme une interconnexion de composants matériels plus simples :

Dans le cas de l'inverseur :

- un transistor N
- un transistor P

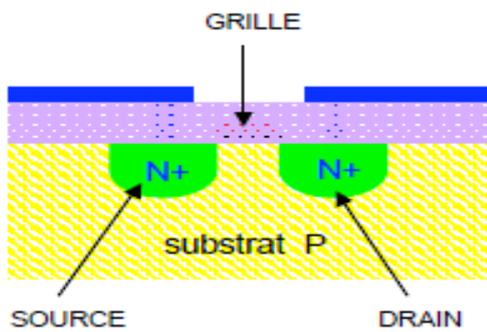
Grille	0	1
Transistor N	bloqué	passant
Transistor P	passant	bloqué



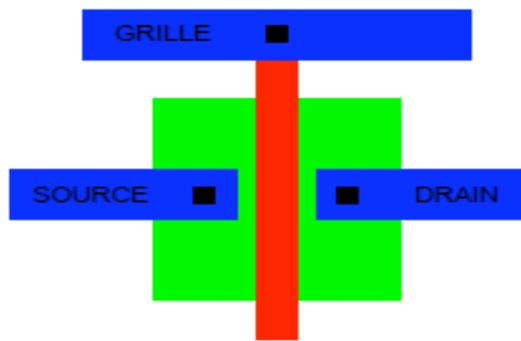
Vue physique inverseur CMOS

Le transistor NMOS

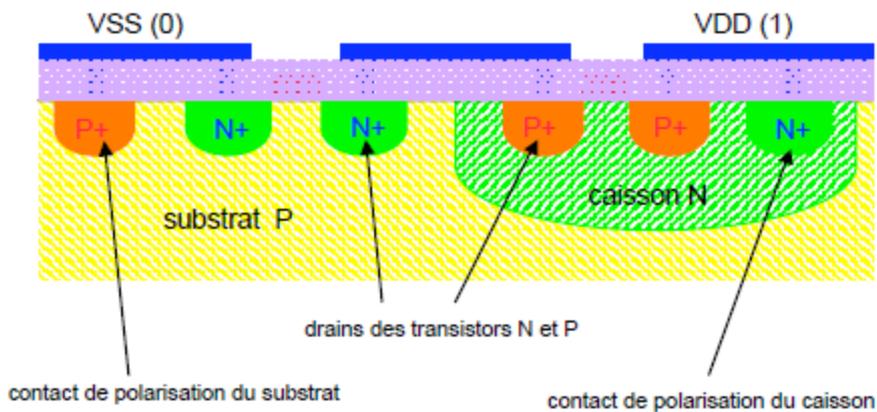
Le transistor NMOS



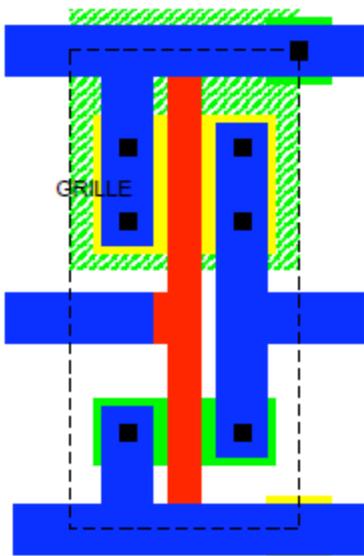
Vue en coupe



Dessin des masques



vue en coupe de l'inverseur CMOS (2 transistors)



Dessin des masques

- vert : diffusion N
 - jaune : diffusion P
 - vert hachuré : caisson N
 - rouge : Polysilicium
 - bleu : métal 1
 - noir : contact (trou dans l'oxyde de 1er niveau)
- Les 4 ports d'entrée/sortie de l'inverseur (e,s,vdd,vss) sont en métal 1.

La « boîte d'aboutement » définit l'encombrement de la cellule, mais ne correspond pas à une couche physique.

4.1.2 Conception descendante

Top-down ou Bottom-up ?

La méthode générale de conception est une méthode **descendante** (*top-down*).

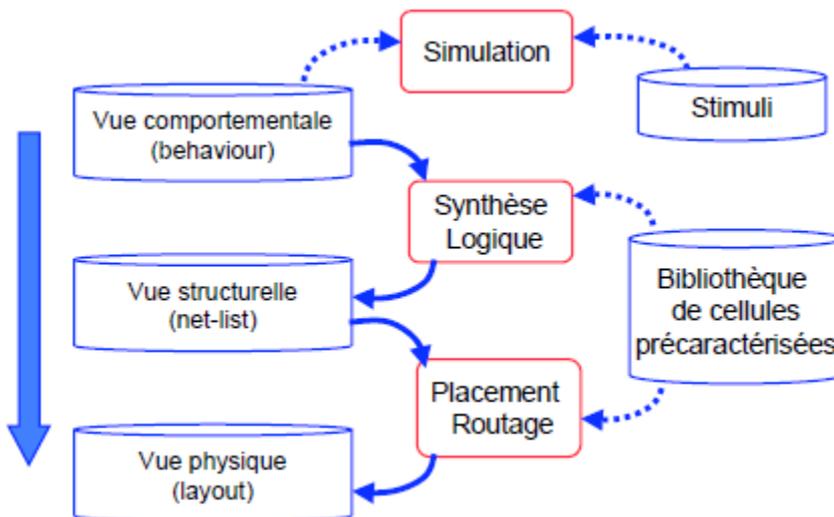
On met en œuvre des techniques de synthèse logique et de placement/routage, en partant de la spécification comportementale pour aboutir au dessin des masques.

Cependant, pour vérifier que l'implémentation est conforme à la spécification, il faut des étapes d'extraction et/ou d'abstraction qui s'inscrivent dans une stratégie **ascendante** (*bottom up*).

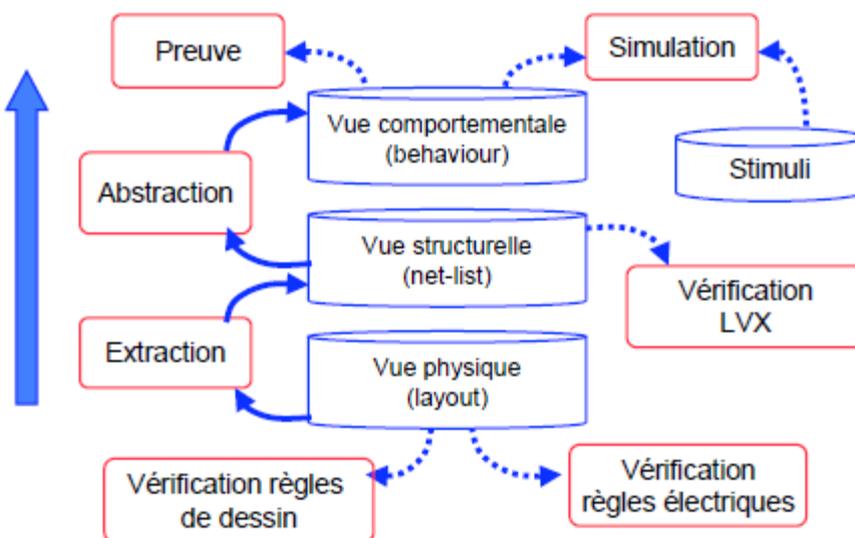
La définition du schéma par raffinement successif est un processus **descendant**, mais les éléments terminaux du schéma (portes logiques) doivent nécessairement appartenir à une (ou plusieurs) bibliothèques de cellules précaractérisées.

