

Plan du chapitre

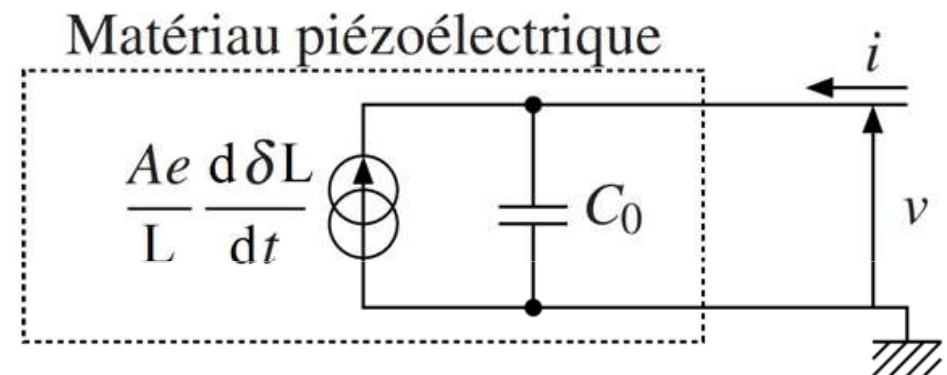
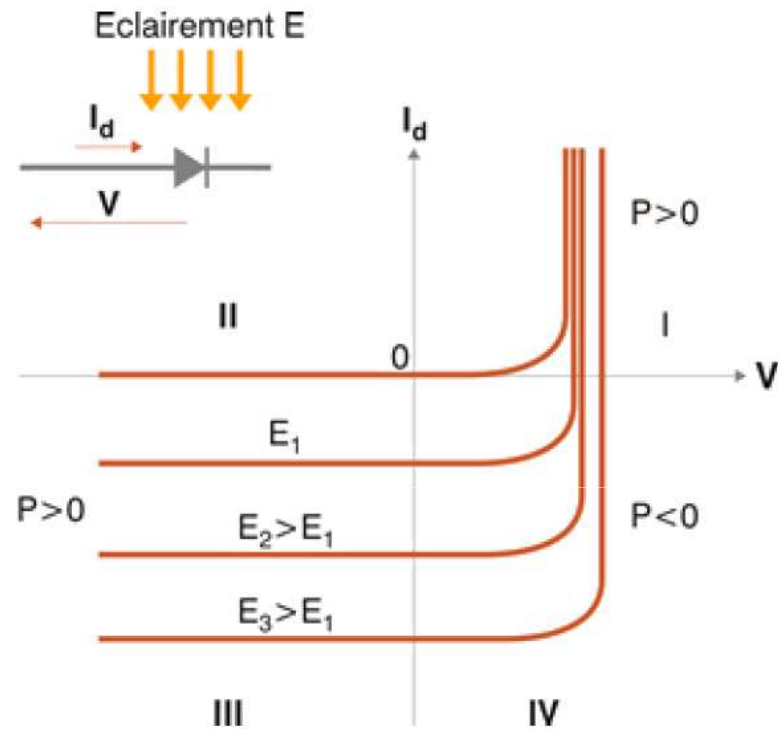
Chapitre 7 - Introduction aux capteurs

1. Introduction
2. Quelques définitions
3. Critères de choix
4. Erreurs de mesure
5. Capteurs passifs et actifs

**Ces transparents sont largement complétés
lors du cours en amphithéâtre.**

**Document strictement réservé à l'usage personnel des
étudiants de Sorbonne Université inscrits dans l'UE 2E102.**

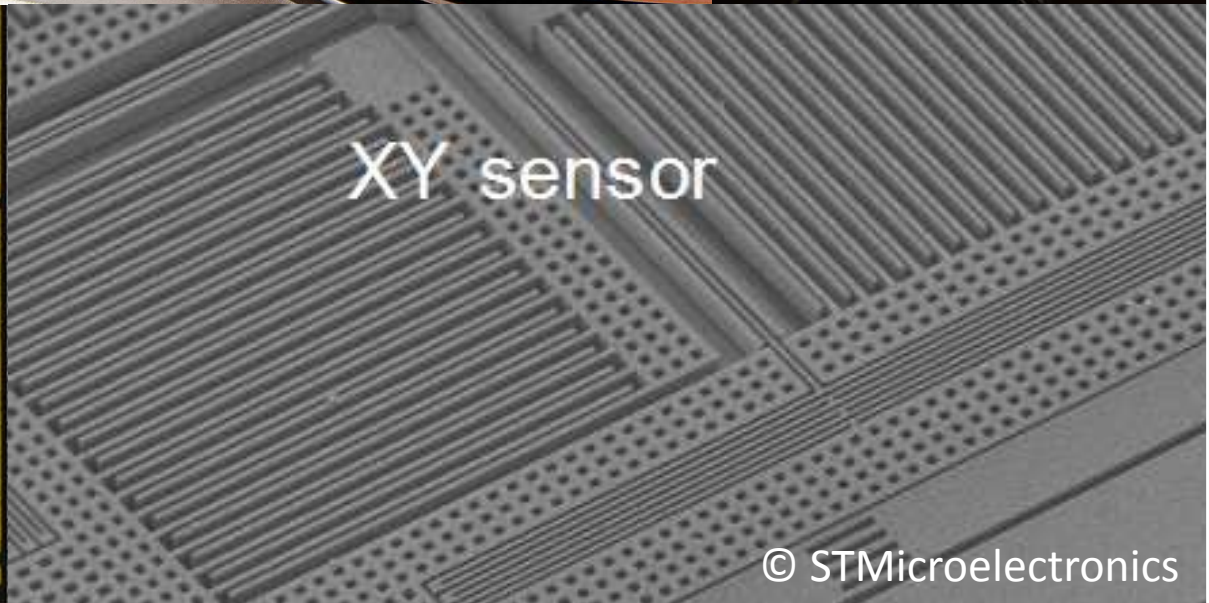
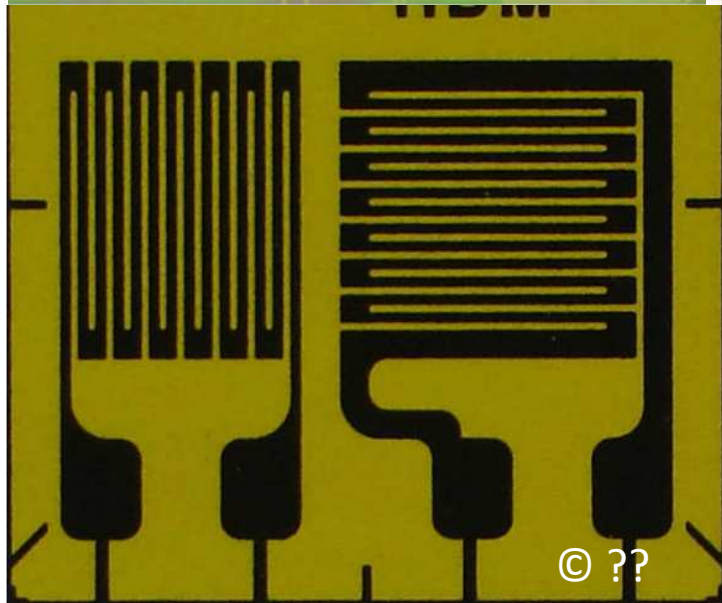
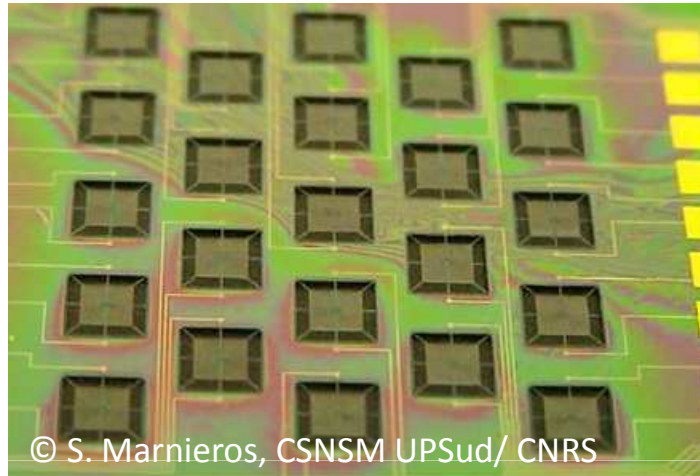
1.1. Introduction – Des matériaux pour l'énergie et pour les capteurs



