

Plan du chapitre

Chapitre 8 – Capteurs: différents effets, différentes applications

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

1. Capteurs de température

1.1 Capteurs résistifs (passifs):

Conducteur et supraconducteur
Semi-conducteur

1.2 Thermocouples (actifs)

1.3 Synthèse

Sensibilité:

TCR: Coefficient de T° de la résistance: $\alpha_R = (1/R(T))(dR/dT) \rightarrow R(T + \Delta T) \approx R(T)(1 + \alpha_R(T)\Delta T)$ si $R(T)$ affine (au moins localement).

Exemple de calcul d'incertitude: TCR = 10% et incertitude sur R = 1%

Avantage et inconvénient d'une grande sensibilité ou TCR... Exemple d'une simple alimentation en courant 100 mA (!) pour R_{capteur} variant de 1 ohms à 10 kohms...

1.1. Capteurs de température – Résistifs

Conducteur

Exemple

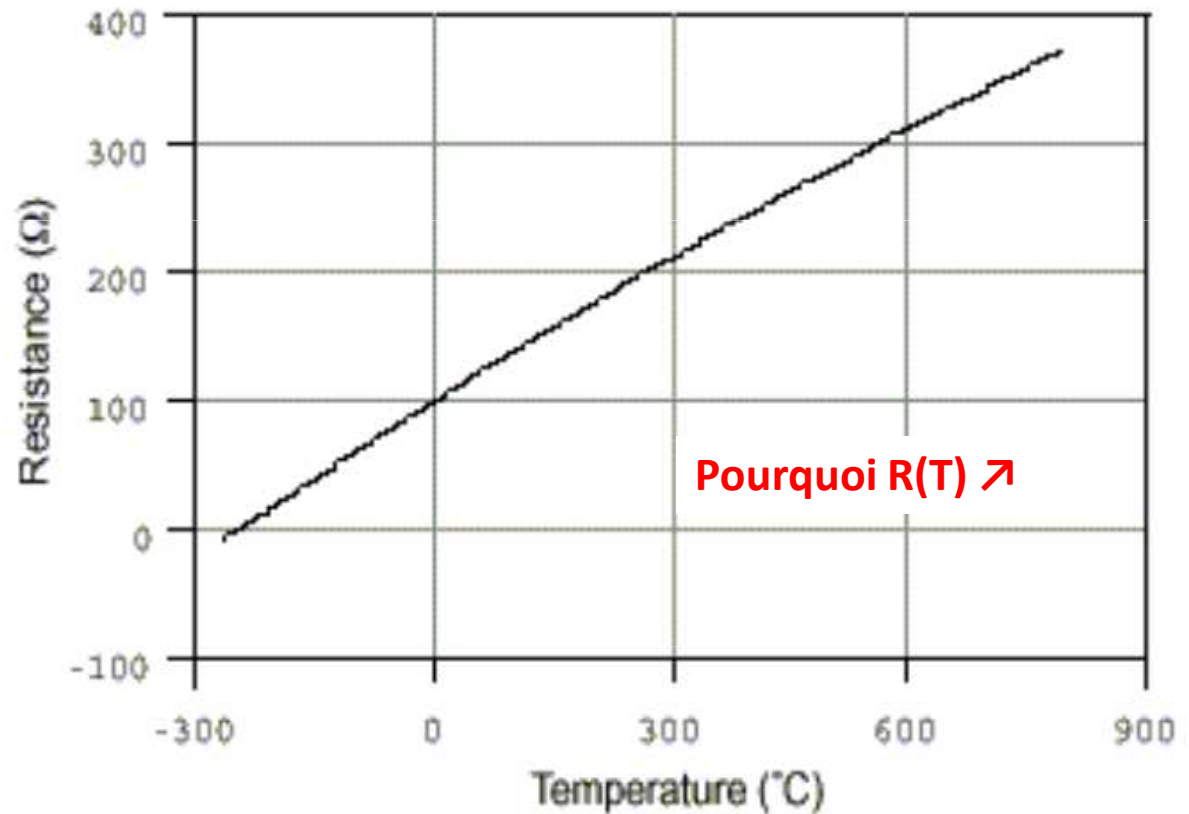
Pt100: platine, dimensions telles que $R_{Pt100}(0^\circ\text{C}) = 100\ \Omega$.

$R_{Pt100} = 100(1 + aT)$ [Ω] avec $a = 3,5 \cdot 10^{-3}\ ^\circ\text{C}^{-1}$ (par exemple). $\alpha_R(100\ \Omega) = ?$



Plage des résistances de platine: -200°C à 1000°C (si le packaging le permet)

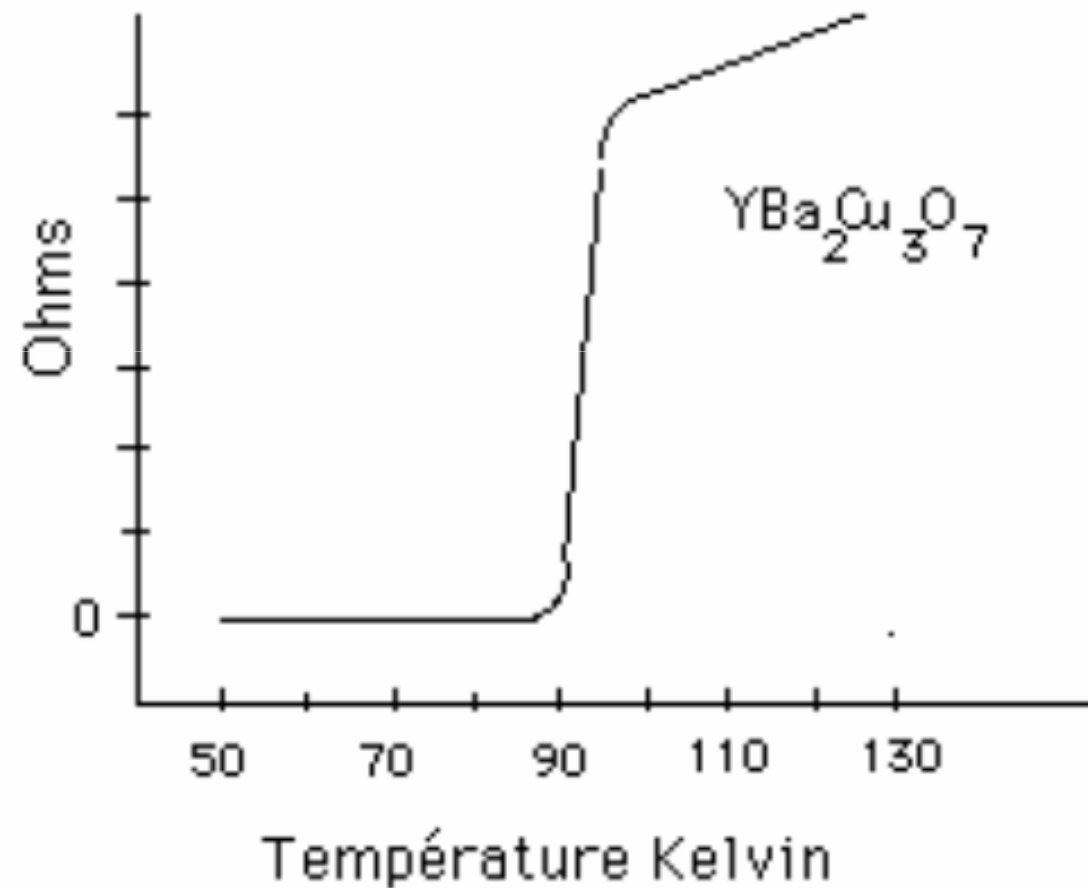
$$T[^\circ\text{C}] = T[\text{K}] - 273,15$$



1.1. Capteurs de température – Résistifs

Des conducteurs particuliers: les supraconducteurs (superconductor)

Resistance / Temperature



QCM

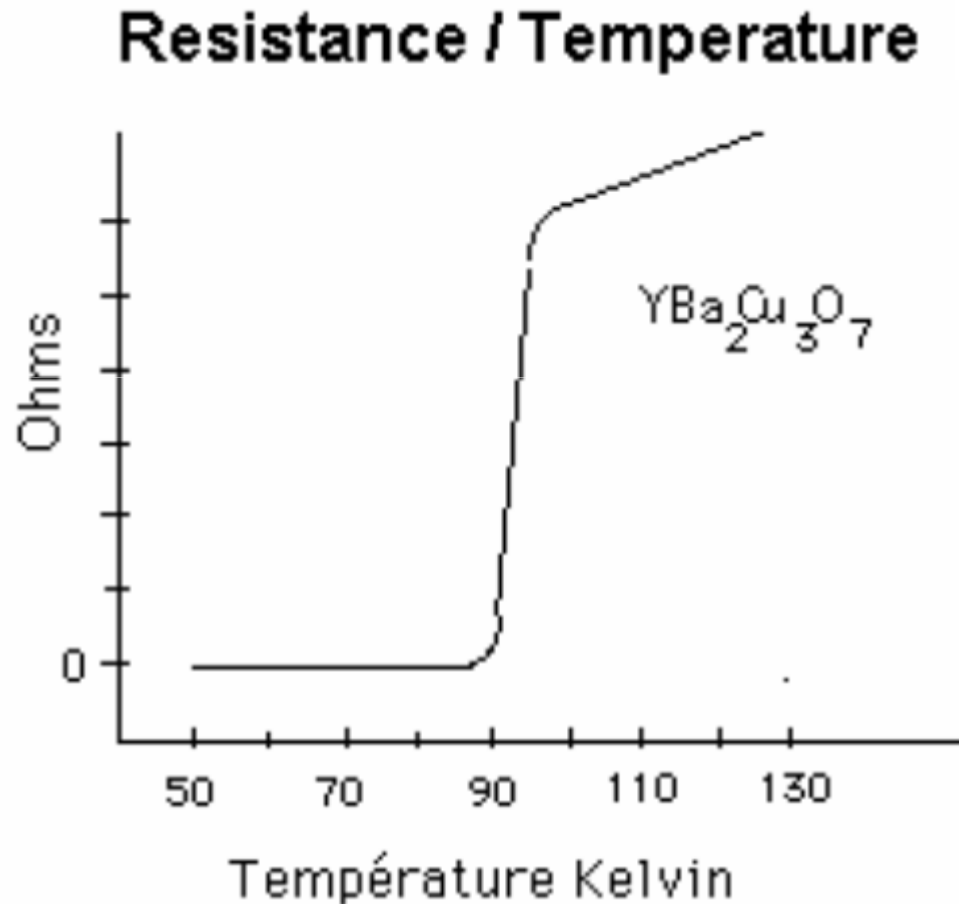
A quelle température placer un capteur de rayonnement électromagnétique fondé sur l'élévation de T° du matériau supraconducteur pour avoir la meilleure sensibilité?