La méthode de conception est donc à la fois **descendante et ascendante**.

Conception descendante



Vérification « ascendante »



Spécification...

Règle absolue : Il faut spécifier avant de développer...

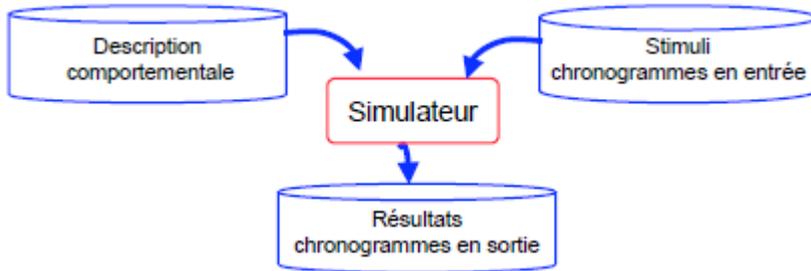
- Le point de départ de la synthèse physique est donc toujours la description comportementale, qui joue le rôle de spécification, pour la synthèse physique, et qui sera utilisée comme référence à toutes les étapes de conception ultérieures.

- Cette description comportementale peut être elle-même générée par des outils de synthèse de plus haut niveau (synthèse d'architecture, compilateurs de silicium), à partir de descriptions plus abstraites.

- Dans ce cours (et dans les TPs associés), on écrira la description comportementale « à la main ».

Validation / Simulation...

Le principal outil de validation de la description comportementale est la simulation, ce qui nécessite donc de développer les stimuli qui seront appliqués sur le modèle du composant à valider.



La qualité de la validation dépendant entièrement de la qualité des stimuli, la génération des stimuli peut prendre autant de temps que l'écriture du modèle du composant...

Simulation « Zéro-délay »

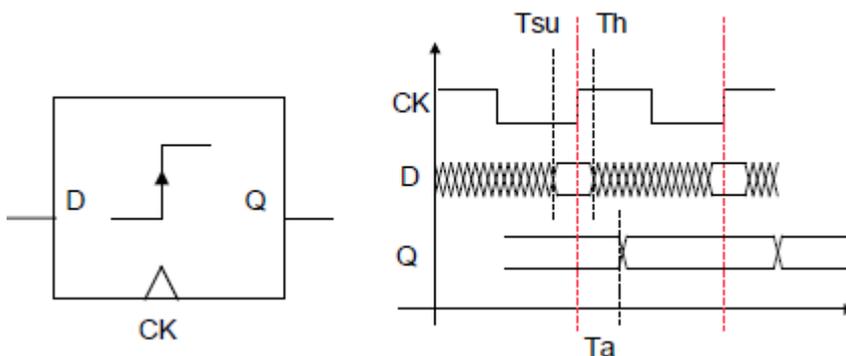
Au début du processus de conception, on ne connaît pas les temps de propagation des signaux (ces temps dépendent du schéma en portes qui sera généré par la synthèse, ainsi que du placement/routage).

On écrit donc un modèle « zéro délai », où les seules informations temporelles sont apportées par les fronts successifs du signal d'horloge, car les temps de propagation dans la logique combinatoire sont supposés infiniment petits par rapport au temps de cycle.

Les stimuli (c'est à dire les chronogrammes des signaux d'entrée) doivent donc être positionnés par rapport aux fronts du signal d'horloge.

Une bascule D permet de « mémoriser » 1 bit

- L'écriture d'une nouvelle valeur a lieu lors du front montant du signal CK
- L'entrée D doit être stable un peu avant (T_{su}) et un peu après (T_h) le front
- La sortie Q change de valeur au plus une fois par cycle après le front (T_a)

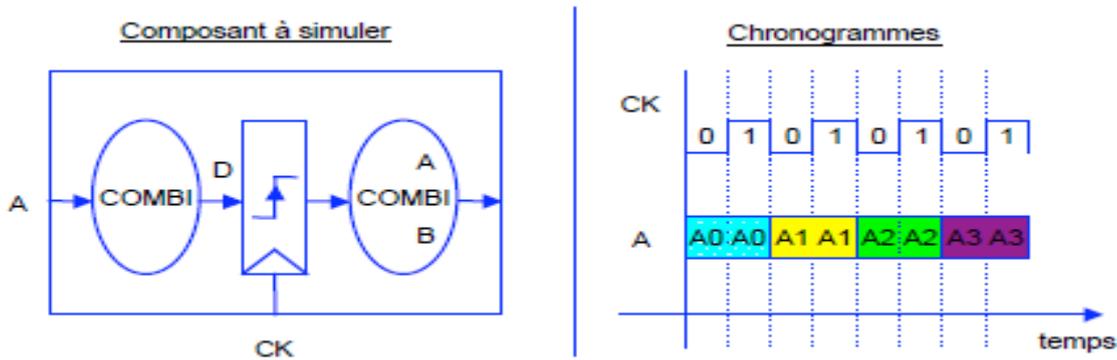


Structure temporelle des stimuli

A chaque port d'entrée est associé un un chronogramme.

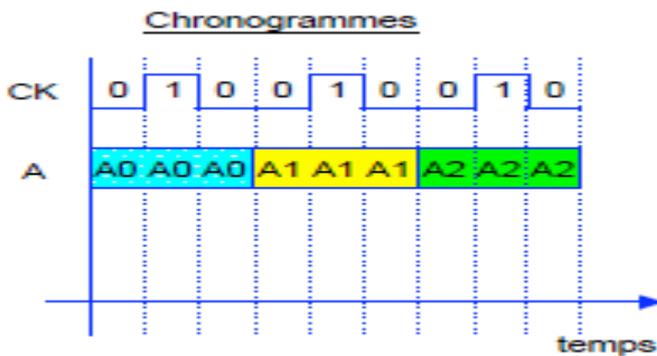
Si le composant simulé ne contient que des registres à échantillonnage sur front (bascules D), on utilise un signal d'horloge CK à deux phases.

Les signaux d'entrée ne doivent pas changer de valeur au moment du front actif du signal CK.