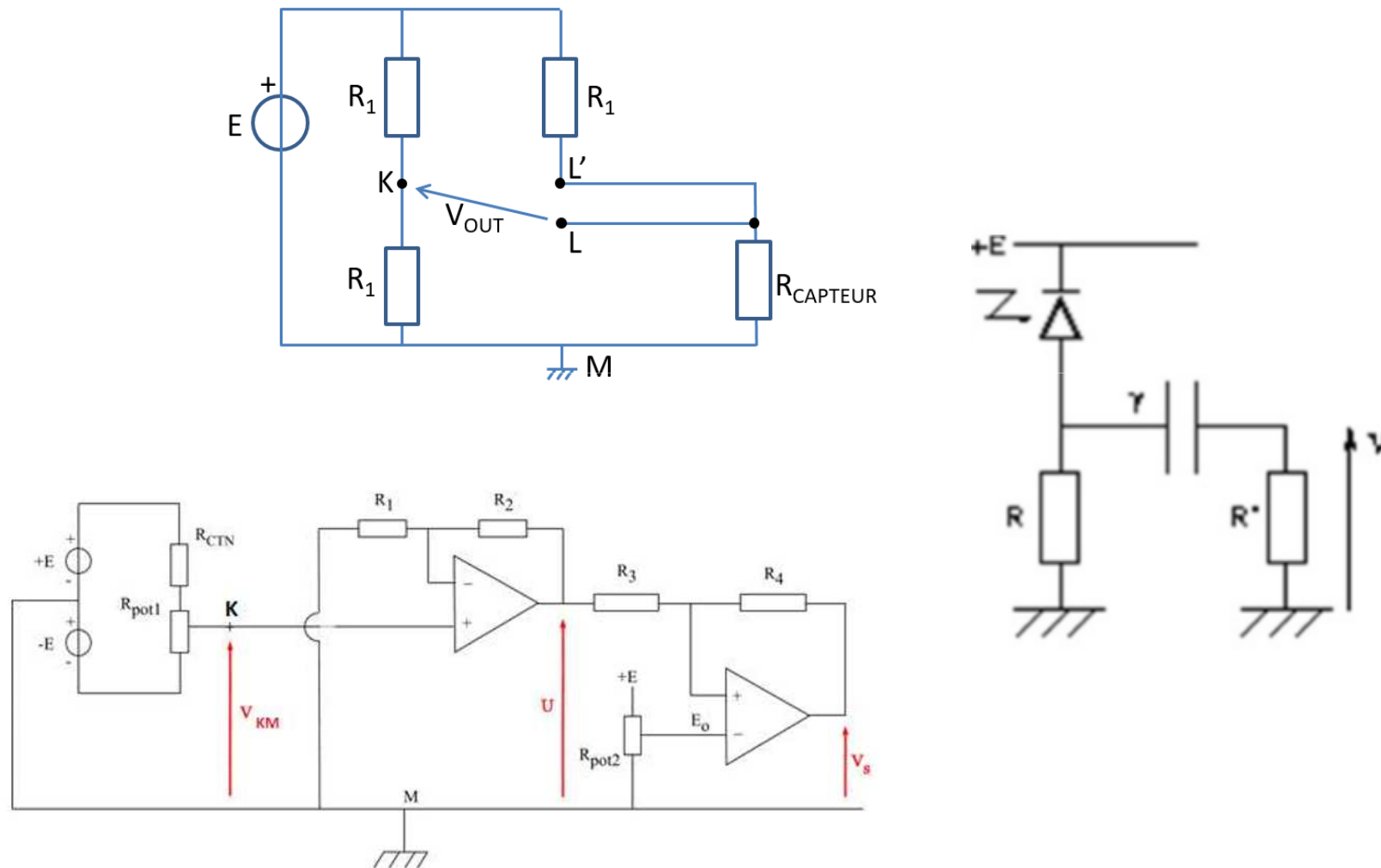
Cours d'Annick Dégardin 2E102

1.2. Introduction – Qu'allons nous faire?

Principe de quelques capteurs



Conditionnement: de l'électronique analogique...



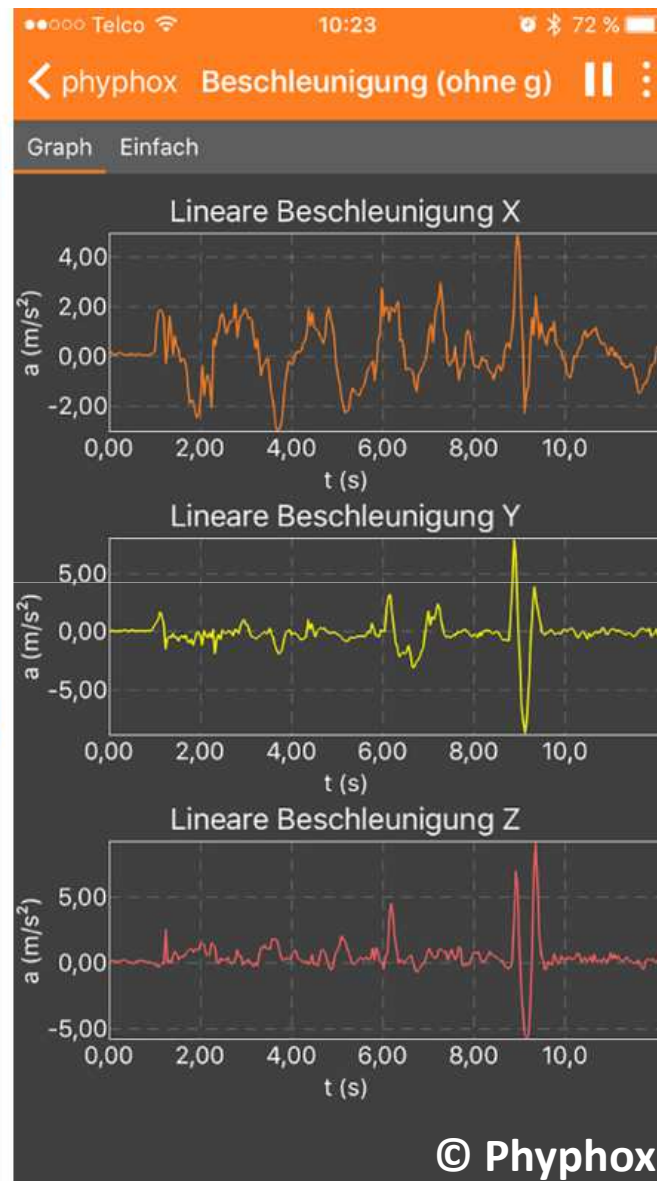
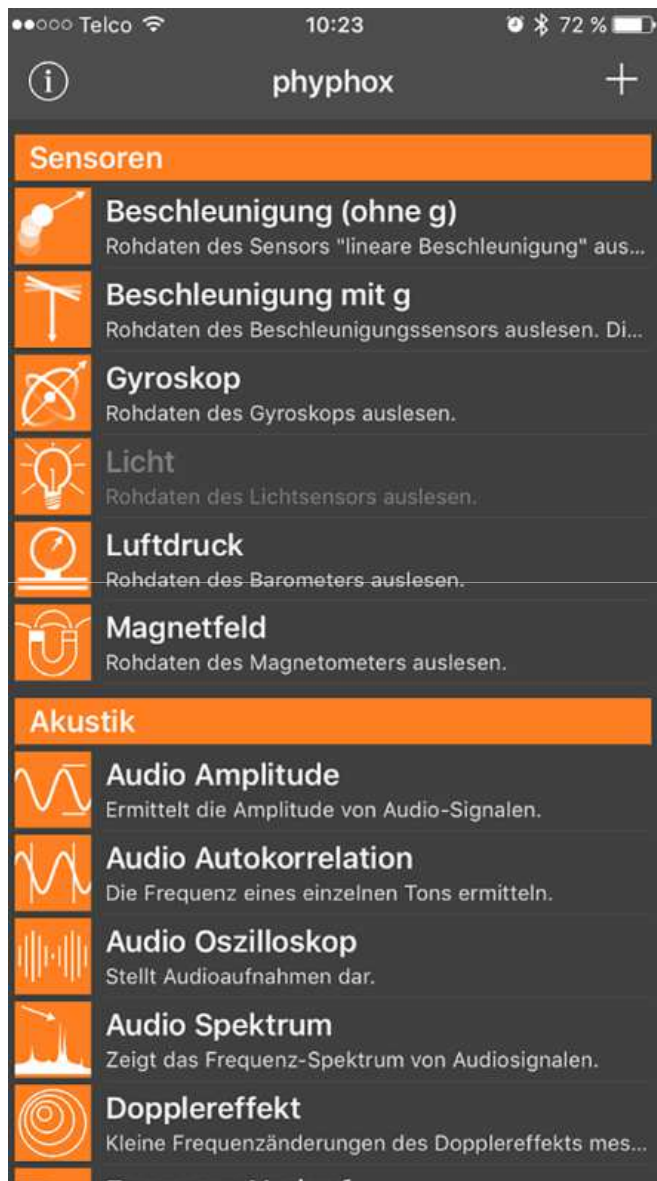
1.3. Introduction – Pourquoi des UE de Licence et de Master « Capteur » ?



Ça s'achète
tout fait!

© Keyestudio

1.3. Introduction – Pourquoi des UE de Licence et de Master « Capteur »?



et bien sûr dans les smartphones...

1.3. Introduction – Pourquoi des UE de Licence et de Master « Capteur »?

Connaître, comprendre

→ Choisir la meilleure solution, bien l'utiliser

→ Concevoir:

Adapter, améliorer (miniaturiser, consommer moins...)