1. 50-85 K

2. ≈ 92 K

3. 100 – 130 K

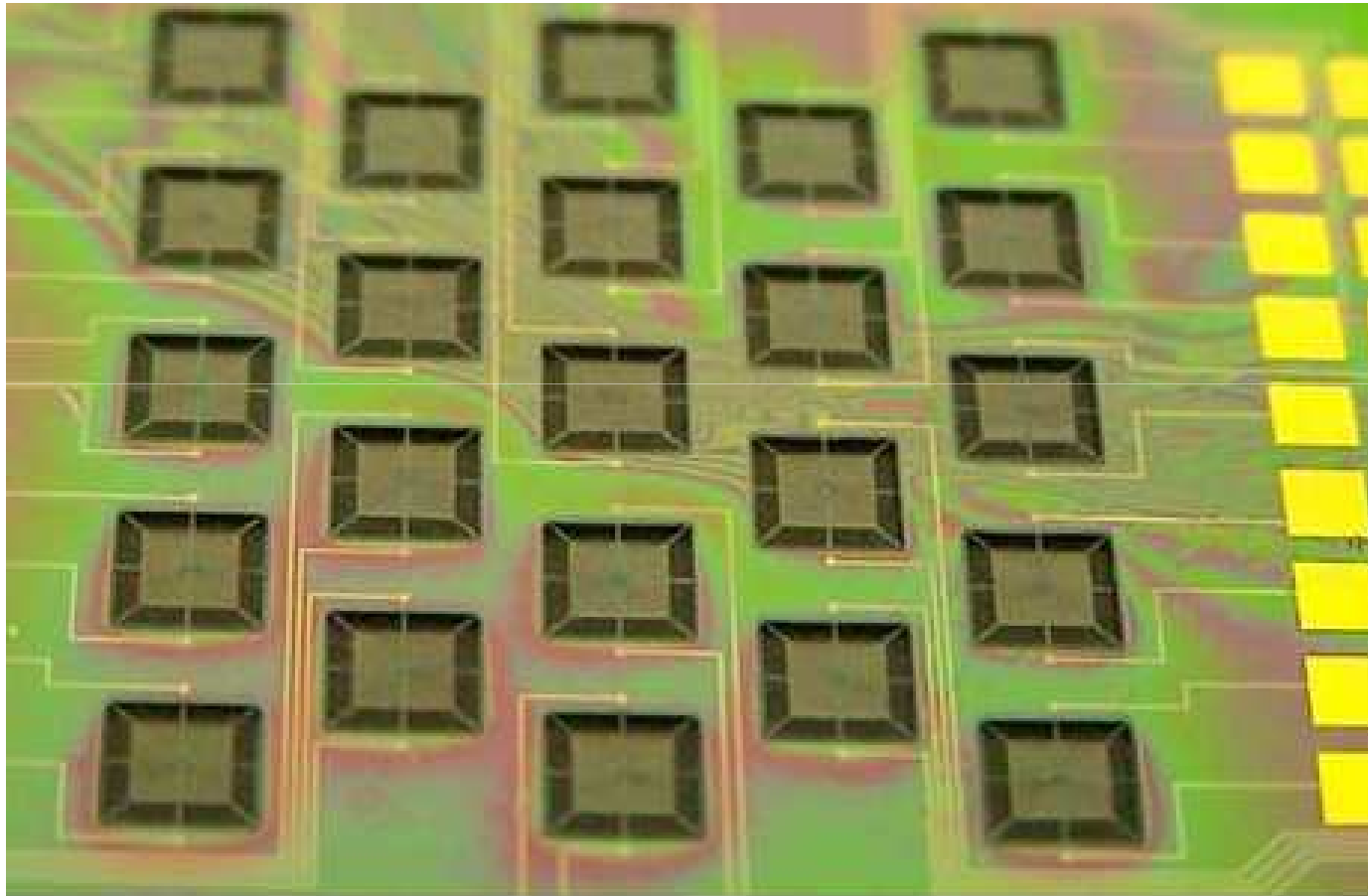
4. ≈ 130 K



1.1. Capteurs de température – Résistifs

Des conducteurs particuliers: les supraconducteurs (superconductor)

Bolomètre (bolè: rayonnement; metron: mesure)



crédits : S. Marnieros, CSNSM, Paris Sud 11 et CNRS

Semi-conducteur

Exemple

CTN: Coefficient de Température Négatif
(NTC en anglais)

$$R(T) = R_0 \exp \left\{ \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}$$

Pour le modèle utilisé au cours du TP4, $R_0 = 5 \text{ k}\Omega$
à $T_0 = 298 \text{ K}$ et $\beta = 3700 \text{ K}$ entre -40°C et $+125^\circ\text{C}$.

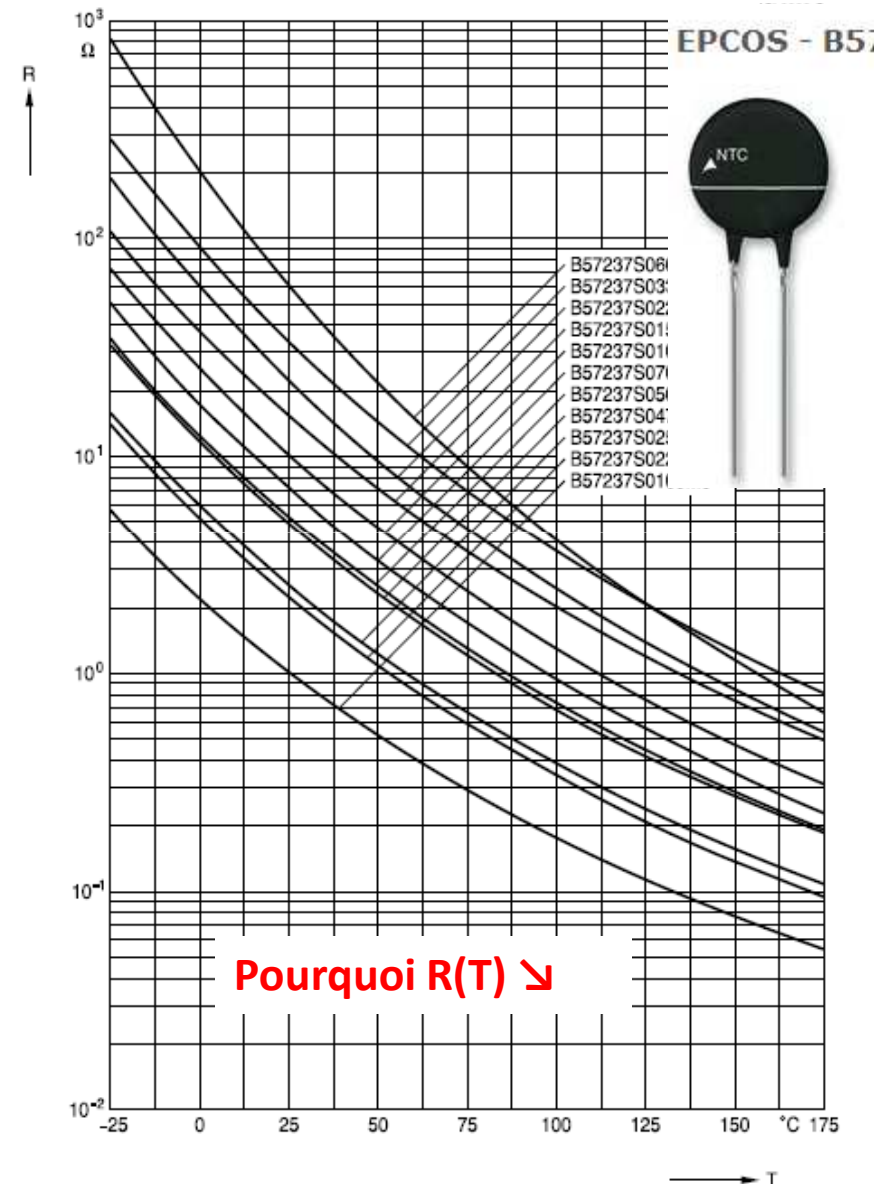
Etendue de mesure: $-60^\circ\text{C}/300^\circ\text{C}$

TCR:

Auto-échauffement et emballement thermique:
alimentation en tension ou en courant?