Cas des latches

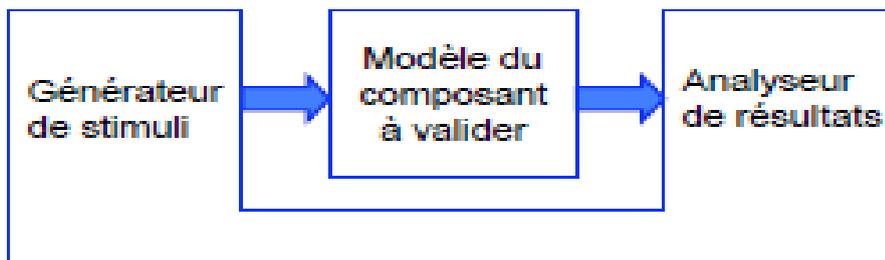
Si le composant simulé contient des latches à échantillonnage sur état, il faut utiliser un signal d'horloge CK à trois phases, car certains signaux d'autorisation d'écriture doivent être stables AVANT le front montant de CK, et rester stables jusqu' APRES le front descendant de CK.



Simulation : Banc de test

Un banc de test (test-bench) est un modèle comportemental de l'environnement dans lequel sera plongé le composant à valider.

La technique du banc de test permet d'éviter l'écriture - fastidieuse - des séquences de stimuli, et les - inévitables - erreurs humaines dans la phase d'analyse des résultats de simulation.



Attention : L'écriture du test-bench peut prendre autant de temps que l'écriture du modèle du composant à valider.

Suggestion : Le modèle du test-bench et le modèle du composant peuvent être développés en parallèle par deux personnes différentes.

4.1.3 Modélisation comportementale

1. Niveau « algorithmique »

- interface défini « au bit près » par une liste de signaux
- pas de signal d'horloge explicite
- pas d'identification des registres
- sémantique séquentielle : un (ou plusieurs) processus

2. Niveau « automate abstrait »

- interface défini « au bit près » par une liste de signaux
- le signal d'horloge est explicite
- les registres sont identifiés, mais les valeurs stockées (états) ne sont pas représentées au bit près.
- sémantique séquentielle : un (ou plusieurs) processus

3. Niveau « data-flow »

- interface défini « au bit près » par une liste de signaux
- le signal d'horloge est explicite
- les registres sont identifiés, et les valeurs stockées sont représentées au bit près.
- sémantique « data-flow » : assignations concurrentes

Le niveau « RTL »

- Les descriptions comportementales de type 1 servent d'entrée aux outils de synthèse d'architecture, et ne seront pas considérées ici.
- Les descriptions comportementales de type 2 et 3 sont dites de niveau «RTL » (Register Transfer Level). Une description RTL est assez proche de la réalisation matérielle, puisqu'on peut décrire explicitement - cycle par cycle - la succession des états internes du composant (c'est à dire les valeurs stockées dans les registres).
- Le niveau d'abstraction RTL est fondamental, car il sert d'entrée aux outils de « synthèse physique », qui permettent d'automatiser la génération du dessin des masques (vue physique). Ce sont les différentes étapes de cette « synthèse physique », qui sont analysées dans ce cours.

Langages de description de matériel

On utilise généralement des langages spécialisés, appelés

HDL (Hardware Description Language) pour décrire le comportement du matériel :

Différents objectifs :

- simulation logico-temporelle
- synthèse logique
- preuve (?)

Des caractéristiques communes :

- Expression du parallélisme du matériel
- Descriptions mixtes comportementale et structurelles

- support de types spécialisés (vecteurs de bits)
- Représentation explicite du temps

Principaux HDLs :

VHDL, VERILOG, SYSTEMC

Langage VHDL

Un modèle VHDL d'un composant matériel comporte deux parties :

- La partie « Entity » décrit l'interface du composant.
- La partie « Architecture » décrit son comportement, ou sa structure interne.

Il peut exister plusieurs architectures pour un même composant, correspondant à différents niveaux d'abstraction :

- description comportementale « algorithmique »
- description comportementale « automate abstrait »
- description comportementale « data-flow »
- description structurelle

Attention : Le langage VHDL permettant de représenter différents niveaux d'abstraction d'un circuit, l'expression « modèle VHDL » sans qualificatif est extrêmement ambiguë, et doit être évitée...

VHDL : assignations concurrentes

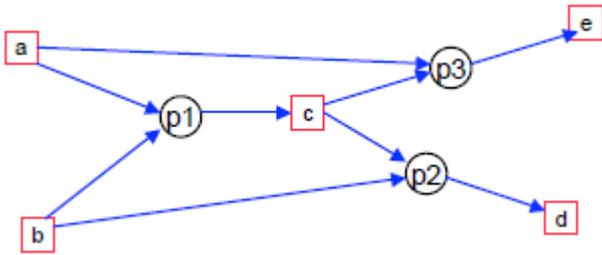
Un modèle VHDL est dit « data-flow » s'il ne comporte que des assignations concurrentes : Le circuit est décrit comme un ensemble de « processus » interconnectés par des signaux, qui s'exécutent en parallèle.

- Chaque assignation correspond à un processus.
- L'ordre d'écriture des assignations concurrentes est sans signification.
- un signal ne peut être assigné qu'une seule fois (assignation unique).
- Une description comportementale de type « data-flow » permet de décrire le parallélisme intrinsèque d'un **réseau Booléen**

Réseau Booléen

Un réseau Booléen est un graphe orienté biparti (deux types de noeuds):

- Le premier type de noeud (carré rouge) représente les « signaux ».
- Le deuxième type de noeud (rond noir) représente les « processus ».
- Une variable booléenne est associée à chaque signal.
- Une Fonction Booléenne permettant de calculer la valeur du signal de sortie en fonction de la valeur des signaux d'entrée est associée à chaque processus.