Inventer de nouveaux capteurs

1.4. Introduction – Quelques domaines...

Transport



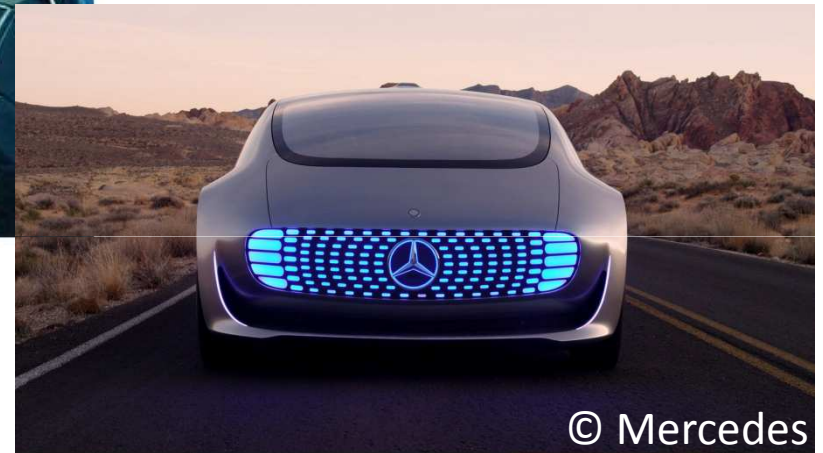
Niveau d'essence



Températures

Airbag

Radar de recul



Aide au stationnement

Aide à la conduite

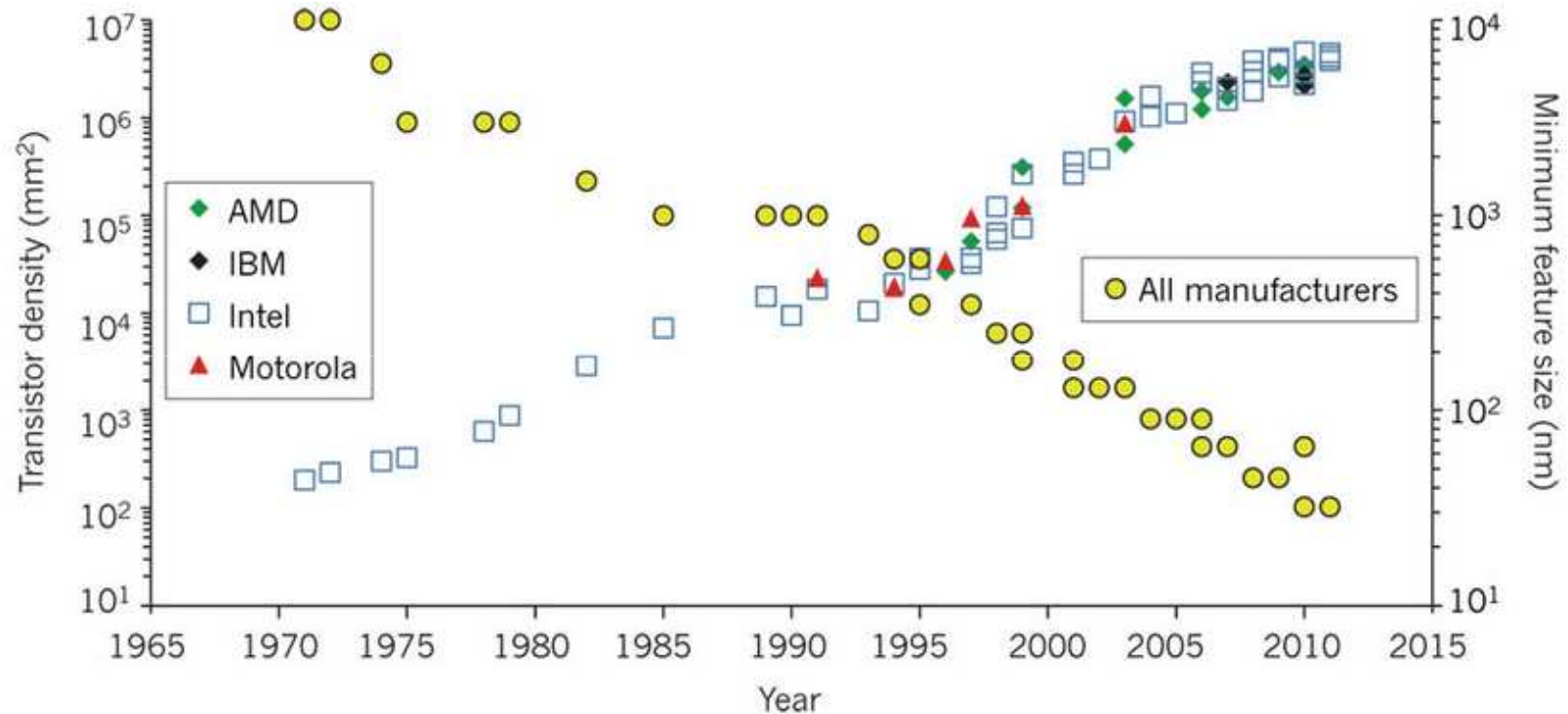
Voiture sans chauffeur

1900

2018...

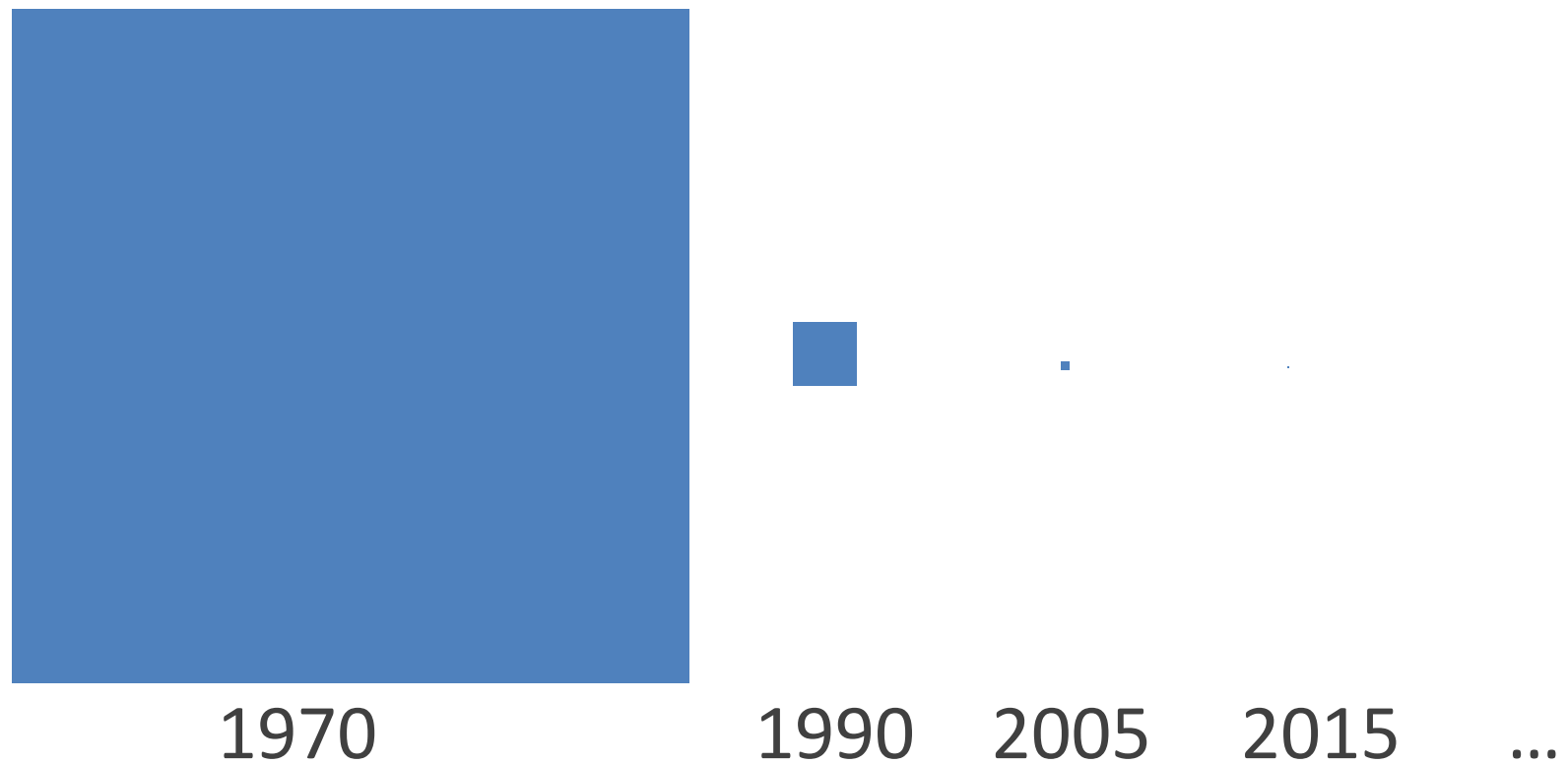
1.4. Introduction – Quelques domaines...

I. Ferain et col., *Multigate transistors as the future of classical metal–oxide–semiconductor field-effect transistors*, Nature, **479**, 310–6, 2011



The evolution of transistor gate length (minimum feature size) and the density of transistors in microprocessors over time.

1.4. Introduction – Quelques domaines...

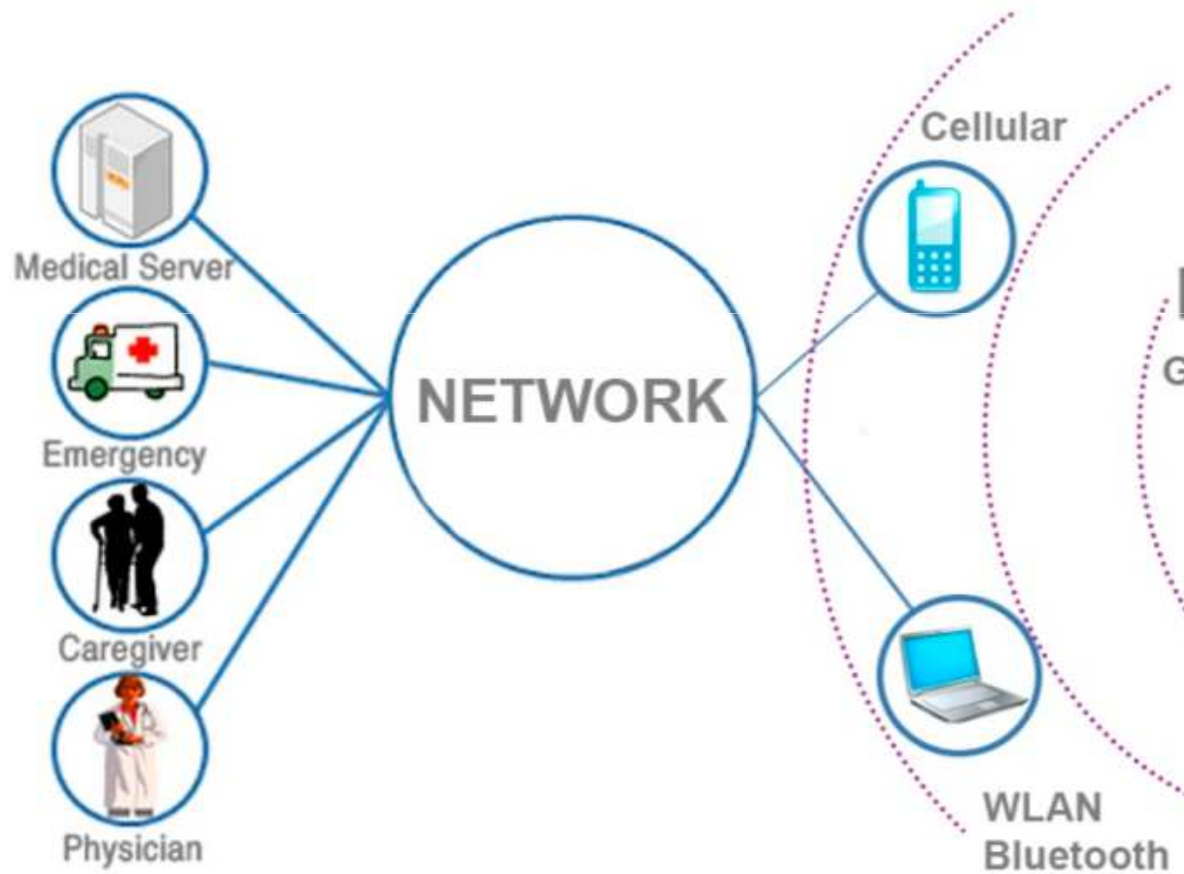


1.4. Introduction – Quelques domaines...

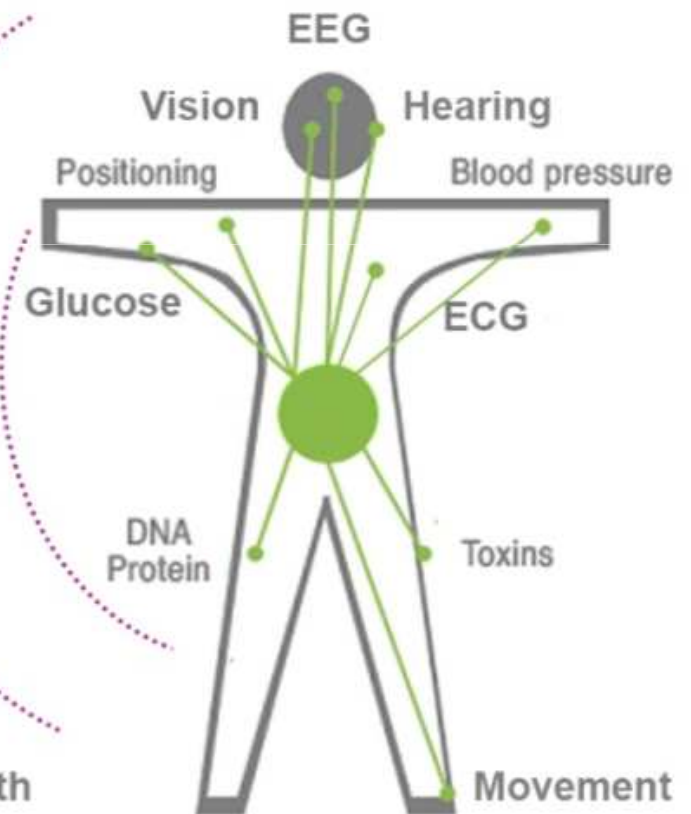
Santé

S. Gorgutsa et col., *Novel Wireless-Communicating Textiles Made from Multi-Material and Minimally-Invasive Fibers*, Sensors, 14(10), 19260-74, 2014