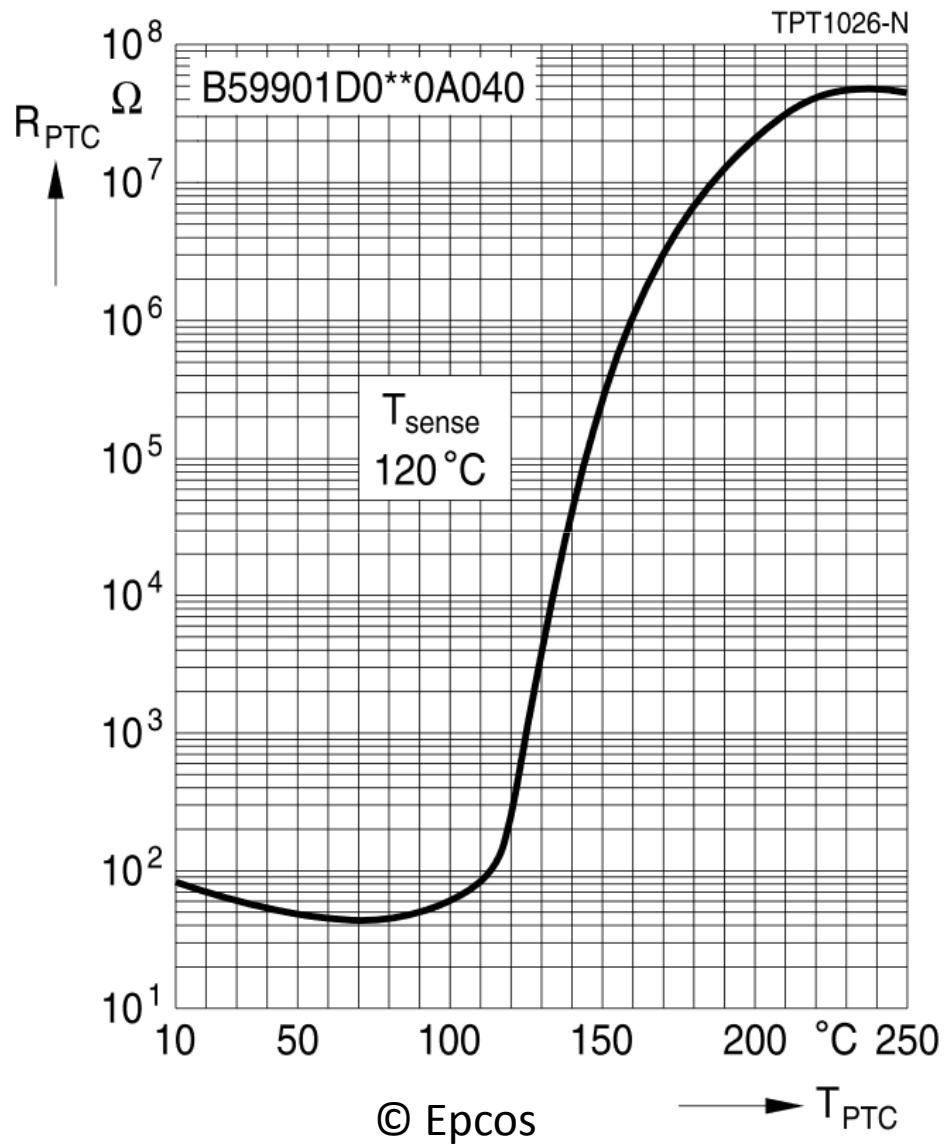
Resistance versus temperature

© EPCOS



1.1. Capteurs de température – Résistifs

Semi-conducteur



Exemple

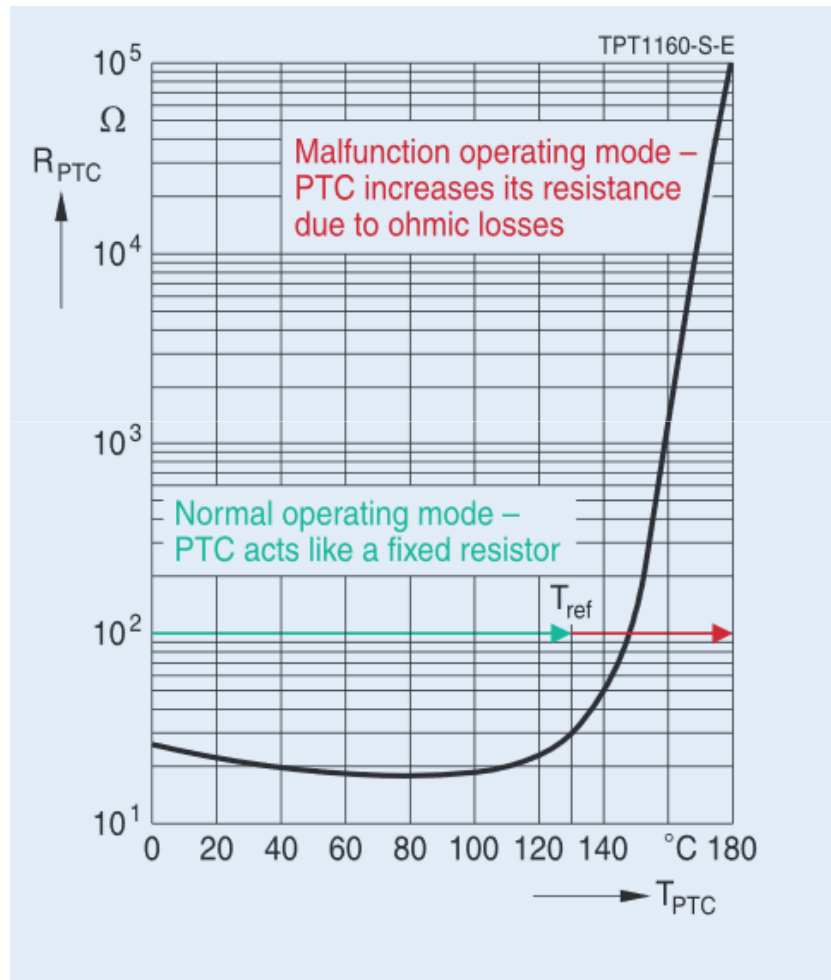
CTP: Coefficient de Température Positif
(PTC en anglais)

R augmente avec T seulement sur
un petit intervalle de T° .

1.1. Capteurs de température – Résistifs

Semi-conducteur

CTP: exemple d'application hors du domaine des capteurs

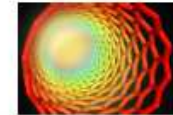


© TDK

1.2. Capteurs de température – Thermocouple

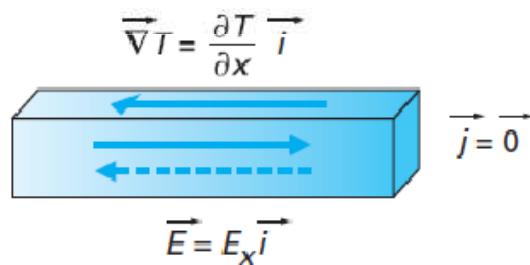
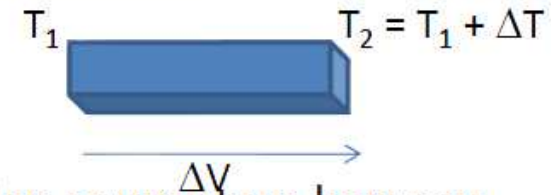
Effet Seebeck (cours Anne Migan, cf. TD/TP effet thermoélectrique)

LA THERMOÉLECTRICITÉ



L'effet Seebeck :

- ✖ Il est possible de générer un champ électrique si l'on soumet un barreau uniquement à un gradient de température.



$$S_a = \frac{E_x}{\frac{\partial T}{\partial x}}$$

$$S_a = -\frac{dV}{dT}$$

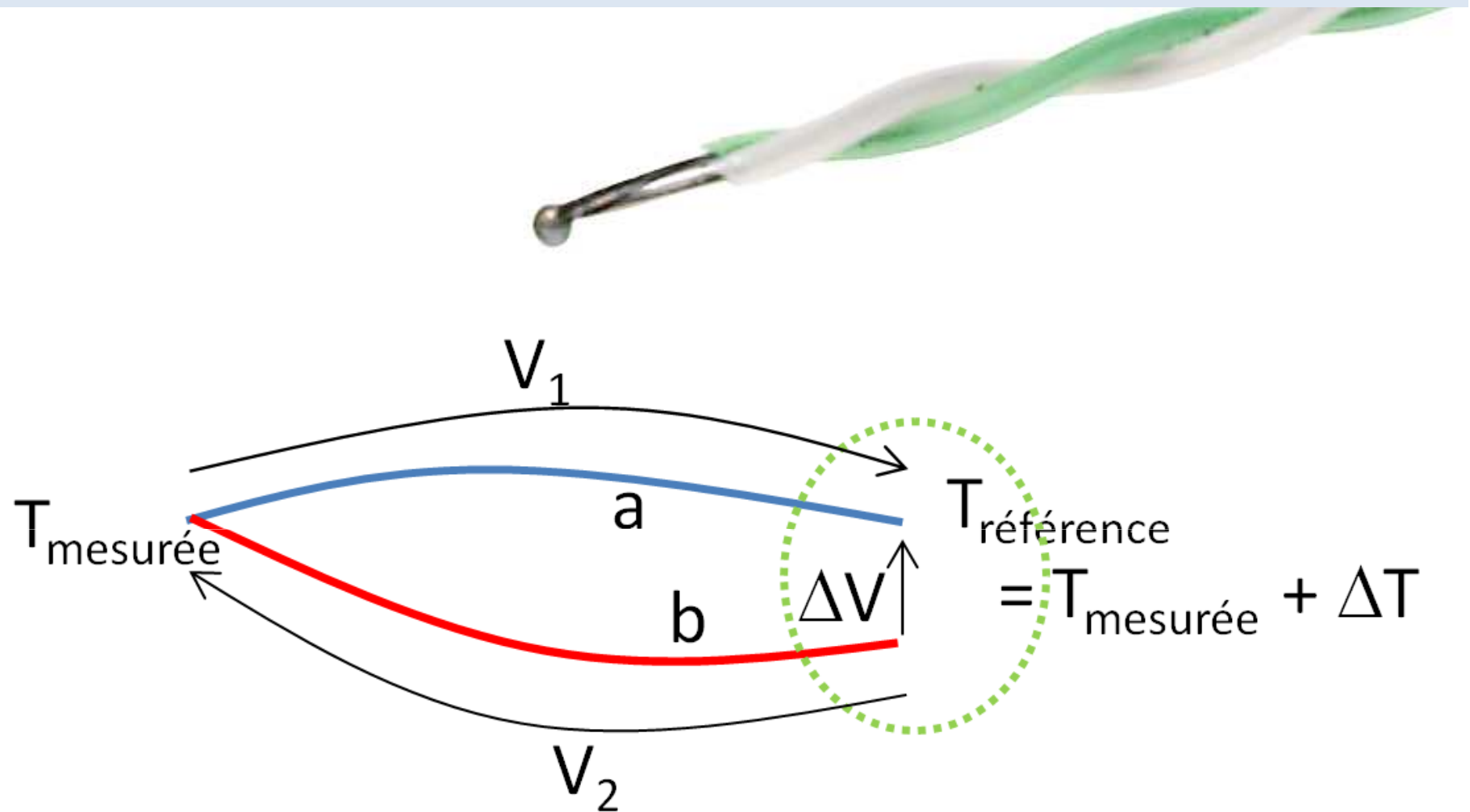
Sous forme
macroscopique

$$\Delta V = -\int S_a \cdot dT$$

S_a est le coefficient Seebeck ou le pouvoir thermoélectrique (PTE) absolu du matériau (V/K).
Il peut être positif ou négatif.

- ✖ Si S_a est supposé constant dans l'intervalle de températures : $\Delta V = -S_a \Delta T$

1.2. Capteurs de température – Thermocouple



Les fils a (bleu) et b (rouge) ne sont pas constitués du même matériau.

1.2. Capteurs de température – Thermocouple

D'après l'effet Seebeck, en supposant S_a et S_b indépendant de la T° :

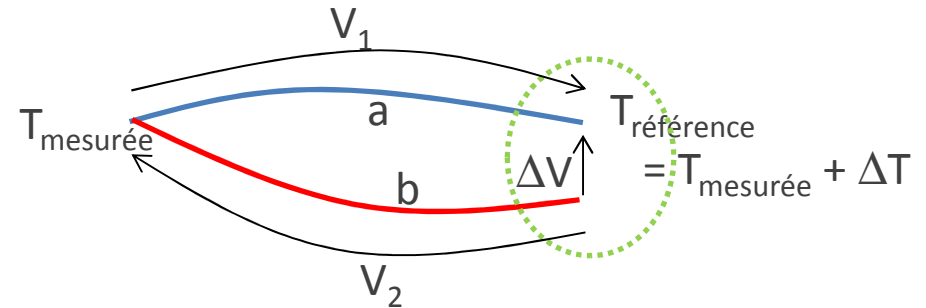
$$V_1 = -S_a(T_{\text{référence}} - T_{\text{mesurée}}) = -S_a\Delta T$$

$$V_2 = -S_b(T_{\text{mesurée}} - T_{\text{référence}}) = S_b\Delta T$$

$$\text{or } \Delta V = V_1 + V_2 \text{ donc } \Delta V = -(S_a - S_b)\Delta T$$

\Rightarrow

$$\Delta V = -S_{ab}\Delta T$$



où le « + » du voltmètre est sur le matériau a et le coefficient Seebeck de la jonction a/b = $S_{ab} = S_a - S_b$.