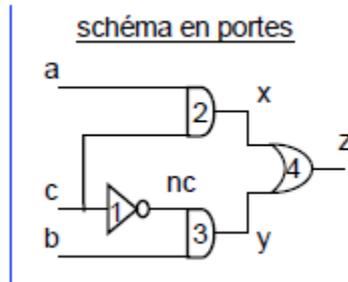
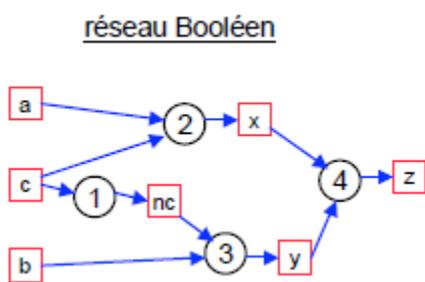
Exemple

Description VHDL de type « assignments concurrentes »

```

z <= x or y ;
nc <= not c ;
x <= a and c ;
y <= b and nc ;

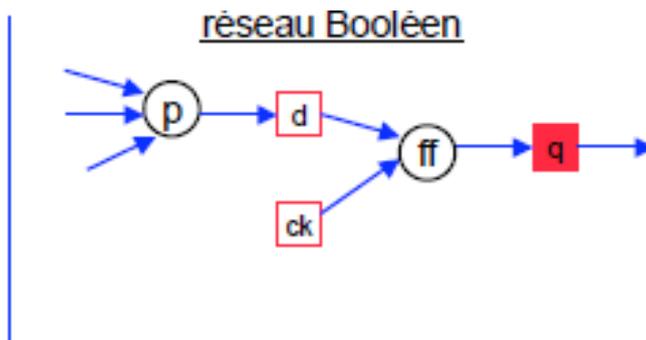
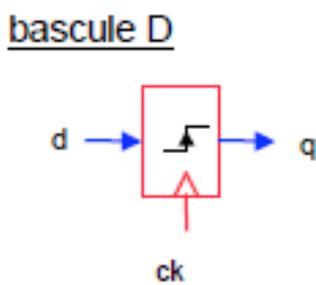
```



Représentation des registres

Le réseau Booléen associé à un opérateur combinatoire est un DAG (graphe orienté acyclique), car on ne doit pas trouver de dépendances cycliques dans un opérateur combinatoire.

Si le circuit modélisé contient des registres, les variables Booléennes stockées dans les registres sont représentées par des signaux d'un type particulier, puisque - dans un circuit synchrone - l'écriture dans les registres est conditionnée par le front du signal d'horloge.



Exemple: AND3

```

entity AND_3 is
port (

```

```

e1 : in bit;
e2 : in bit;
e3 : in bit;
s : out bit
);
end entity
architecture ARCH of AND_3 is
begin -- ARCH
s <= e1 and e2 and e3;
end ARCH

```

Example: Full Adder

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use IEEE.numeric_std.all
entity full_add1 is
port (
a, b, cin : in std_logic;
s, cout : out std_logic;
);
end entity;
architecture ARCH of full_add1 is
signal resultat : unsigned (1 downto 0);
begin
result <= ('0' & a) + ('0' & b) + ('0' & c);
s <= resultat(0);
cout <= resultat(1);

```

Example: Additionneur 4 bits

```

[..libraries ..]
entity adder4 is
port (
a, b : in unsigned(3 downto 0);
s : out unsigned(3 downto 0);

```

```

cout : out std_logic
);
end entity;
architecture ARCH of adder4 is
signal c : unsigned (2 downto 0);
Component full_add1 is
port (
a, b, cin : in std_logic;
s, cout : out std_logic;
);
end entity;
architecture ARCH of adder4 is
signal c : unsigned (2 downto 0);
Component full_add1 is
port (
a, b, cin : in std_logic;
s, cout : out std_logic;
);
end entity;
begin
inst_FA_1 : full_add1 port map(a(0),b(0),'0',s(0),c(0));
inst_FA_2 : full_add1 port map(a(1),b(1),c(0),s(1),c(1));
inst_FA_3 : full_add1 port map(a(2),b(2),c(1),s(2),c(2));
inst_FA_2 : full_add1 port map(a(3),b(3),c(2),s(3),c(3));
end ARCH;

```

Exemple: un registre

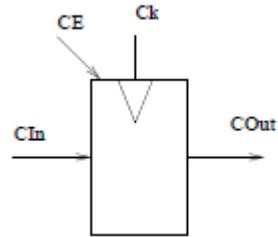
- registre avec clock enable.
- Le processus est réveillé lors d'une transition sur Ck
- Les If internes permettent d'exprimer la condition: front montant de l'horloge avec CE à 1.

```
PROCESS(ck)
```

```

BEGIN
IF (ck = '1' AND ck'EVENT)
THEN
IF CE='1' THEN Out <= In;
END IF;
END IF;
END PROCESS;

```

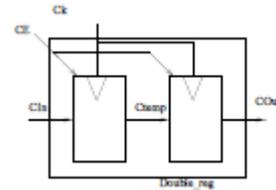


Exemple : double registre (déclaration)

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
ENTITY DOUBLE_REG IS
port(CIn, Ck, CE: IN STD_LOGIC;
COut: out STD_LOGIC);
END ENTITY DOUBLE_REG;
ARCHITECTURE behavioural OF DOUBLE_REG IS

```



```

-- Declaration de signaux du composant

```

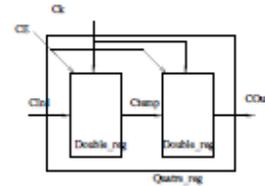
```

BEGIN
PROCESS(ck)
Variable CTemp: STD_LOGIC;
-- Declaration de signaux
-- ou variables du process
BEGIN
IF (ck = '1' AND ck'EVENT)
THEN
IF CE='1' THEN
COut <= CTemp;
CTemp := CIn;
END IF;
END IF;
END PROCESS;
END behavioural;

```

Exemple: double registre (instanciation)