Connected Healthcare

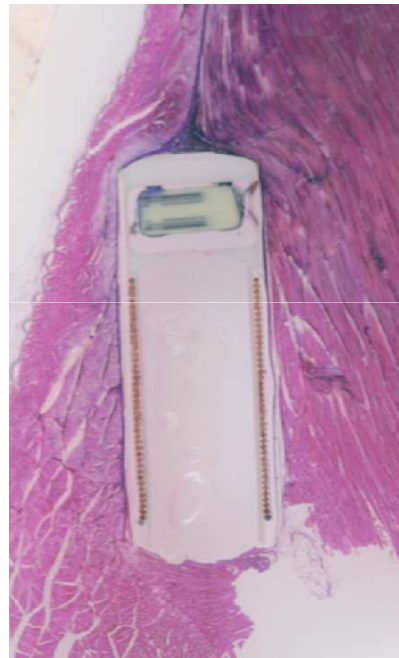
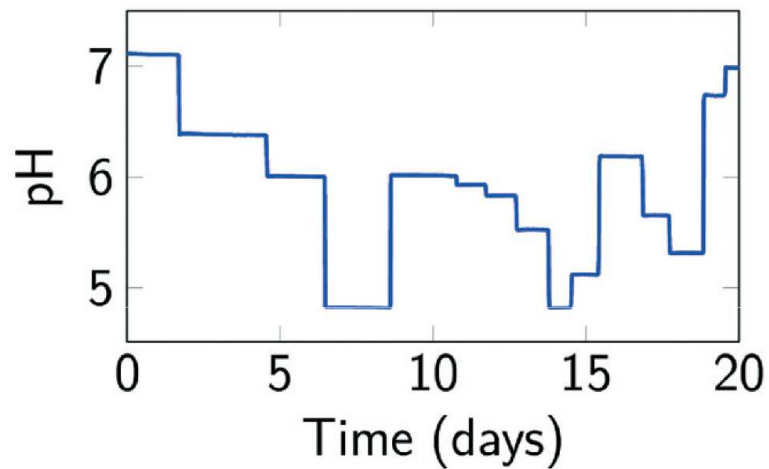


Body Area Network



1.4. Introduction – Quelques domaines...

Santé



C. C. Vassiliou et col., *Miniaturized, biopsy-implantable chemical sensor with wireless, magnetic resonance readout*, Lab Chip, 15, 3465, 2015

1.4. Introduction – Quelques domaines...

Santé

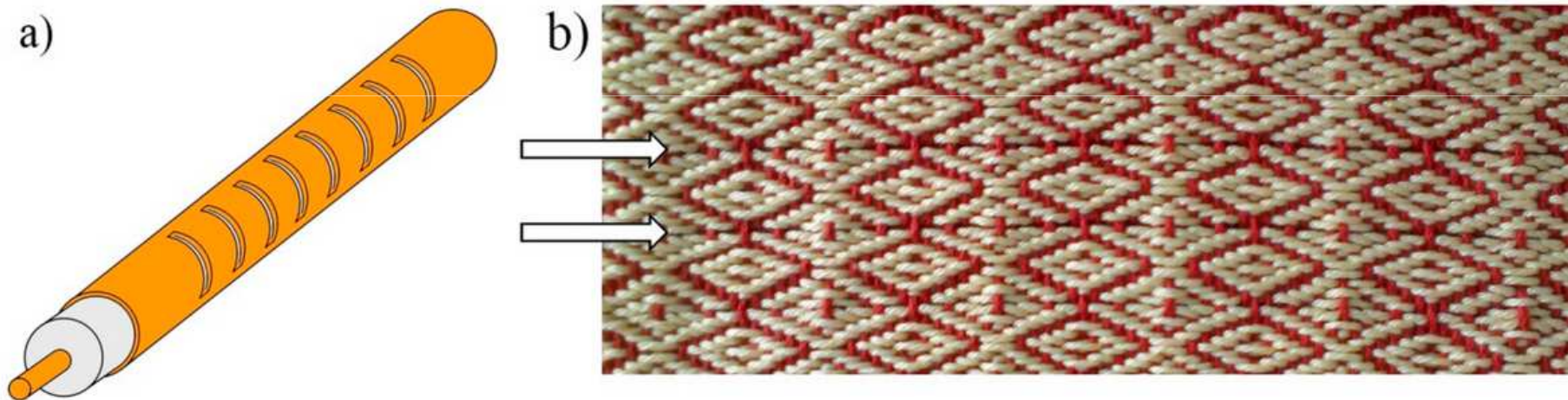
K. Kalantar-Zadeh et col., *A human pilot trial of ingestible electronic capsules capable of sensing different gases in the gut*, *Nature Electronics*, 1, 79–87, 2018



1.4. Introduction – Quelques domaines...

Santé

S. Gorgutsa et col., Novel Wireless-Communicating Textiles Made from Multi-Material and Minimally-Invasive Fibers, *Sensors*, 14(10), 19260-74, 2014



Production d'énergie – Equilibre entre production et demande

Avant: production centralisée, gestion « facile »

Aujourd'hui, demain: décentralisée, irrégulière (énergies renouvelables) → besoin de capteurs pour gérer intelligemment le réseau (smart grid, cf. cours 2E102 de Marc Hélier): contrôler et prévoir

Exemples de capteurs: de courant (non intrusifs), du rayonnement solaire, de la vitesse du vent...

Qualités: communicant en temps réel (producteur \leftrightarrow consommateur), non intrusif, miniature, faible consommation, peu de maintenance, précis...

Pour résumer: défis, enjeux

Choisir les informations pertinentes dans des systèmes et des environnements de plus en plus complexes...

Miniaturiser. En mettre plus, embarquer, incorporer...

Alimenter. Autonomie, faible consommation, récupération de l'énergie...

Communiquer. Antenne, réseau...

Traiter et réagir. Temps réel, automatisation...

Et aussi: **sécurité, fiabilité, coût, éthique...**

PLAN DES CHAPITRES 7 à 9

CHAPITRE 7 – INTRODUCTION AUX CAPTEURS

1. Introduction
2. Quelques définitions
3. Erreurs de mesures
4. Principales caractéristiques: critères de choix
5. Capteurs passifs, capteurs actifs

CHAPITRE 8– DIFFERENTS EFFETS, DIFFERENTES APPLICATIONS

1. Capteurs de température
2. Capteur de champ magnétique
3. Capteurs d'éclairement
4. Capteurs de déformation et de contrainte
5. Accéléromètre
6. Mesure de forts courants électriques

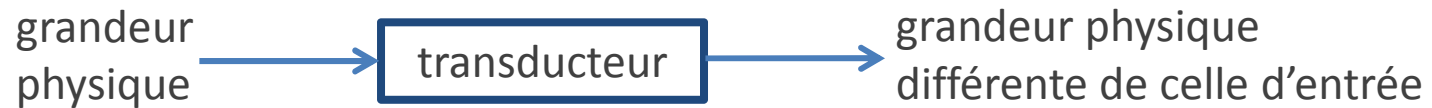
CHAPITRE 9 – CONDITIONNEMENT

1. Du mesurande à la grandeur électrique
2. Montages 2 fils, 3 fils, 4 fils
3. Filtrage et amplification

CONCLUSION GENERALE DE L'UE

Livre conseillé: G. Asch et coll., Les capteurs en instrumentation industrielle, Ed. Dunod

Transducteur



Transducteurs utilisés pour les capteurs (sensors) et aussi pour les actionneurs (actuators), la récupération d'énergie (energy harvesting), ...

Exemples avec des matériaux piézoélectriques:

- capteur de force,
- actionneur: positionnement micrométrique commandé électriquement,
- récupération de l'énergie vibratoire.

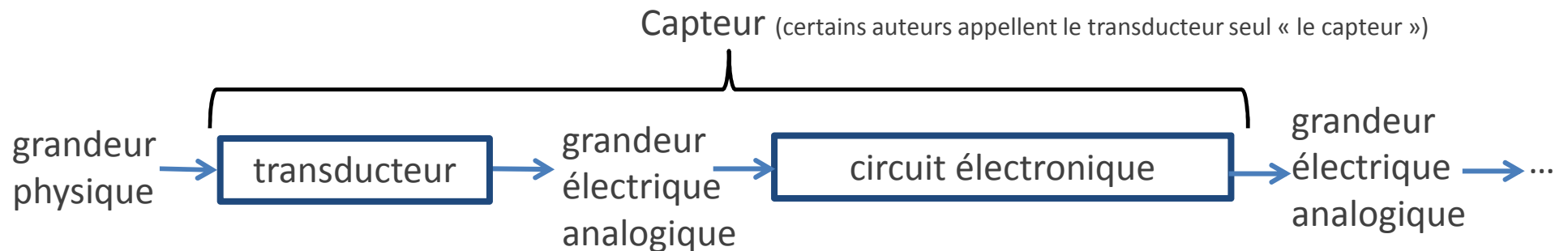
2. Quelques définitions

Capteur électrique

interface entre

une *grandeur* physique et une *grandeur* électrique

- pour la mesure (métrologie; exemple: TD/TP opacimètre),
- pour la détection (exemple: détecteur de présence),
- pour le contrôle (TD/TP ventilateur),
- pour l'imagerie,
- ...