Application: si on connaît $S_a - S_b = S_{ab}$ et si on mesure ΔV , on en déduit ΔT .
Connaissant $T_{\text{référence}}$, on peut en déduire $T_{\text{mesurée}} = T_{\text{référence}} - \Delta T$: c'est le principe du thermocouple, un type de thermomètre.

Remarques:

- * Que faut-il faire si S_a et S_b dépendent de T ?
- * Y a-t-il un effet Peltier dans le thermocouple?

Loi des métaux successifs:

$$\Delta V(T_1, T_2) = \Delta V(T_1, T_2) + \Delta V(T_1, T_2)$$

Mat. a/b Mat. a/c Mat. c/b

L'utilité est de connaître S_{ab} pour n'importe quels couples a et b connaissant S_{ab} où b est un matériau de référence (platine, hafnium).

Exemple:

$$S_{\text{constantan/platine}} = -35 \mu\text{V/K à } 20^\circ\text{C} \text{ (constantan: alliage cuivre-nickel)}$$

$$S_{\text{cuivre/platine}} = 6,5 \mu\text{V/K à } 20^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow S_{\text{cuivre/constantan}} = 41,5 \mu\text{V/K à } 20^\circ\text{C (thermocouple type T).}$$

Loi des métaux intermédiaires :

Un 3^{ème} matériau peut être ajouté (créant ainsi 2 jonctions supplémentaires) sans effet si ces 2 jonctions sont à la même T° .

Utilité: on peut donc connecter un voltmètre dans le circuit précédent.

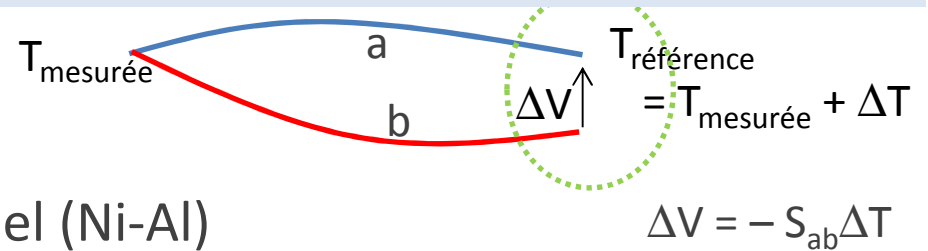
Loi des T° intermédiaires:

Pour une même association (matériau a + matériau b)

$$\begin{array}{ccccc} \Delta V(T_1, T_2) & + & \Delta V(T_2, T_3) & = & \Delta V(T_1, T_3) \\ \text{Mat. a/b} & & \text{Mat. a/b} & & \text{Mat. a/b} \end{array}$$

Utilité: table $\Delta V(T, 0^\circ\text{C})$ et on déduit $\Delta V(T_1, T_2)$ (cf. la suite)

1.2. Capteurs de température – Thermocouple



Exemple du thermocouple type K:

Matériaux a: chromel (Ni-Cr) et b: alumel (Ni-Al)

On suppose que la T° est comprise entre 0 et 500°C.

* S_{ab} supposé constant avec la T° dans l'intervalle considéré (justifié:)

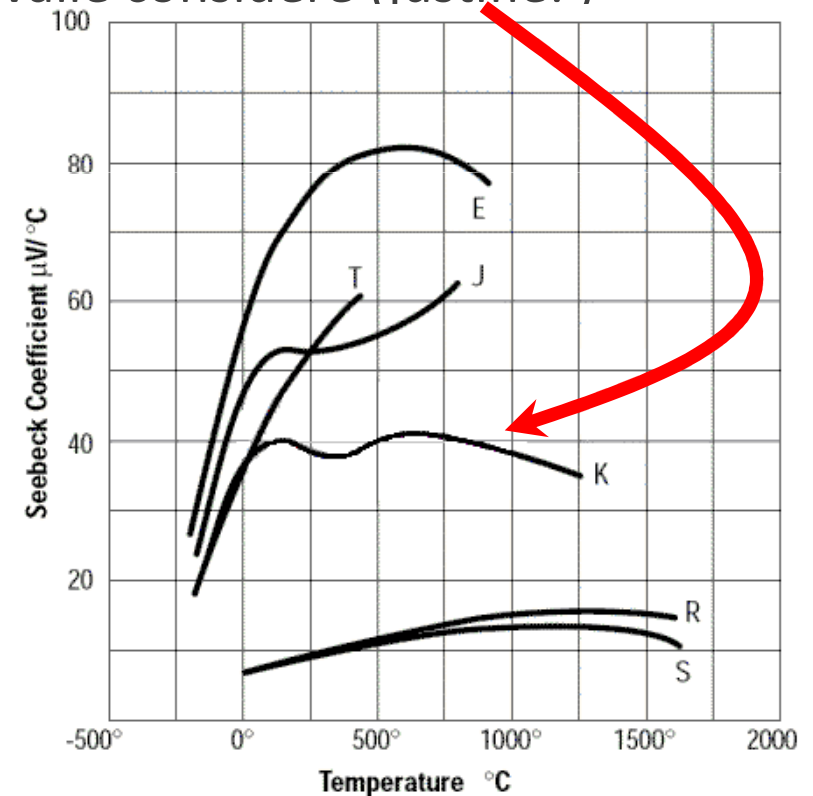
$$S_{ab} \approx 39 \mu\text{V/K (approximation)}$$

* $T_{\text{référence}} = 293 \text{ K}$.

* Mesure au voltmètre: $\Delta V = 2 \text{ mV}$

$$\rightarrow \Delta T = -51,3 \text{ K} \rightarrow T_{\text{mesurée}} = 344,3 \text{ K} \approx 71^\circ\text{C}.$$

!!!: La borne + du voltmètre
est sur chromel (mat. a)



Exemple du thermocouple de type K (a: chromel (Ni-Cr) et b: alumel (Ni-Al)).
Cette fois S_{ab} n'est pas supposé constant avec la T° .

$$\Delta V(T_{\text{mesurée}}, T_{\text{référence}}) + \Delta V(T_{\text{référence}}, 0^\circ\text{C}) = \Delta V(T_{\text{mesurée}}, 0^\circ\text{C}).$$

* $T_{\text{référence}} = 20^\circ\text{C}$. * Mesure au voltmètre: $\Delta V = 2 \text{ mV}$

→ $T_{\text{mesurée}} \approx 69^\circ\text{C}$ (plus précis)

Table des tensions de Thermocouple Type K (Chromel/Alumel)												
Tension thermoélectrique en millivolts avec jonction de référence à 0°C												
$^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$^\circ\text{C}$
-20	-0,777	-0,816	-0,854	-0,892	-0,930	-0,968	-1,005	-1,043	-1,081	-1,118	-1,156	-20
-10	-0,392	-0,431	-0,469	-0,508	-0,547	-0,585	-0,624	-0,662	-0,701	-0,739	-0,777	-10
-0	0,000	-0,039	-0,079	-0,118	-0,157	-0,197	-0,236	-0,275	-0,314	-0,353	-0,392	-0
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,199	0,238	0,277	0,317	0,357	0,397	0
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758	0,798	10
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,162	1,203	20
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570	1,611	30
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,776	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981	2,022	40
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394	2,436	50
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,726	2,767	2,809	2,850	60
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224	3,266	70
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639	3,681	80
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054	4,095	90
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,343	4,384	4,426	4,467	4,508	100

1.3. Capteurs de température – Synthèse

	Pt100	CTN	Thermocouple
Etendue de mesure	≈ -200; 1000°C	≈ -100; 500°C	≈ -300; 2300°C
Sensibilité	—*	++*	– (→ ampli.)
Précision (en moyenne)	0,2%	0,1%	0,2% à 2%
Rapidité	rapide si miniaturisé, lent sinon (5 s)		très rapide (ponctuel)
Finesse	effet Joule		excellent
Prix	≈ 5 €	0,1 - 1 €	≈ 0 - 5 €
Consommation	dépend du circuit de conditionnement		pas d'alim. ext.
Linéarité	excellente	mauvaise	dépend du type
Grandeur d'influence	humidité (corrosion)
Autres qualités			mesure ponctuelle

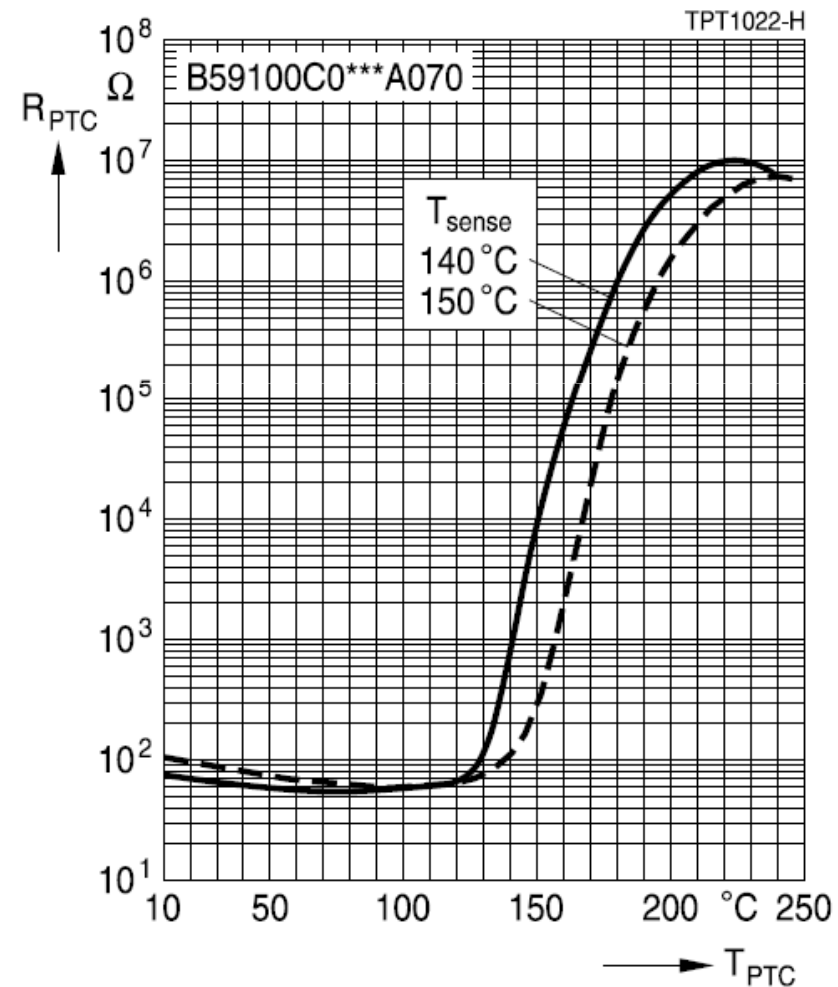
* Pt100 v. CTN: CTN plus sensible mais en conséquence grande variation de R → + difficile à conditionner.