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
ENTITY QUATRE_REG IS
port(Cin1, Ck, CE: IN STD_LOGIC;
COut1: out STD_LOGIC);
END ENTITY QUATRE_REG;
ARCHITECTURE behavioural OF QUATRE_REG IS
Signal CTemp: STD_LOGIC;
COMPONENT DOUBLE_REG IS
port(CIn, Ck, CE: IN STD_LOGIC;
COut: out STD_LOGIC);
END COMPONENT;
Begin
IO: DOUBLE_REG port map (Cin => Cin1,
Ck => Ck,
CE => CE,
Cout => CTemp);
I1: DOUBLE_REG port map (Cin => CTemp,
Ck => Ck,
CE => CE,
Cout => COut1);
END behavioural;
```



4.1 Introduction à la simulation par éléments finis

Qu'est-ce qu'un logiciel d'analyse par éléments finis ?

L'analyse par éléments finis (FEA) est une méthode informatisée qui permet d'anticiper la réaction d'un produit exposé à des forces du monde réel, par exemple, les vibrations, la chaleur, les écoulements de fluides et d'autres manifestations physiques. Elle détermine si un produit peut rompre, s'user ou fonctionner tel qu'il a été conçu. Bien qu'on l'appelle analyse, elle intervient dans le processus de développement des produits et permet d'anticiper d'éventuelles conséquences de l'utilisation du produit.

La FEA consiste à diviser un objet réel en une multitude (des milliers de centaines de milliers) d'éléments finis, tels que des petits cubes. Les équations mathématiques permettent d'anticiper le

comportement de chacun de ces éléments. Un ordinateur additionne ensuite tous ces comportements pour prévoir celui de l'objet réel.

L'analyse par éléments finis permet de prévoir le comportement de certains produits qui subissent divers effets physiques :

- Contraintes mécaniques
- Vibrations mécaniques
- Fatigue
- Mouvements
- Transfert thermique
- Écoulement de fluides
- Électrostatique
- Moulage par injection de plastique

1 – Enseigner les éléments finis ?

La simulation par éléments finis, autrefois réservée aux filières post-baccalauréat, est de plus en plus utilisée dans l'enseignement des sciences de l'ingénieur au lycée. Elle fait maintenant partie intégrante des programmes des classes de première et terminale STI2D et S option SI, qui précisent que les lycéens doivent être capables d'interpréter et de critiquer les résultats fournis par les logiciels.

Or, la théorie des éléments finis repose sur des notions mathématiques enseignées bien après le baccalauréat, et notamment sur l'étude des équations aux dérivées partielles. Il est donc impossible pour un lycéen de comprendre de façon déductive « pourquoi » le logiciel donne tel type de résultat. En revanche, il est possible de découvrir les éléments finis à l'aide d'une pédagogie par l'action. Pour mettre en œuvre cette démarche, les enseignants doivent être eux-mêmes capables de :

- Conduire une simulation par éléments finis de façon pertinente, en effectuant des choix judicieux à chaque étape ;
- En interpréter les résultats en fonction des choix précédemment effectués.

Cette compétence nécessite une bonne compréhension des concepts qui sous-tendent la simulation par éléments finis. Cette ressource, principalement destinée aux enseignants ayant une faible expérience des logiciels d'éléments finis, se propose de présenter ces différents concepts, et de montrer comment ceux-ci s'articulent au cours de la simulation.

Notons bien que les ressources de ce site ne sont pas des cours d'éléments finis et ne s'attardent ni sur l'étude des problèmes théoriques qui sous-tendent ces simulations, ni sur la description mathématique détaillée des procédures programmées dans les logiciels : nous nous limitons ici au minimum nécessaire, et renvoyons le lecteur désireux d'approfondir ces deux aspects vers les nombreux cours en ligne consacrés à ces thèmes. Par ailleurs, cette ressource traitant de l'application des éléments finis à la mécanique des solides déformables, nous supposons acquises

les bases de la mécanique des milieux continus ; là encore, nous invitons le lecteur à consulter l'un

des nombreux cours dédiés à cette discipline si une notion évoquée ici lui fait défaut.

2 - Quelques concepts généraux

La simulation par éléments finis ou « méthode des éléments finis », au sens premier du terme, désigne un ensemble de techniques numériques permettant de résoudre approximativement une certaine classe de problèmes mathématiques, basés sur des équations aux dérivées partielles, dont on ne sait généralement pas trouver les solutions exactes. Il s'agit d'un outil mathématique qui possède de nombreuses applications, allant de la physique des milieux continus au calcul de probabilités.

Dans cette ressource, nous nous intéressons à son application la plus courante : la simulation du comportement des pièces mécaniques (ou structures) modélisées à l'aide de la mécanique des milieux continus solides, c'est-à-dire le calcul des déplacements, déformations, contraintes et efforts prédits par cette théorie (figure 1). L'utilisation des éléments finis dans d'autres branches de la physique des milieux continus (comme la thermique) est toutefois assez similaire.

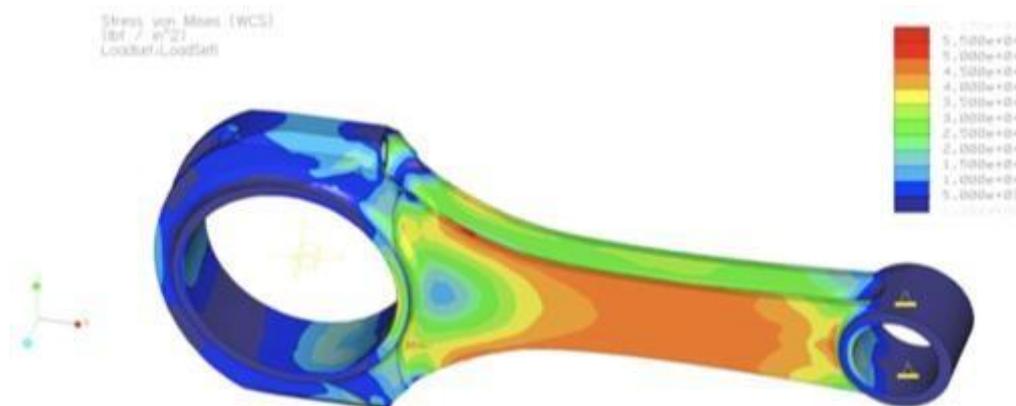


Figure 1 : Un exemple de champ de contraintes calculé dans une simulation par éléments finis
Image LN Engineering

2.1 - La théorie : la discrétisation et les fonctions de base

Comme toute simulation, la simulation par éléments finis repose sur une théorie, c'est-à-dire un ensemble de lois, hypothèses, théorèmes... permettant d'exprimer un résultat en fonction de données de départ ; c'est dans le cadre de cette théorie que les modèles et les résultats sont définis, et il est donc important d'en avoir au moins une vue d'ensemble.