2. Quelques définitions

Mesurande (primaire) m : grandeur physique qu'on veut mesurer.

Exemples: T° , éclairement, champ magnétique, accélération.

e : grandeur électrique mesurée dépendant de m (résistance, courant, tension, capacité, ...).

Etalonnage : établissement de la loi ou du modèle $e = f(m)$.

Transduction directe :



```
graph LR; m --> capteur; capteur --> e
```

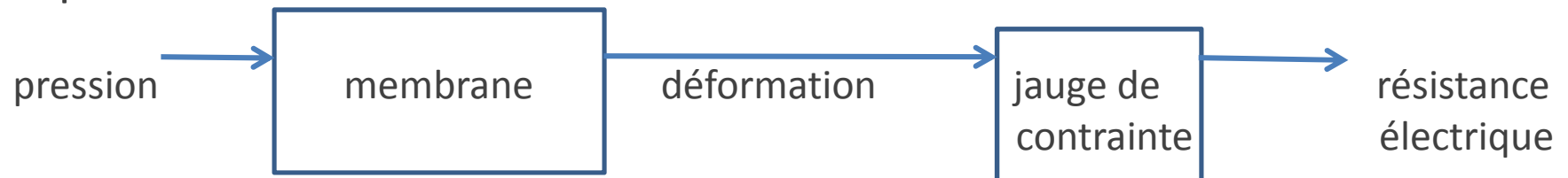
The diagram illustrates direct transduction. It shows a horizontal flow from left to right. On the left is the variable m . A blue arrow points from m to a rectangular box labeled 'capteur'. Another blue arrow points from the 'capteur' box to the variable e on the right.

2. Quelques définitions

Transduction multiple: corps d'épreuve, mesurande secondaire



Exemple:



Erreur: écart entre la valeur vraie et la valeur mesurée.

Incertitude: intervalle autour de la valeur mesurée dans lequel se trouve la valeur vraie: déterminé compte tenu de toutes les sources d'erreurs.

Déterministe, appelée aussi **systématique**

Elles se répètent, sont prévisibles: décalage constant pour une valeur du mesurande → possibilité parfois de corriger.

Exemples:

- erreur d'étalonnage (notamment en cas de vieillissement du capteur, lots différents de l'original),
- erreur de rapidité si la constante de temps de la chaîne de mesure est trop grande par rapport à la période du signal,

Déterministe, appelée aussi **systématique** (suite)

– erreur de finesse : elle caractérise la perturbation systématique induite par le capteur et ses liaisons sur le système physique (on parle aussi de la discrétion du capteur) ; elle dépend du capteur et de son couplage avec le milieu.

Exemples:

résistance interne d'un voltmètre
effet Joule d'une thermistance

Aléatoire, appelée aussi accidentelle

Contribuent à la dispersion des mesures.

Exemples:

- erreurs de lecture,
- erreurs dues aux signaux parasites et bruits divers:
 - les champs électromagnétiques en général
 - les fluctuations des alimentations électriques
 - ...

Aléatoire, appelée aussi accidentelle (suite)

- erreurs dues à des grandeurs d'influence sur la chaîne

Grandeurs parasites susceptibles d'affecter le signal électrique délivré par le capteur indépendamment du mesurande.

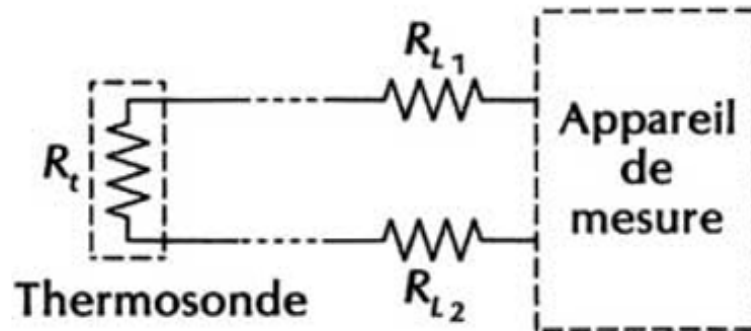
Grandeurs d'influence ambiantes :

- T° (modifie la géométrie et les propriétés physiques du matériau) ;
- lumière ambiante (naturelle et artificielle) ;
- humidité;
- ...

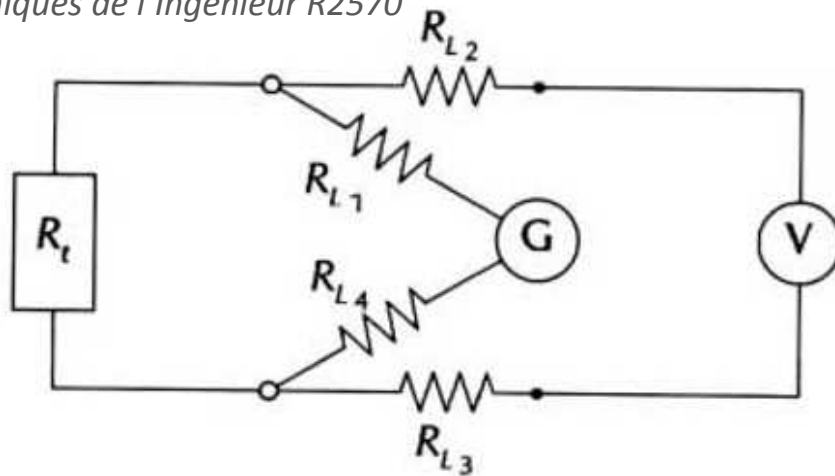
→ protection (e.g.: blindage), circuit de conditionnement (filtrage, pont de Wheatstone: cf. suite du cours), enceinte thermostatée.

NB: ce type d'erreur peut aussi être systématique si...

Exemple d'erreurs systématiques *et* aléatoires



© Techniques de l'Ingénieur R2570



Cf. dernier chapitre « Conditionnement »

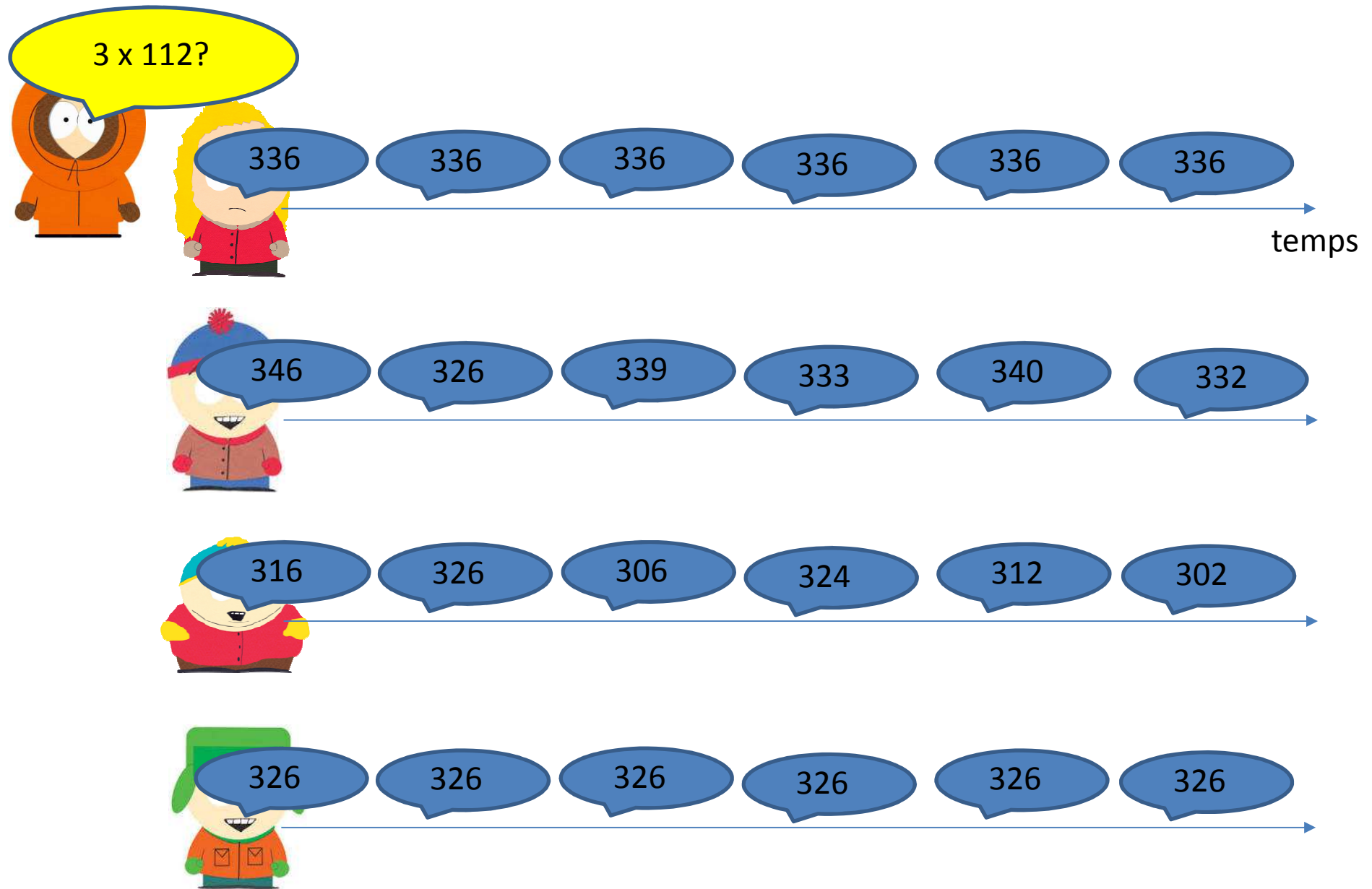
3.2. Erreurs de mesure – Fidélité, justesse et précision

Fidélité : erreurs aléatoires faibles, peu de dispersion.