QCM (ER2 du 12 novembre 2015)

Soit la CTP (PTC en anglais) dont la caractéristique est donnée sur la figure 4. On utilisera par la suite la courbe « $T_{\text{sense}} 140^\circ\text{C}$ » (en trait plein).

Sur quel intervalle de températures la CTP est-elle utilisable préférentiellement ? De

1. 10 à 130°C
2. 10 à 250°C
3. 210 à 250°C
4. 130 à 210°C



QCM (ER2 du 6 novembre 2014)

Le coefficient d'un thermocouple, supposé constant sur l'étendue de mesure, est égal à $35 \mu\text{V/K}$.

Quel est l'écart de température (en valeur absolue) entre la température de référence et la température à mesurer si on mesure une tension aux bornes du thermocouple de $0,70 \text{ mV}$?

1. 20°C

2. $0,5 \text{ K}$

3. 275°C

4. 275 K

QCM (ER2 du 12 novembre 2015)

Soit un thermocouple de type J dont le coefficient de Seebeck est donné sur la figure ci-dessous (en $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$). La température de référence est égale à 200°C et la tension mesurée entre les deux bornes du thermocouple est égale à $1,06\text{ mV}$.

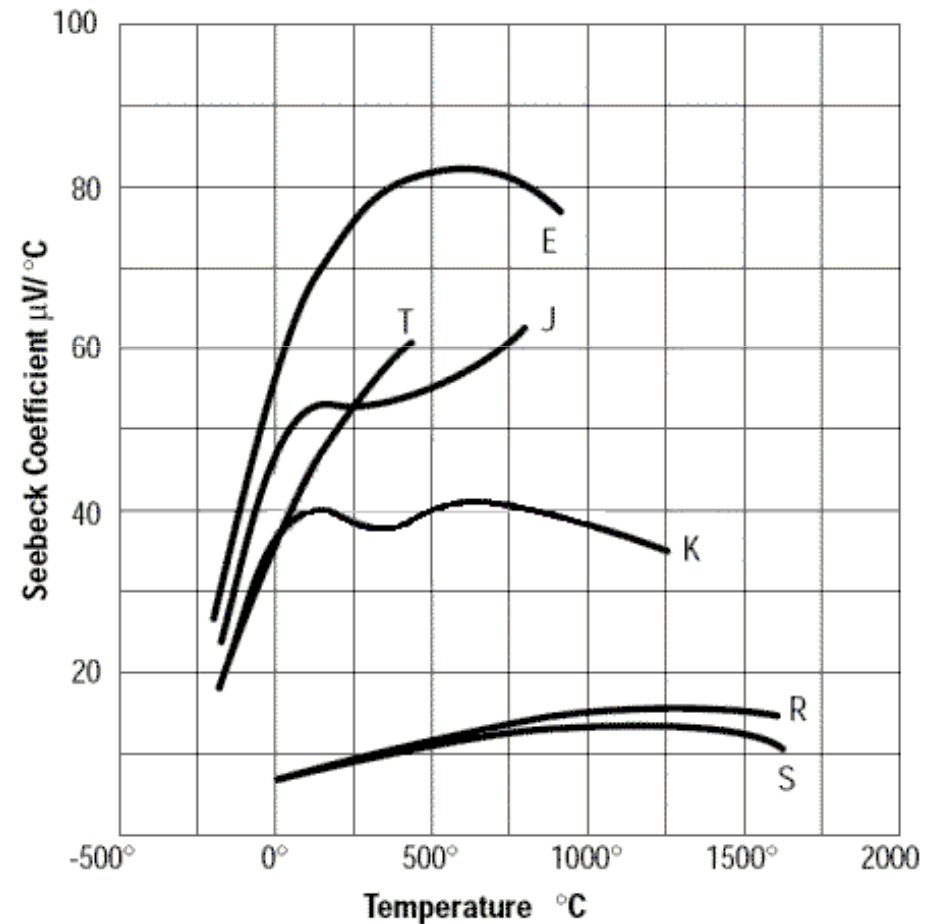
Quelle est approximativement la différence de température (en valeur absolue) entre la température de référence et la température mesurée ?

1. 110°C

2. 50°C

3. 20°C

4. 80°C



QCM (ER2 du 12 novembre 2015)

Lequel de ces capteurs de température fait preuve intrinsèquement de la meilleure finesse ? (Le circuit de conditionnement étant supposé optimal pour ces 4 capteurs.)