Ici, la théorie retenue est issue de la mécanique des milieux continus par une transformation nommée discrétisation. Toutes les théories de la mécanique des milieux continus peuvent être ainsi discrétisées, qu'il s'agisse de la version générale 3D, de simplifications 2D (contraintes planes, déformations planes, axisymétrie...) ou encore des théories des poutres, plaques ou coques.

La discrétisation de la mécanique des milieux continus repose sur deux modifications :

- Une hypothèse cinématique supplémentaire sur l'allure du champ de déplacement, qui est recherché sous la forme d'une combinaison linéaire (inconnue) de fonctions de base connues, définies dans la suite de cette ressource ;
- Une transformation des équations d'équilibre du milieu continu, destinée à les rendre mathématiquement compatibles avec l'hypothèse supplémentaire que l'on vient d'introduire.

Par conséquent, les lois utilisées au cours d'une simulation par éléments finis ne sont pas exactement les lois de la mécanique des milieux continus : il s'agit de lois discrétisées, donc différentes, qui conduisent ainsi à des solutions différentes. C'est pourquoi on dit généralement que les éléments finis sont une technique de résolution approchée des équations aux dérivées partielles.

La discrétisation et les fonctions de base ont naturellement une influence considérable sur la modélisation, qui s'effectue dans le cadre théorique décrit ci-dessus, et sur le résultat, qui ne sera pertinent que si les fonctions de base sont capables de représenter un champ de déplacement réaliste. Nous allons voir que les fonctions de base sont définies en fonction du modèle du produit ; cette définition, ainsi que son influence sur le résultat, sont présentées plus en détail dans la ressource « *Résolution d'un modèle éléments finis : 1. Du modèle aux équations* ».

2.2 - Le modèle du produit ou maillage

Dans une simulation par éléments finis, le produit est modélisé par un maillage, dont la définition s'appuie sur deux objets géométriques. Le premier est un découpage du domaine géométrique occupé par le produit en sous-domaines de formes simples. Ces sous-domaines sont tridimensionnels (volumes), bidimensionnels (surfaces) ou unidimensionnels (lignes), selon la théorie dans laquelle on se place (par exemple, en mécanique des milieux continus 3D, ce sont des volumes, mais en théorie des poutres, il s'agit de lignes). Quelques exemples de découpages 2D et 3D sont représentés sur la figure 2.

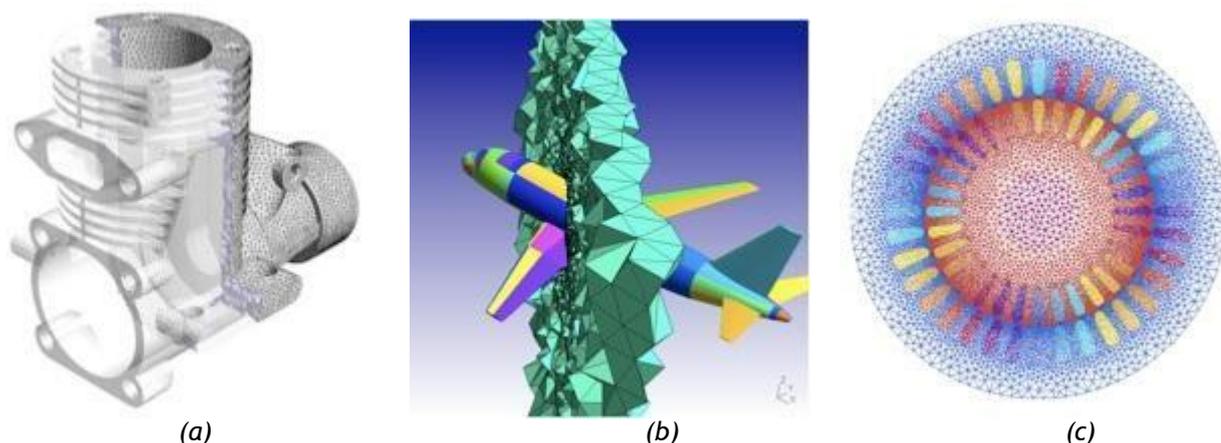


Figure 2 : Exemples de découpages géométriques appartenant à des maillages :
 (a) le carter d'un moteur (pour une simulation de mécanique des milieux continus 3D),
 (b) une partie du volume d'air entourant un avion (pour une simulation d'acoustique 3D),
 (c) un modèle plan d'un moteur électrique (pour une simulation d'électromagnétisme 2D).
 Images site du mailleur libre Gmsh

Le deuxième objet est une liste de points particuliers, situés aux sommets des sous-domaines ainsi que, quelquefois, aux milieux de leurs arêtes : les nœuds (figure 3).

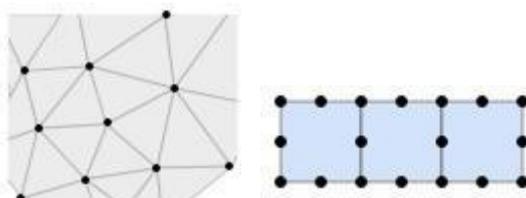


Figure 3 : Deux maillages plans avec leurs nœuds.

Les sous-domaines et les nœuds servent à définir les fonctions de base (utilisées pour représenter le champ de déplacement). Ces fonctions sont en effet définies par morceaux, dans chaque sous-

domaine, et chacune d'entre elles est associée à un nœud. Elles sont construites de sorte à réaliser une interpolation du champ de déplacement à partir de valeurs discrètes définies aux nœuds ; cette interpolation est souvent affine ou quadratique par morceaux (figure 4) bien que le cas général soit plus compliqué. La nature de l'interpolation dépend des sous-domaines, qui sont choisis par l'utilisateur ; la construction des fonctions réalisant cette interpolation est, quant à elle, réalisée automatiquement par le logiciel.



Figure 4 : Deux interpolations simples d'un champ de déplacement 1D (issu de la théorie des poutres, par exemple) : (a) avec des fonctions affines par morceaux, (b) avec des fonctions quadratiques par morceaux.

Un sous-domaine muni de ses nœuds et de leurs fonctions de base s'appelle un élément fini, ou simplement élément ; les éléments sont les « briques » à l'aide desquelles on modélise le produit. En pratique, les logiciels de simulation possèdent des bibliothèques d'éléments dans lesquelles l'utilisateur peut piocher, qui se distinguent notamment par leurs topologies et le nombre de leurs nœuds (figure 5) ; l'utilisateur peut généralement spécifier la forme des éléments en positionnant leurs nœuds afin de s'adapter à la géométrie à modéliser, et le logiciel adapte automatiquement la définition des fonctions de base de façon transparente pour l'utilisateur. La ressource « *Quelques types d'éléments finis* » permet d'aller plus loin dans la présentation de quelques éléments courants, ainsi que leurs fonctions de base.

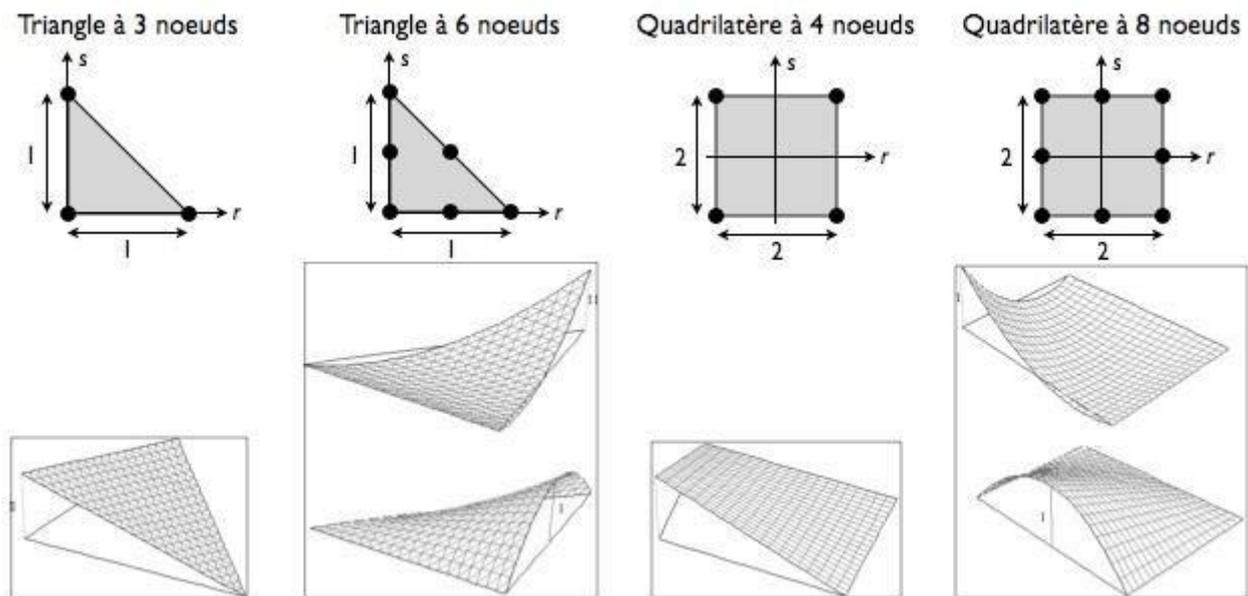


Figure 5 : Quelques types d'éléments bidimensionnels courants.

Le maillage est ainsi constitué d'un nuage de nœuds, ainsi que d'éléments s'appuyant sur ces nœuds ; la plupart des logiciels peuvent assister l'utilisateur en construisant automatiquement un maillage à partir d'un domaine géométrique, issu par exemple d'un fichier CAO. Il faut pour cela leur indiquer le type et la taille des éléments, ce qui nécessite de bien comprendre l'influence de ces paramètres.