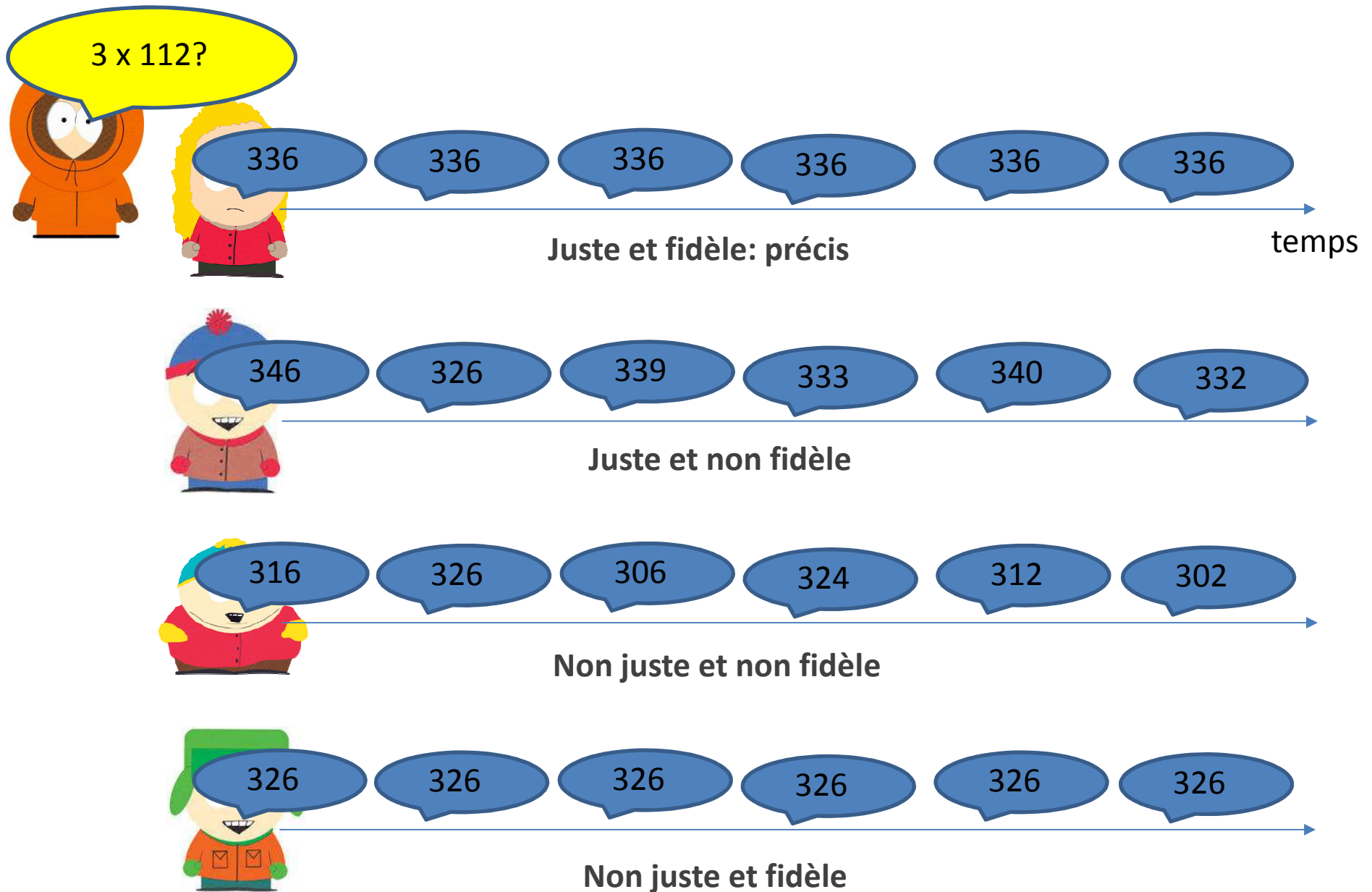
Justesse : erreurs systématiques réduites.

Précision : *un* résultat proche de la valeur vraie → juste et fidèle: précis.

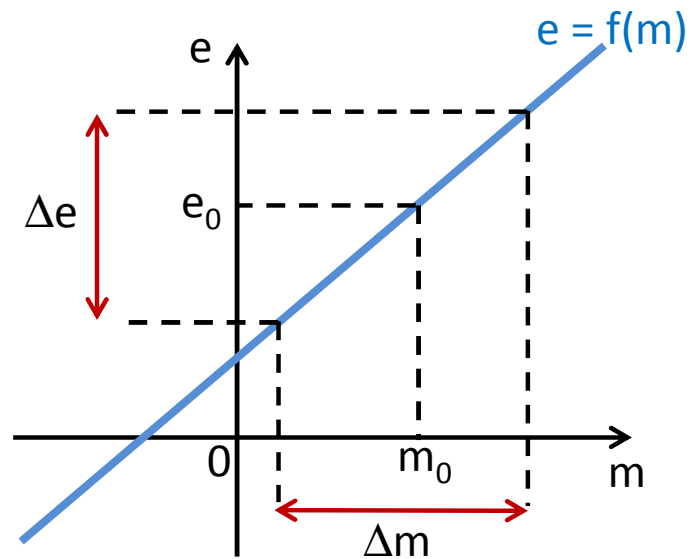
3.2. Erreurs de mesure – Fidélité, justesse et précision



3.2. Erreurs de mesure – Fidélité, justesse et précision

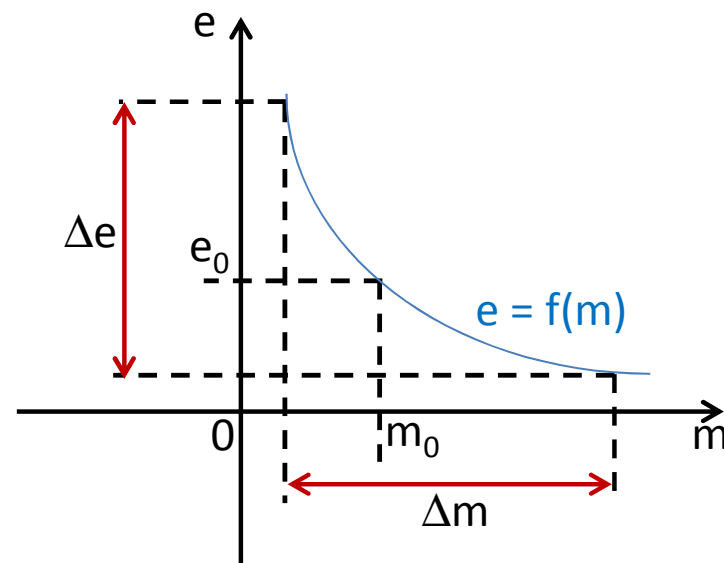


(a) Fonction affine:



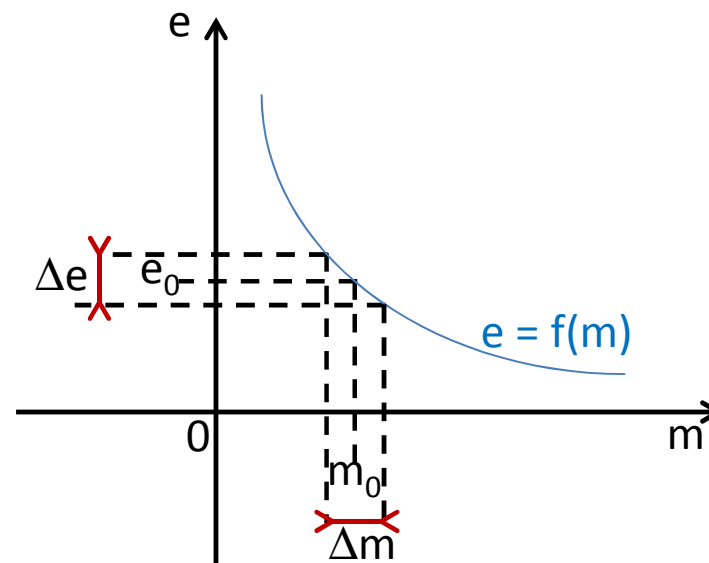
$$(de/dm)_{m_0} = \Delta e / \Delta m$$

(b) Fonction non affine:



$$(de/dm)_{m_0} \neq \Delta e / \Delta m$$

(c) Fonction affine localement:



$(de/dm)_{m_0} \approx \Delta e / \Delta m$ pour Δm autour de m_0 suffisamment petit.

Par exemple pour $e = Cste/m$:

$m = m_0 + \delta$ (variation autour de m_0), il faut $\delta/m_0 \ll 1$.

On a alors:

$$e \approx (Cste/m_0)(1 - \delta/m_0) = (Cste/m_0)(2 - m/m_0)$$

qui est alors une fonction affine (on approxime la courbe par sa tangente).

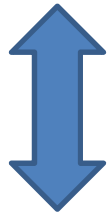
Etendue de mesure

Linéarité sur l'étendue de mesure ou localement

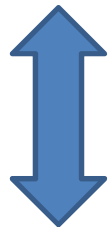
Précision, incertitude



Sensibilité statique



Bande passante (sensibilité v. fréquence: sensibilité dynamique)



Rapidité, temps de réponse

QCM (ER2 du 6 novembre 2014)

Dans le cadre de l'étude des capteurs, un capteur faisant preuve de finesse est

1. intelligent

2. discret

3. miniature

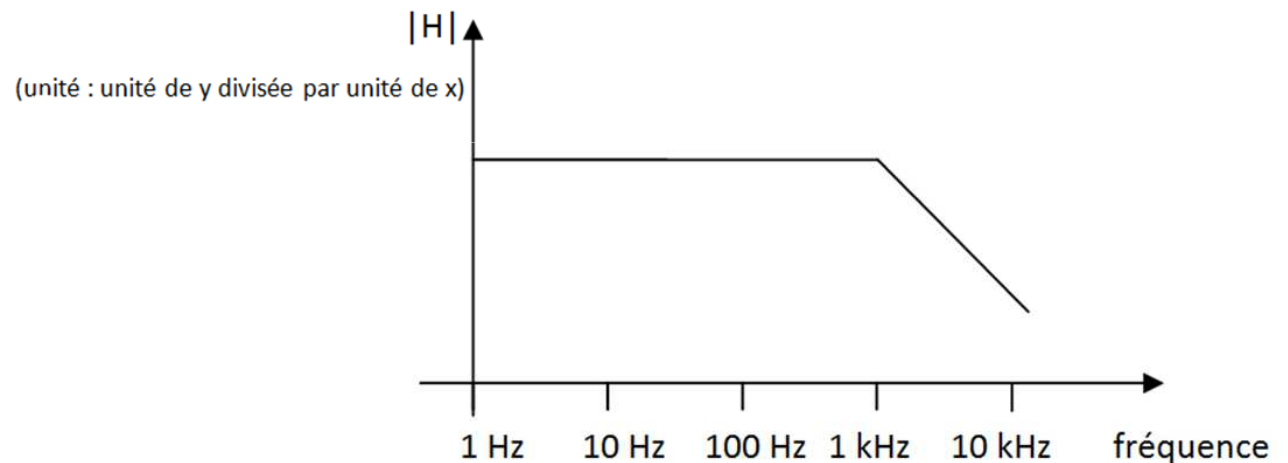
4. fragile

QCM (ER2 du 12 novembre 2015)

Un capteur a comme mesurande x et comme grandeur électrique de sortie y . La réponse asymptotique du capteur $|H| = |Y/X|$ (module du rapport des amplitudes complexes de y et de x) en fonction de la fréquence est donnée sur la figure ci-dessous.