1. CTN

2. thermocouple

3. Pt100

4. CTP

2. Capteurs de champs magnétique

2. Capteur de champ magnétique

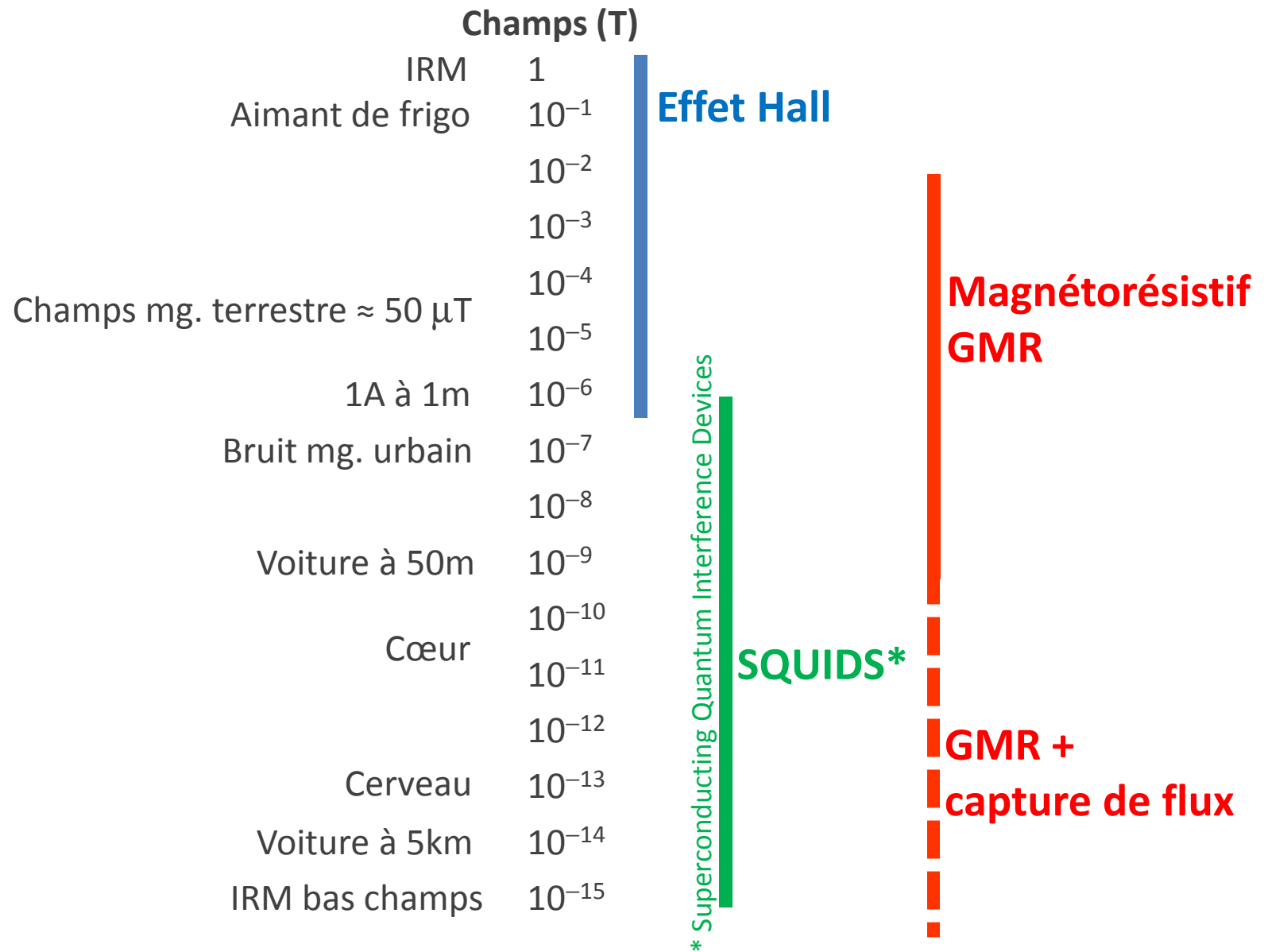
2.1 A effet Hall

2.2 Magnétorésistance

2.3 Disque dur

2.4 Autres applications (mesurande primaire \neq champs magnétique)

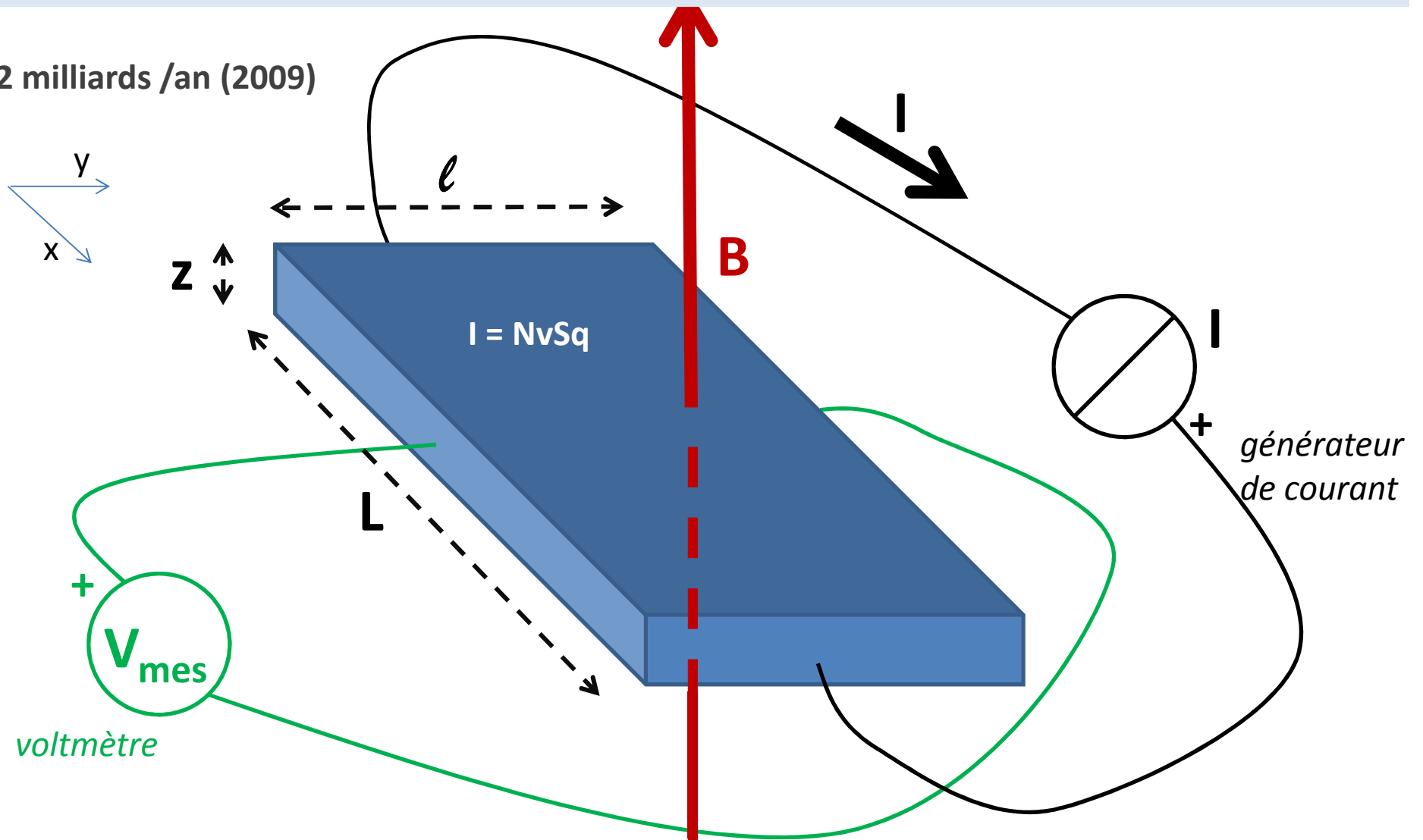
2. Capteurs de champs magnétique

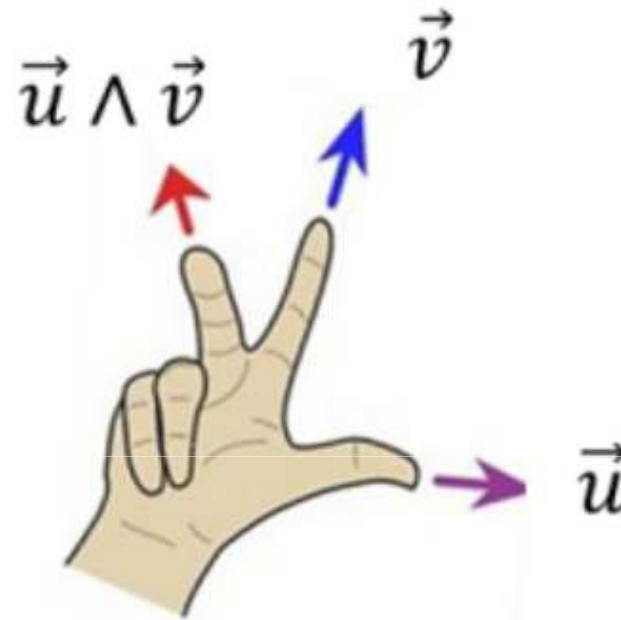


D'après C. Fermon et M. Pannetier-Lecoeur, Capteurs magnétiques à base d'électronique de spin, Colloque de l'Orme des merisiers, 2010.

2.1. Capteurs de champs magnétique – Effet Hall

2 milliards /an (2009)





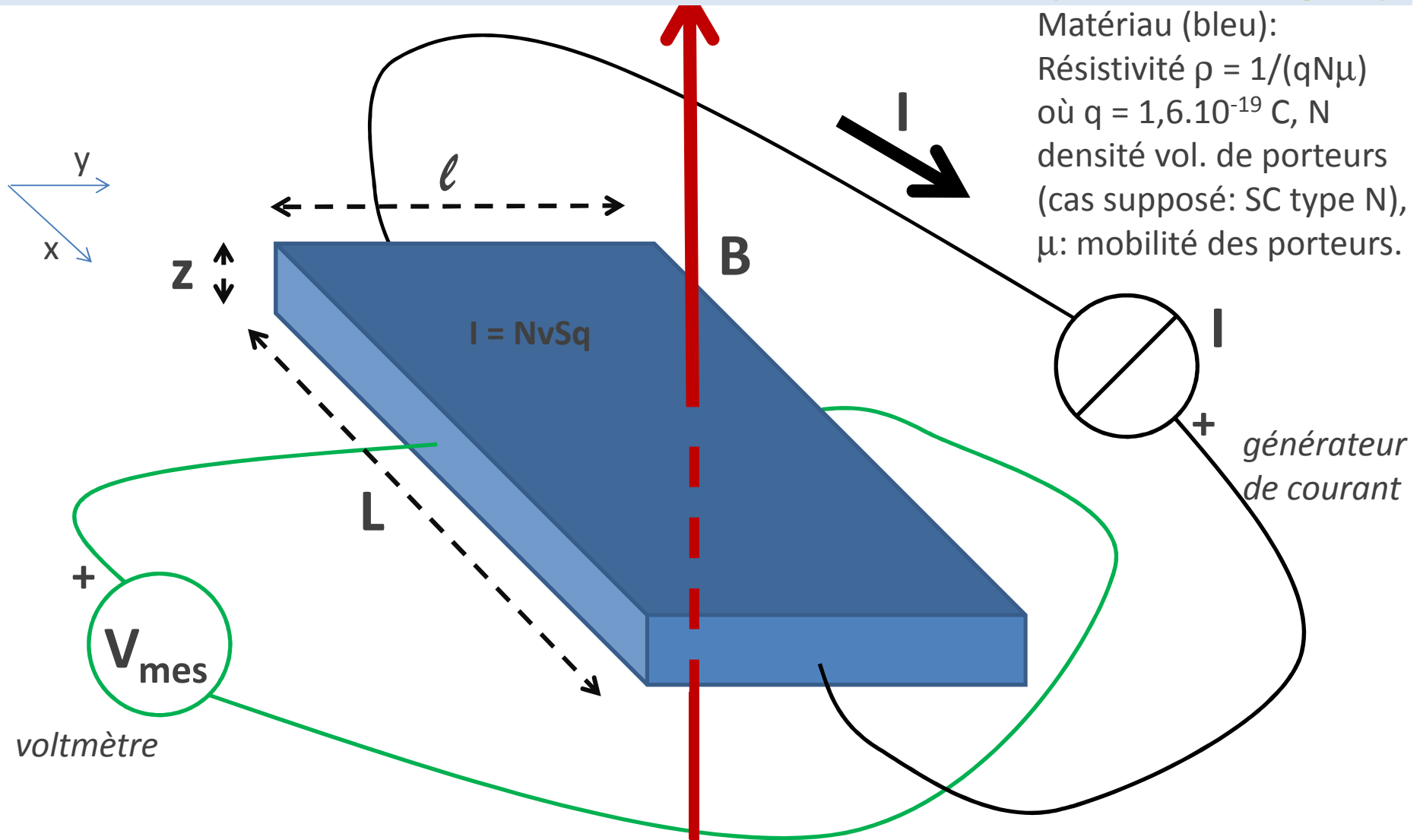
© <http://tsiastnicolas.free.fr>

Règle de la main droite

Force de Lorentz sur 1 électron $-q$:

2.1. Capteurs de champs magnétique – Effet Hall

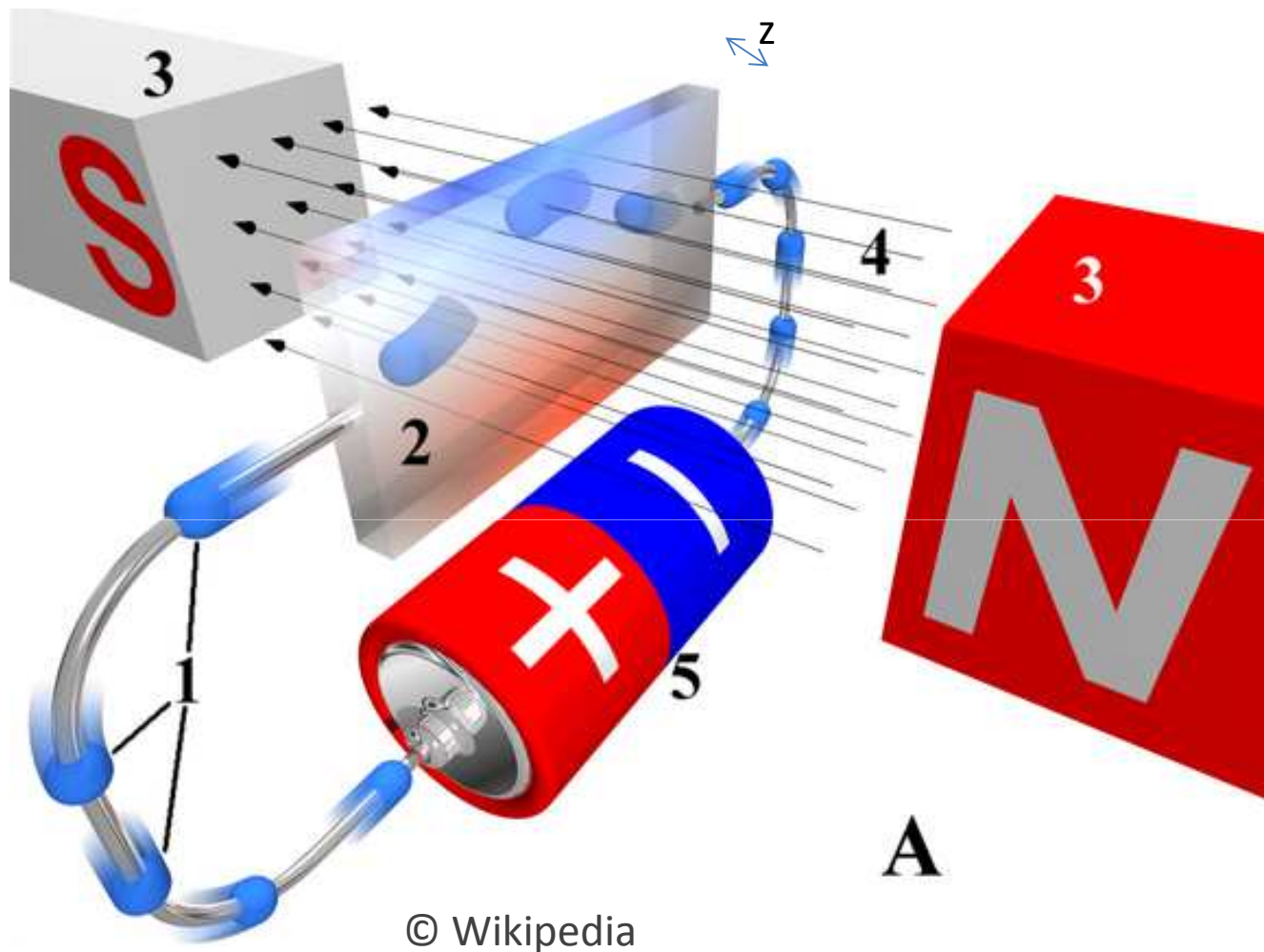
(cf. cours amphi.)



$$V_{\text{mes}} = R_H IB/z \quad \text{avec } R_H = 1/qN.$$

R_H : constante de Hall dépendant du matériau (démonstration: cf. cours amphi.)