Schématiquement, le maillage joue deux rôles essentiels dans la simulation. Premièrement, il détermine le modèle géométrique du produit, obtenu en réunissant les différents sous-domaines.

Deuxièmement, il détermine également l'allure du champ de déplacement, et donc de déformation et de contrainte, par l'intermédiaire des fonctions de base. Ainsi, le maillage influe fortement sur la pertinence des résultats et doit donc être réalisé avec soin. Les quatre ressources « Le modèle en éléments finis d'un produit dans son environnement » présente les différentes étapes de sa réalisation.

2.3 - Le modèle de l'environnement : efforts et déplacements imposés

En éléments finis, tout comme en mécanique des milieux continus, l'action de l'environnement sur le produit est modélisée par des efforts extérieurs et des déplacements imposés (nous laissons de côté les modélisations plus complexes comme les contacts avec décollement et/ou frottement, ou encore les liaisons élastiques). Cependant, le formalisme mathématique utilisé pour représenter ces modèles n'est pas le même qu'en mécanique des milieux continus : il est adapté à la discrétisation. L'écriture de la théorie discrétisée montre qu'en éléments finis, les déplacements et les efforts sont représentés par des quantités nodales :

- Le champ de déplacement est interpolé à partir de ses valeurs aux nœuds, dites déplacements nodaux ;
- Les équations d'équilibre ne portent plus sur le champ de contrainte, mais sur des efforts nodaux définis à l'aide du principe des travaux virtuels.

Le modèle de l'environnement doit donc être écrit sous forme de déplacements nodaux imposés et d'efforts nodaux extérieurs (figure 6).



Figure 6 : Modélisation de l'environnement par éléments finis :
(a) efforts nodaux extérieurs, (b) déplacements nodaux imposés.

Ce formalisme étant peu intuitif (voir figure 7) les logiciels proposent des bibliothèques de modèles courants issus pour la plupart de la mécanique des milieux continus : l'utilisateur spécifie les valeurs numériques associées à ces modèles, et le logiciel calcule alors automatiquement les efforts ou déplacements nodaux correspondants. Par exemple, une action de contact pourra être modélisée par une distribution de pression (figure 7a) que le logiciel traduit ensuite en efforts nodaux (figure 7b).



Figure 7 : (a) Une distribution de pression uniforme ;
(b) les efforts nodaux correspondants. On constate que la répartition obtenue n'est pas très intuitive...

En pratique, la modélisation de l'action de l'environnement doit respecter deux contraintes. La première est que le modèle de l'environnement ne peut être quelconque : il est soumis à des exigences héritées de la statique des milieux continus, à savoir le blocage des mouvements de corps rigide et, le cas échéant, l'écriture des conditions de symétrie. Si ces exigences ne sont pas respectées, le calcul est impossible, ou les résultats sont faux. La deuxième est que certains des modèles proposés par les logiciels sont rarement pertinents du point de vue du sens physique, et

leur emploi entraîne fréquemment des écarts conséquents avec la réalité. Le respect de ces deux contraintes peut être une source de difficultés ; ces aspects sont précisés dans la ressource « Le modèle en éléments finis d'un produit dans son environnement : 4. Modélisation du monde extérieur ».

2.4 - Le calcul et l'analyse des résultats

Pour utiliser un logiciel de simulation par éléments finis, il faut modéliser le produit (c'est-à-dire réaliser un maillage) et l'action de son environnement (c'est-à-dire lui appliquer des efforts extérieurs et des déplacements imposés). Il faut également choisir un modèle du comportement du matériau, et l'attribuer aux éléments du maillage. A partir de ces modèles, le logiciel effectue ensuite un calcul qui se décompose en trois étapes (figure 8) :

1. Le logiciel construit un système d'équations, correspondant aux équations d'équilibre des nœuds et aux déplacements nodaux imposés, en exploitant les données des modèles : c'est le pré-traitement.
2. Le logiciel résout ce système d'équations, et obtient les déplacements nodaux et les efforts nodaux de liaison (correspondant aux déplacements imposés).
3. Le logiciel reconstruit alors les résultats qui lui sont demandés (il s'agit typiquement des champs de déplacement, de déformation et de contrainte) et, le cas échéant, les traite afin de les tracer à l'écran : c'est le post-traitement.

Le principe de ces trois étapes est présenté dans les deux ressources « Résolution d'un modèle éléments finis ».

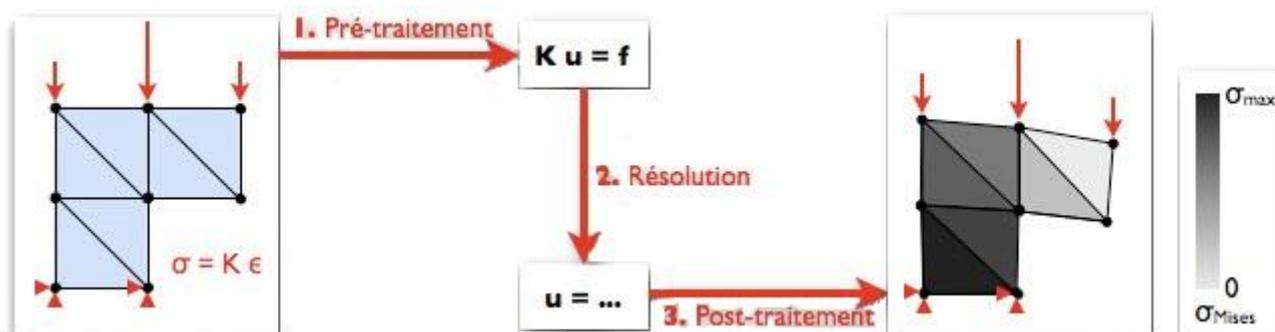


Figure 8 : Les trois étapes du calcul : pré-traitement, résolution et post-traitement.

Ce calcul est automatisé et s'effectue sans intervention de l'utilisateur ; il est cependant nécessaire de connaître son fonctionnement pour deux raisons. Premièrement, la théorie qui le sous-tend repose sur des hypothèses qui introduisent des restrictions supplémentaires sur les modèles : par exemple, le mode de calcul des intégrales sur les éléments n'est valable qu'à certaines conditions sur la forme de ceux-ci, et le non-respect de ces conditions entraîne au mieux un message d'erreur, au pire des résultats faux. Deuxièmement, le post-traitement (la dernière étape) peut parfois altérer les résultats de façon significative, en masquant certaines anomalies caractéristiques ; or, ces anomalies sont justement un symptôme d'une modélisation non pertinente, et le fait de les masquer peut compliquer singulièrement l'analyse critique des résultats, sans pour autant rendre ceux-ci plus représentatifs de la réalité.