A quelle(s) fréquence(s) ce capteur a-t-il un fonctionnement optimal ? (Vous supposerez qu'en-dessous 1 Hz, le comportement du capteur est le même qu'entre 1 Hz et 1 kHz.)

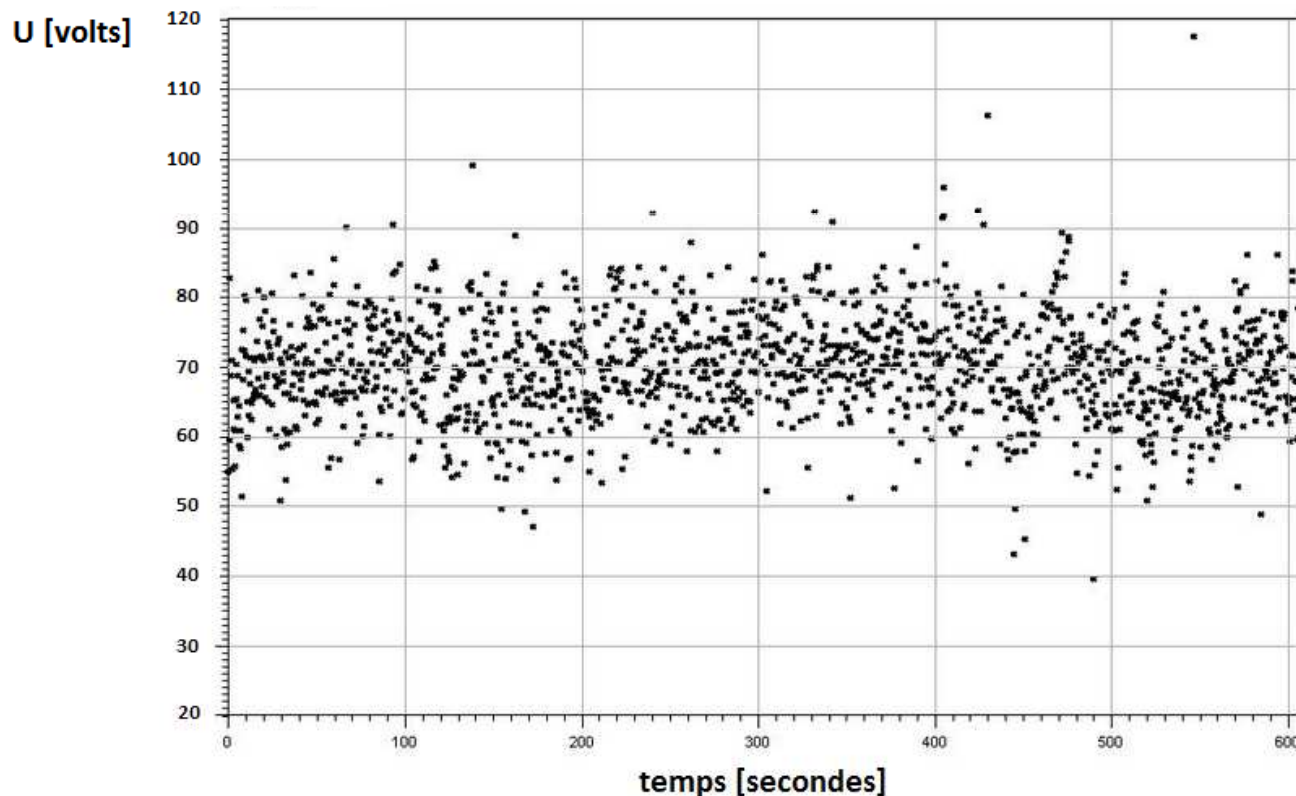
- 1. de 0 à 10 kHz
- 2. de 1 kHz à 10 kHz
- 3. à 1 kHz
- 4. de 0 à 1 kHz



QCM (ER2 du 12 novembre 2015)

Soit un capteur dont la grandeur électrique de sortie est la tension U . Une série de mesures faite avec le même capteur et un mesurande constant au cours du temps (et dont on ne connaît pas la valeur « vraie ») est présentée sur la figure ci-dessous.

Vous pouvez conclure de ce graphe que le capteur est

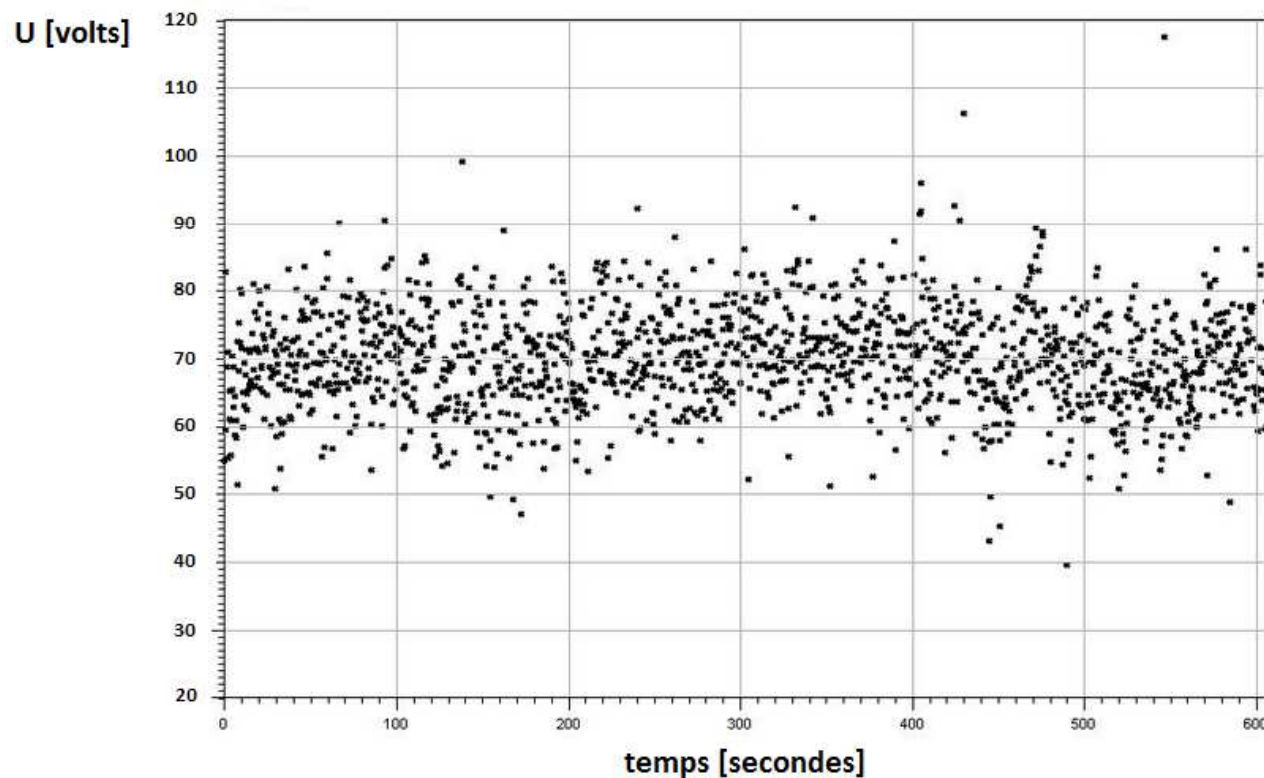


- 1. plutôt fidèle
- 2. plutôt juste
- 3. plutôt pas fidèle
- 4. plutôt pas juste

QCM (ER2 du 12 novembre 2015)

Soit un capteur dont la grandeur électrique de sortie est la tension U . Une série de mesures faite avec le même capteur et un mesurande constant au cours du temps (et dont on ne connaît pas la valeur « vraie ») est présentée sur la figure ci-dessous.

La ou les source(s) des erreurs vous semble(nt)



1. systématique et certainement pas aléatoire

2. aléatoire et certainement pas systématique

3. aléatoire et peut-être aussi systématique

4. systématique et peut-être aussi aléatoire

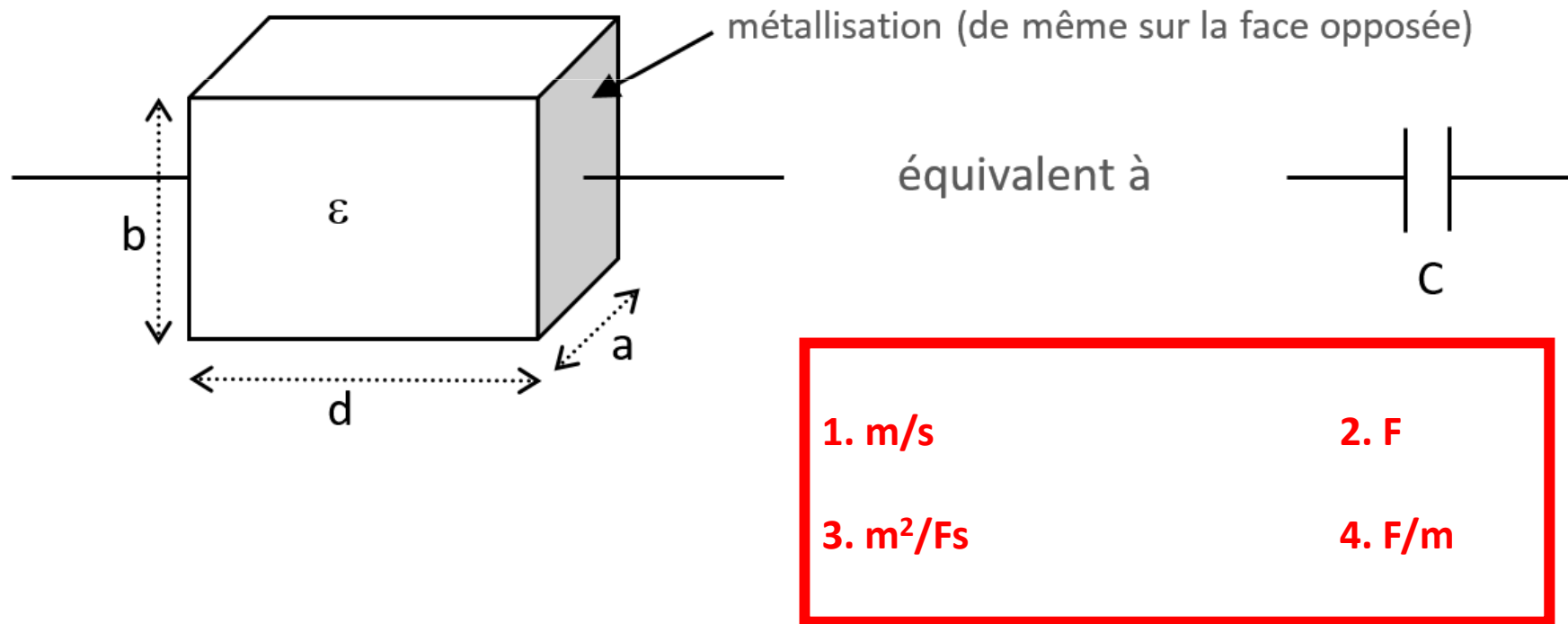
QCM (ER3 du 18 décembre 2015)