2.1. Capteurs de champs magnétique – Effet Hall



Autre utilité: mesure de la densité de porteurs de charge dans un matériau (on connaît B et V_{mes} , on en déduit N).

$$V_{\text{mes}} = R_H IB/z \text{ avec } R_H = 1/qN$$

Choix du matériau, de la géométrie et du courant I:

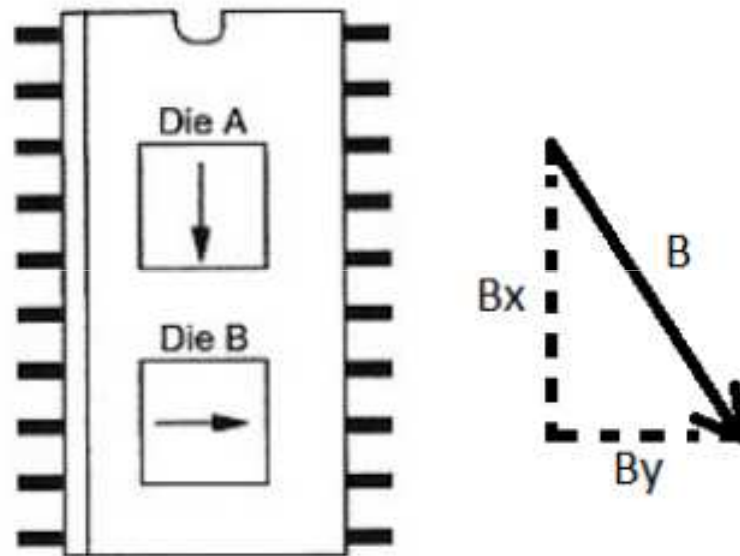
Pour une bonne sensibilité...

Mais...

Ordre de grandeur:

	$R_H \text{ (m}^3/\text{C)}$
GaAs (semi-conducteur)	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Cu	$5,5 \cdot 10^{-11}$

Boussole (cf. TD6)



2.2. Capteurs de champs magnétique – Magnétorésistance

Dans certains matériaux, la résistivité dépend du champ magnétique appliqué: magnétorésistivité (MR)

1856: MR découverte par William Thomson (Lord Kelvin) (force de Lorentz).

1975: TMR (Tunnel MR) découverte par Michel Jullière (1995 à T° ambiante).

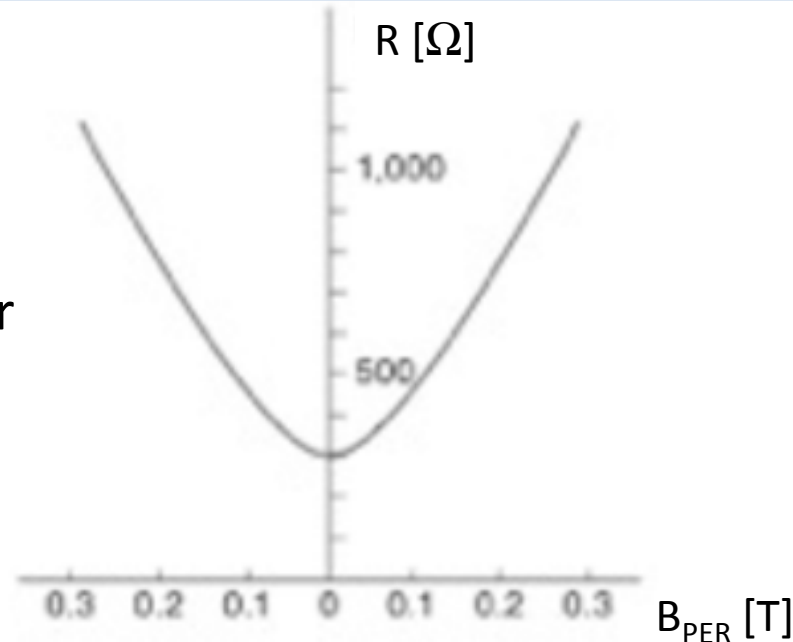
1988: GMR (Giant MR) découvert par Albert Fert et Peter Grünberg, Prix Nobel 2007. La résistance chute quand on applique un chp. mg. (alternance de couche ferromagnétiques et non magnétique). Giant par rapport aux conducteurs classiques.

1989: CMR (Colossal MR): R. von Helmholt et col (1950s, en théo.: G. H. Jonker et col)

...

2.2. Capteurs de champs magnétique – Magnétorésistance

$R(B)$ pour un semi-conducteur



Par exemple, pour un semi-conducteur avec un seul type de porteurs (électron: N, ou trous: P):

$$\rho = \rho_0[1 + (\mu B_{PER})^2]$$

où μ est la mobilité en m^2/Vs (c'est homogène: cf. cours amphi).

2.2. Capteurs de champs magnétique – Magnéto-résistance

Multicouche: alternance ferro. / non mg. → GMR (A. Fert et col, 1988)

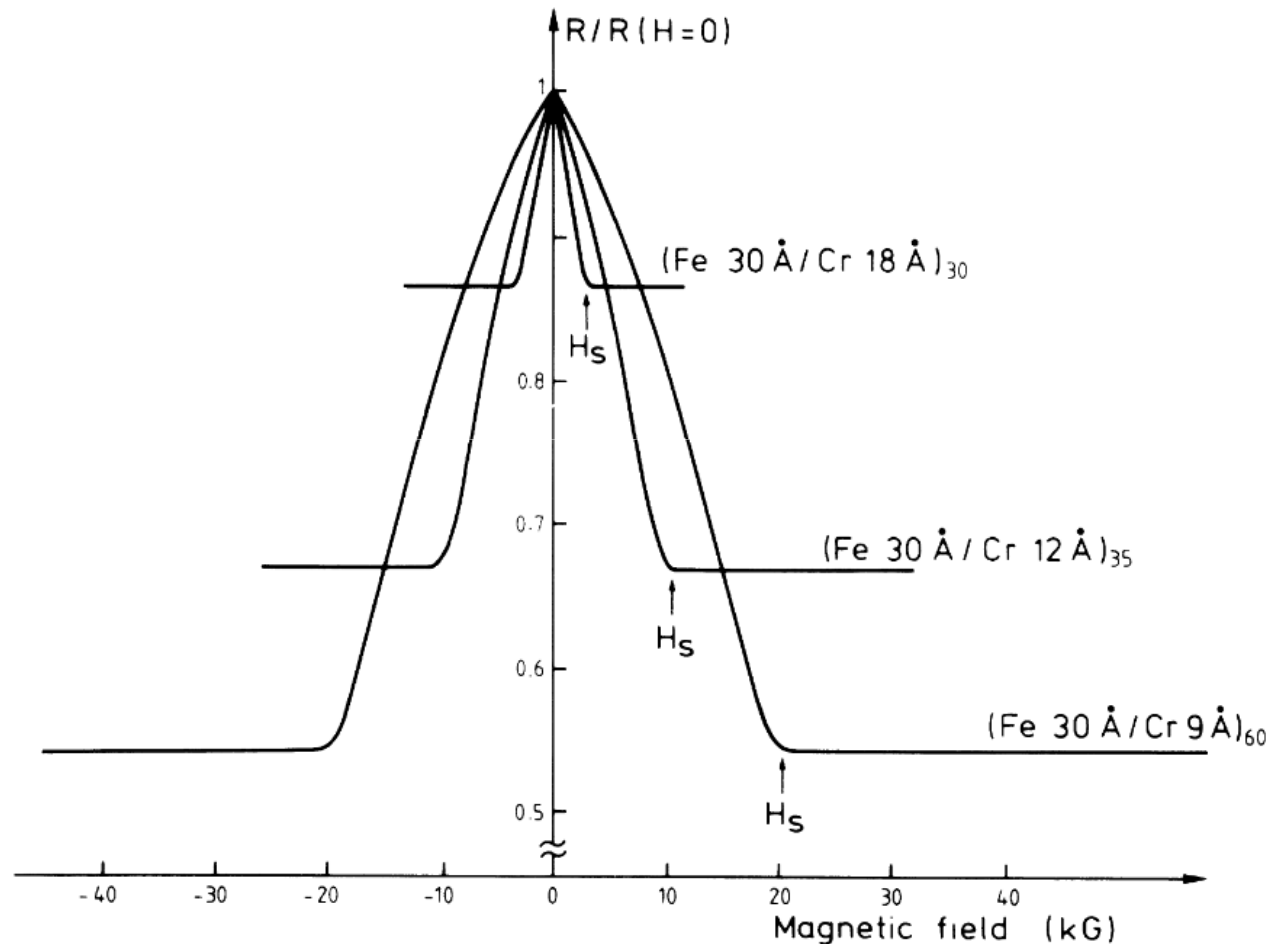
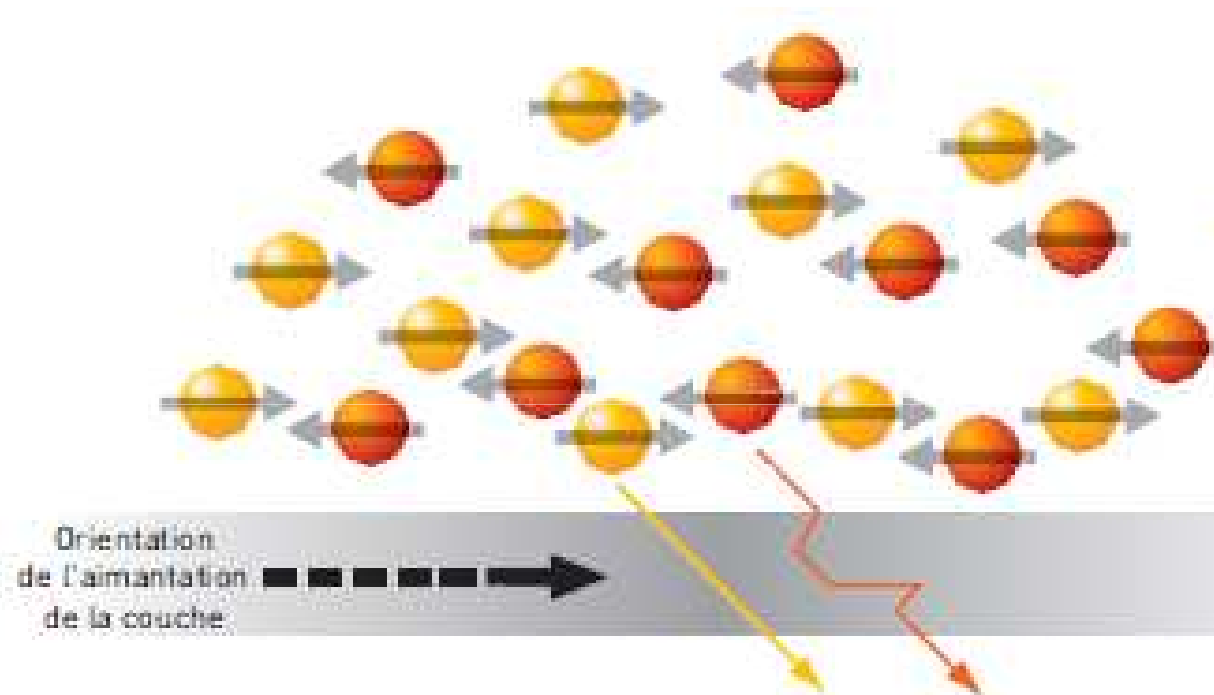