2.5 - Une attention particulière à la qualité des résultats

Comme dans toute simulation, les résultats d'une simulation par éléments finis présentent toujours un écart avec la réalité, dont les causes peuvent être classées en deux catégories : la modélisation, c'est-à-dire le passage du réel à un problème mathématique défini dans le cadre d'une théorie, et les fautes dans l'application des règles de la théorie qui permettent de résoudre

ce problème pour parvenir au résultat. Nous supposons ici qu'il n'y a pas de fautes et nous nous intéressons aux écarts dus à la modélisation par éléments finis.

Pour analyser ces écarts, il est commode de revenir à la définition première de la « méthode des éléments finis », c'est-à-dire de voir celle-ci comme une technique de résolution approchée d'un problème de mécanique des milieux continus. Cela conduit à considérer que les modèles par éléments finis du produit, de l'environnement et du comportement du matériau sont issus de modèles continus et, par conséquent, à classer les sources d'écart relevant de la modélisation en deux catégories :

- La modélisation continue, c'est-à-dire le passage de la réalité à un ensemble de modèles définis dans le cadre de la mécanique des milieux continus, définissant un « problème continu » insoluble ;
- Et la discrétisation, c'est-à-dire la transformation des lois de la mécanique des milieux continus en lois « discrètes » dont la définition précise dépend des fonctions de base, c'est-à-dire du maillage ; cela transforme du même coup le "problème continu" insoluble en un « problème discret » soluble.

Il s'agit naturellement d'une vue de l'esprit : en pratique, les utilisateurs modélisent directement le produit, son environnement et le comportement du matériau sous la forme demandée par le logiciel, sans passer par l'écriture académique d'un « problème continu » et de sa discrétisation. Ce point de vue permet cependant d'expliquer une différence fondamentale entre ces deux types d'écarts.

En effet, la discrétisation est une transformation purement théorique, étudiée par les mathématiques. Il existe ainsi des théorèmes décrivant l'écart dû à la discrétisation (, bien que le résultat continu lui-même soit impossible à déterminer. L'intérêt pratique de ces théorèmes est double :

- D'une part, ils sont à la base d'outils et de méthodes semi-empiriques permettant d'estimer cet écart (ou au moins son ordre de grandeur) par le calcul,
- Et d'autre part, ils assurent que cet écart peut être réduit autant que voulu à condition d'adapter la discrétisation, c'est-à-dire de raffiner suffisamment le maillage.

Par conséquent, un utilisateur expérimenté peut maîtriser l'écart dû à la discrétisation sans effectuer aucune expérimentation (mais à condition d'avoir du temps devant lui et de disposer d'un ordinateur suffisamment puissant pour atteindre la précision souhaitée !), comme l'explique la ressource « *Estimation de l'écart dû à la discrétisation par éléments finis* ».

Il en va tout autrement en ce qui concerne la modélisation proprement dite, c'est-à-dire le passage du réel aux modèles : bien que le domaine de validité de certains modèles soit connu avec précision, l'écart dû à la modélisation n'est pas toujours prévisible sans recourir à l'expérimentation. En effet, cet écart résulte de multiples causes : présence d'incertitudes ou de variabilités, de simplifications... qui sont, par définition, non prises en compte lors de la modélisation, et son estimation nécessite de l'expérience et du savoir-faire.

Références bibliographiques:

1. Lin, Y.-L., Kyung, C.-M., Yasuura, H., Liu, Y., *Smart Sensors and Systems*
2. Ian R. Sintclair, *Sensors and transducers*, Newnes, 2001.
3. M. Bayart, B. Conrard, A. Chovin, M. Robert, *Capteurs et actionneurs intelligents*, 2005.
4. Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan, Osama O. Awadelkarim, *Microsensors, MEMS, and Smart Devices Hardcover*, 2001.
5. Randy Frank, *Understanding Smart Sensors*, 2nd ed. Edition, Artech House.
6. Vijay K. Varadan, K. J. Vinoy, S. Gopalakrishnan, *Smart Material Systems and MEMS: Design and Development Methodologies*.
7. G. Amendola, P. Poulichet, L. Sevely, L. Valbin, *Les capteurs MEMS, principes de fonctionnement*, *Techniques de l'Ingénieur*.
8. G. Amendola, P. Poulichet, L. Sevely, L. Valbin, *Capteurs MEMS, techniques de mesure*, *Techniques de l'Ingénieur*.
9. Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Craft, Neil White, *MEMS Mechanical Sensors*, Artech House, 2000.
10. K. J. Vinoy, G. K. Ananthasuresh, RudraPratap, S. B. Krupanidhi, *Micro and Smart Devices and Systems*.
11. J. G. Webster. *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, Taylor & Francis Ltd.
12. R. Palas-Areny, J. G. Webster, *Sensors and signal conditioning*, Wiley and Sons, 1991.
13. G. Asch, *Acquisition de données : du capteur à l'ordinateur*, Dunod, 2003.
1. G. Asch et al. *Acquisition de données*, 3^e édition, Dunod, 2011.
14. P. Dassonville, *Les Capteurs : Exercices et problèmes corrigés*, Dunod, 2005.
15. N. Maluf, K. Williams, *An Introduction to MEMS Engineering*, Artech House, 2004.
16. W. Menz, J. Mohr and O. Paul, *Microsystem Technology*, Wiley, 2001.
17. M. Tabib-Azar, *Microactuators*, Kluwer academic publishers, 1998.
18. M. Gad el Hak, *MEMS Design and fabrication*, second edition, Taylor & Francis, 2006.
19. N. Lobontiu, E. Garcia, *Mechanics of electromechanical systems*, Kluwer Academic, 2005.