Rappelons la formule de la capacité d'un condensateur plan (figure ci-dessous) :

$$C = \epsilon S/d = \epsilon_0 \epsilon_r S/d$$

où S est la surface des armatures métalliques ($S = ab$), ϵ_0 est la permittivité du vide et ϵ_r la permittivité relative du matériau (sans dimension) entre les deux armatures métalliques.

Quelle est l'unité d' ϵ_0 ?



5. Capteurs passifs et actifs

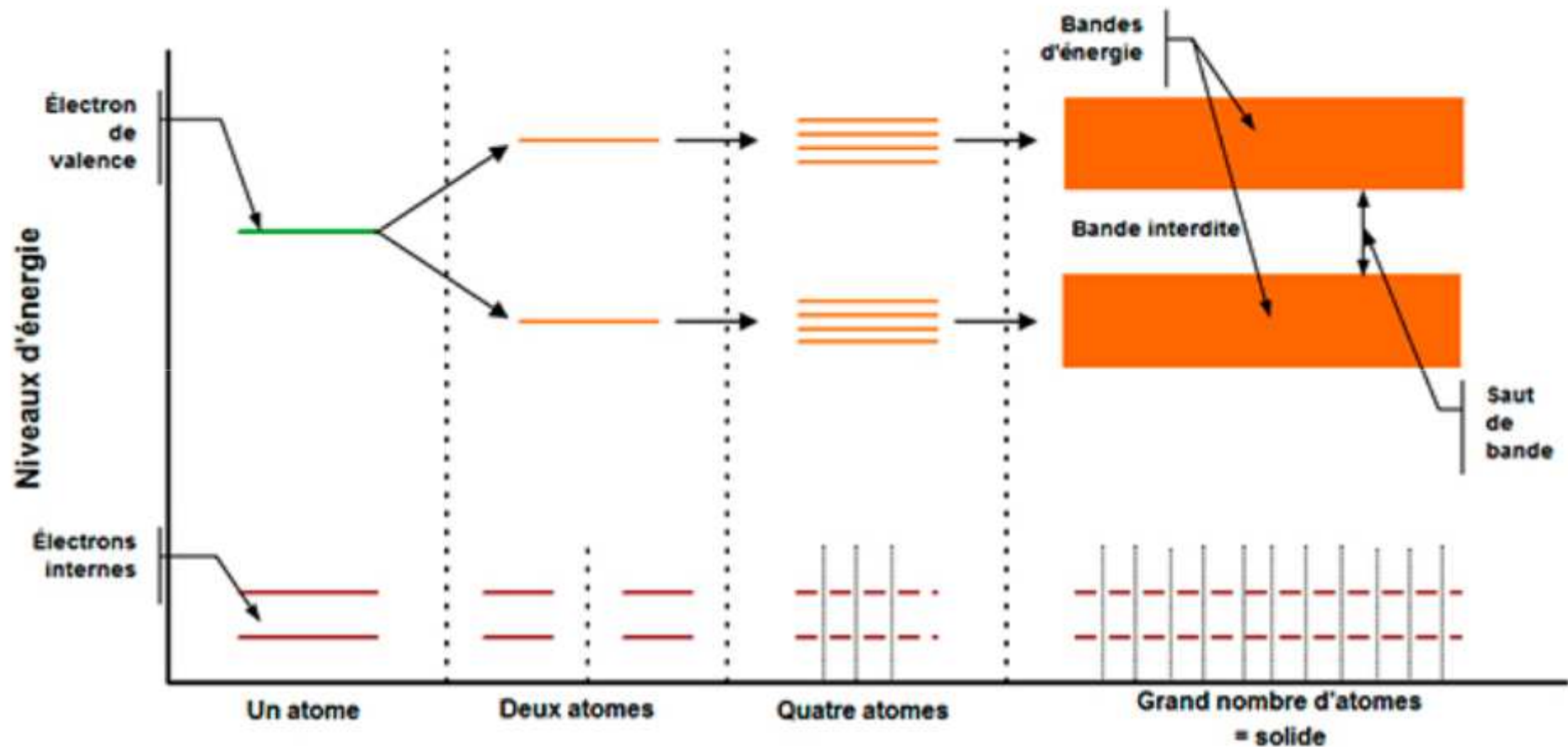
Capteur passif: schéma équivalent électrique = impédance (résistance, condensateur, inductance)

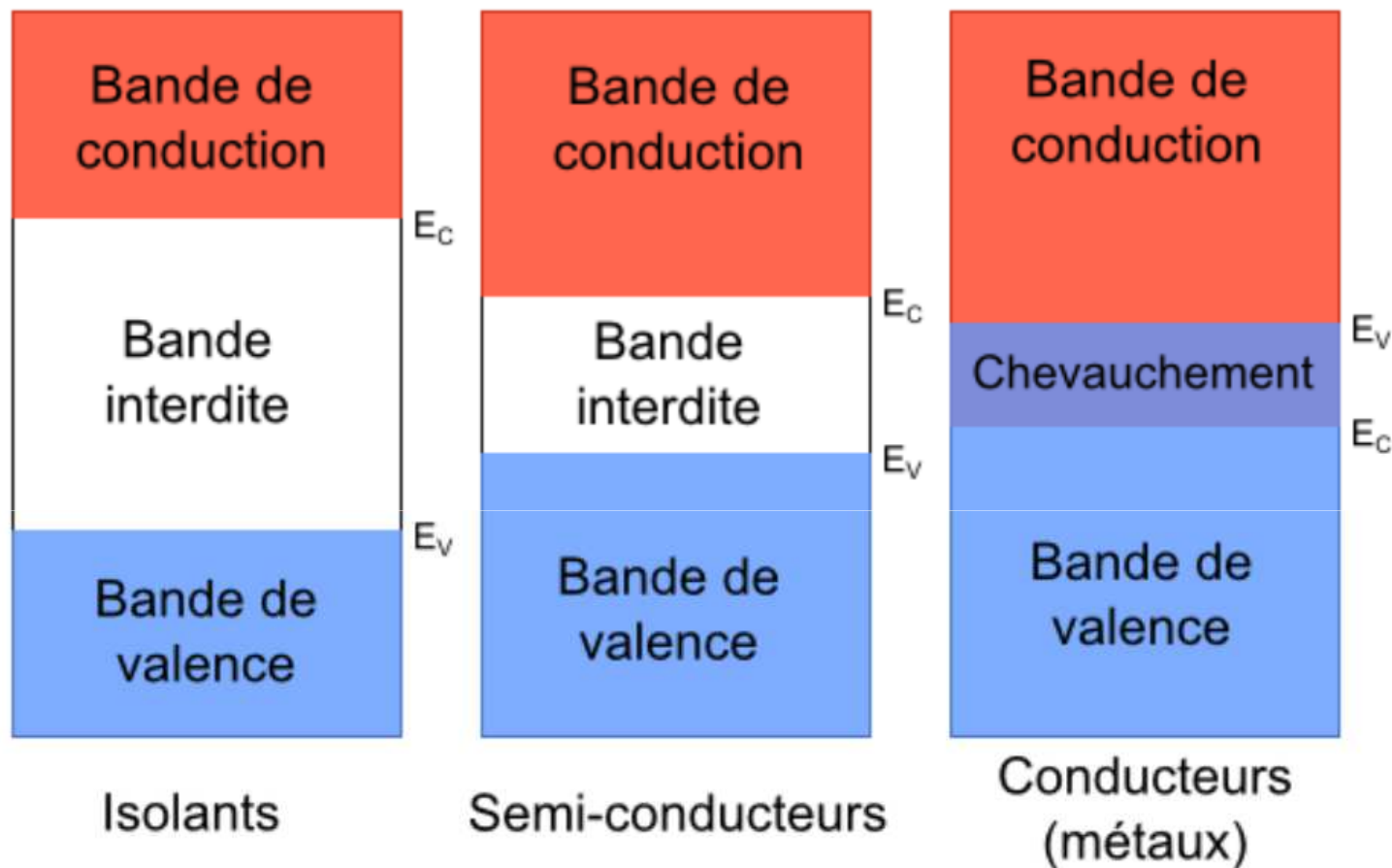
Capteur actif: schéma équivalent électrique = générateur réel (courant, tension)

Exemples:

| Mesurande | Effet physique | Grandeur électrique | Passif/Actif |
|-------------|-------------------|----------------------|--------------|
| T° | effet Seebeck | tension | A |
| T° | thermorésistivité | résistance | P |
| Force | piézoélectricité | variation de charges | A |
| Eclairement | photoconductivité | courant | A |
| Eclairement | photorésistivité | résistance | P |

(Parenthèse: Théorie (très simplifiée) des bandes)





Pour que les électrons passent de la BV (liés au noyau) à la BC (électron libre: participant à la conduction), il faut un apport d'énergie pour les SC et les isolants. Cet apport doit être plus grand pour les isolants. L'énergie apportée peut par exemple être due à une élévation de T° ou à des photons incidents.