FIG. 3 Magneto-resistance of three Fe/Cr superlattices at 4.2 K. The current and the applied field are along the same [110] axis in the plane of the layers.

2.2. Capteurs de champs magnétique – Magnétorésistance

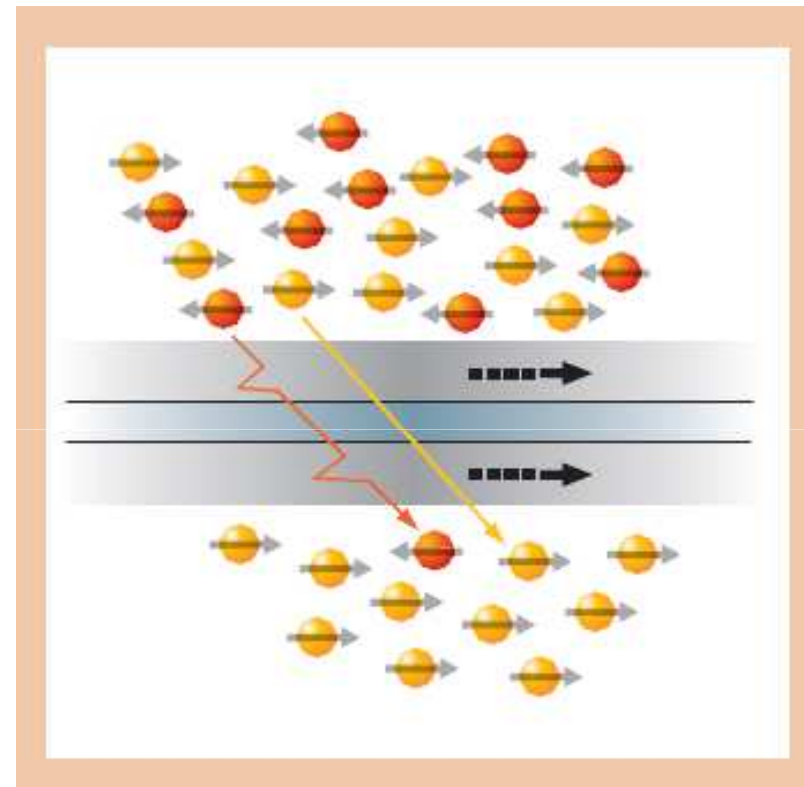
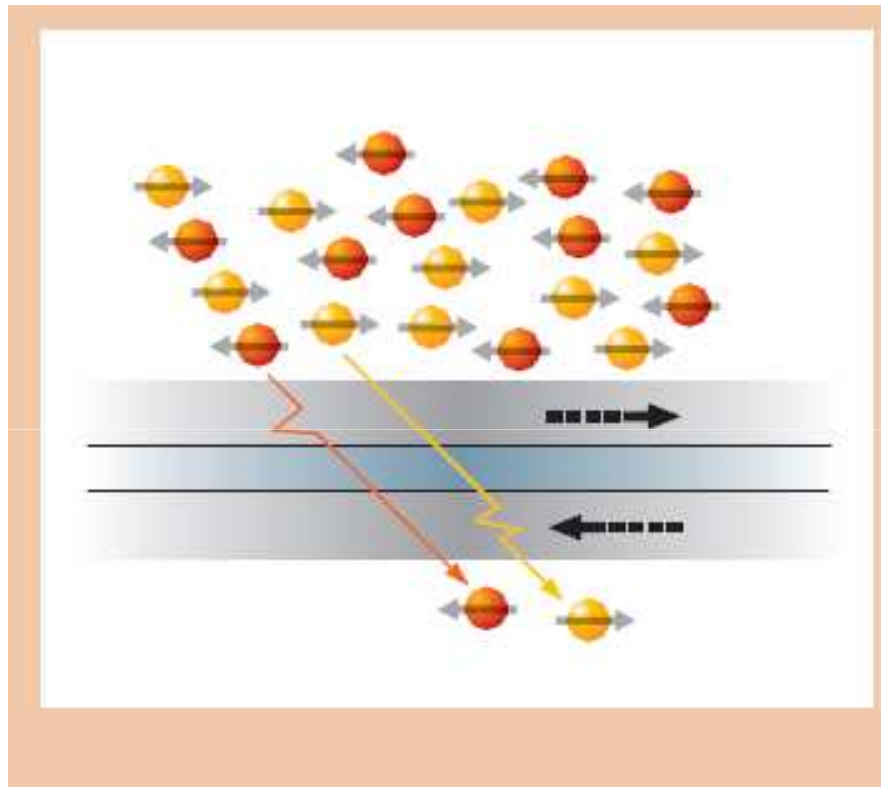
Magnétorésistance géante (GMR)



© Soleil, « La magnétorésistance géante: quelques notions utiles »

2.2. Capteurs de champs magnétique – Magnétorésistance

Magnétorésistance géante (GMR)



© Soleil, « La magnétorésistance géante: quelques notions utiles »

2.3. Capteurs de champs magnétique – Disque dur

Lecteur de disque dur: tête de lecture GMR (plus sensible → détection de plus faibles chp. mg. → augmentation de la capacité de stockage).

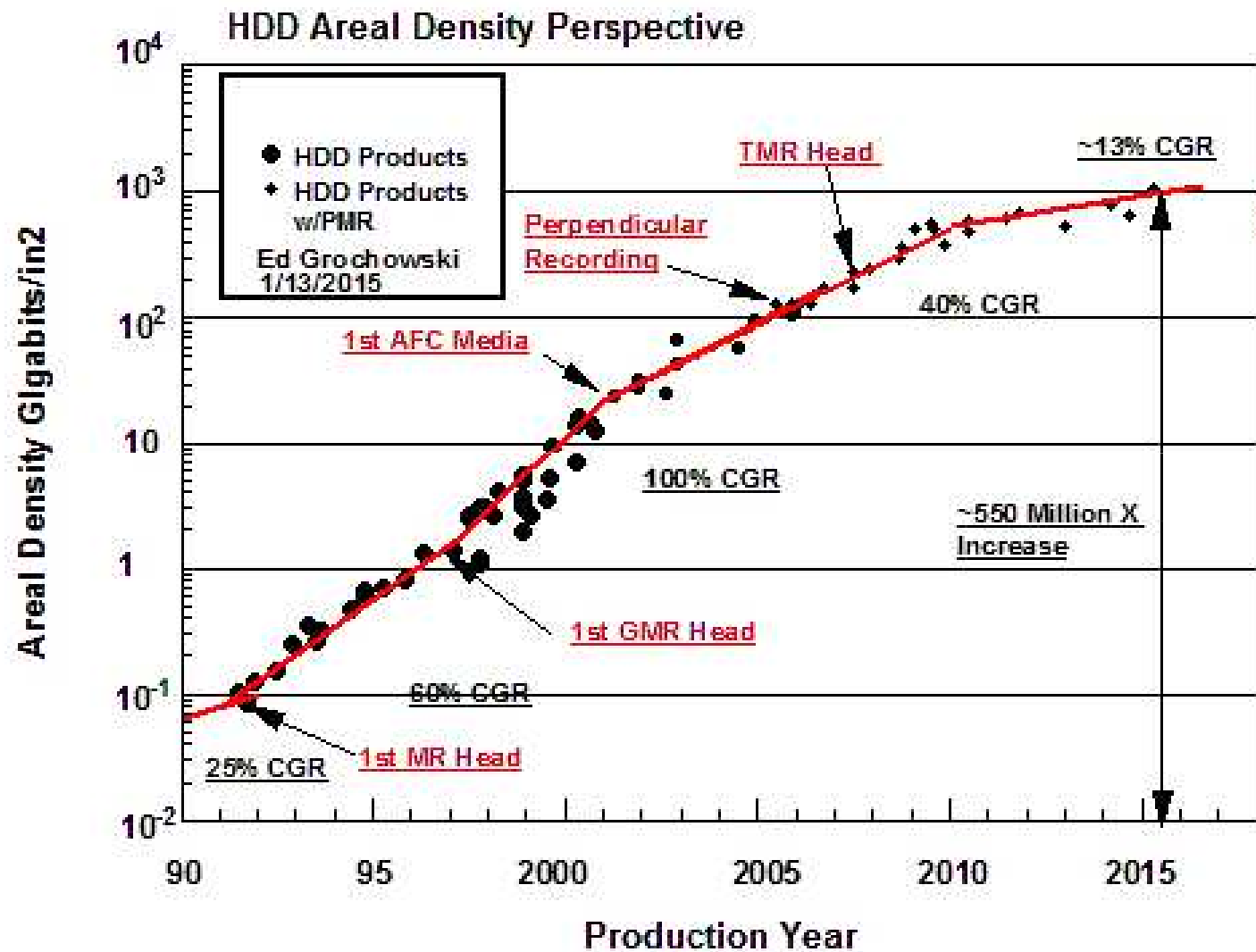


© ??

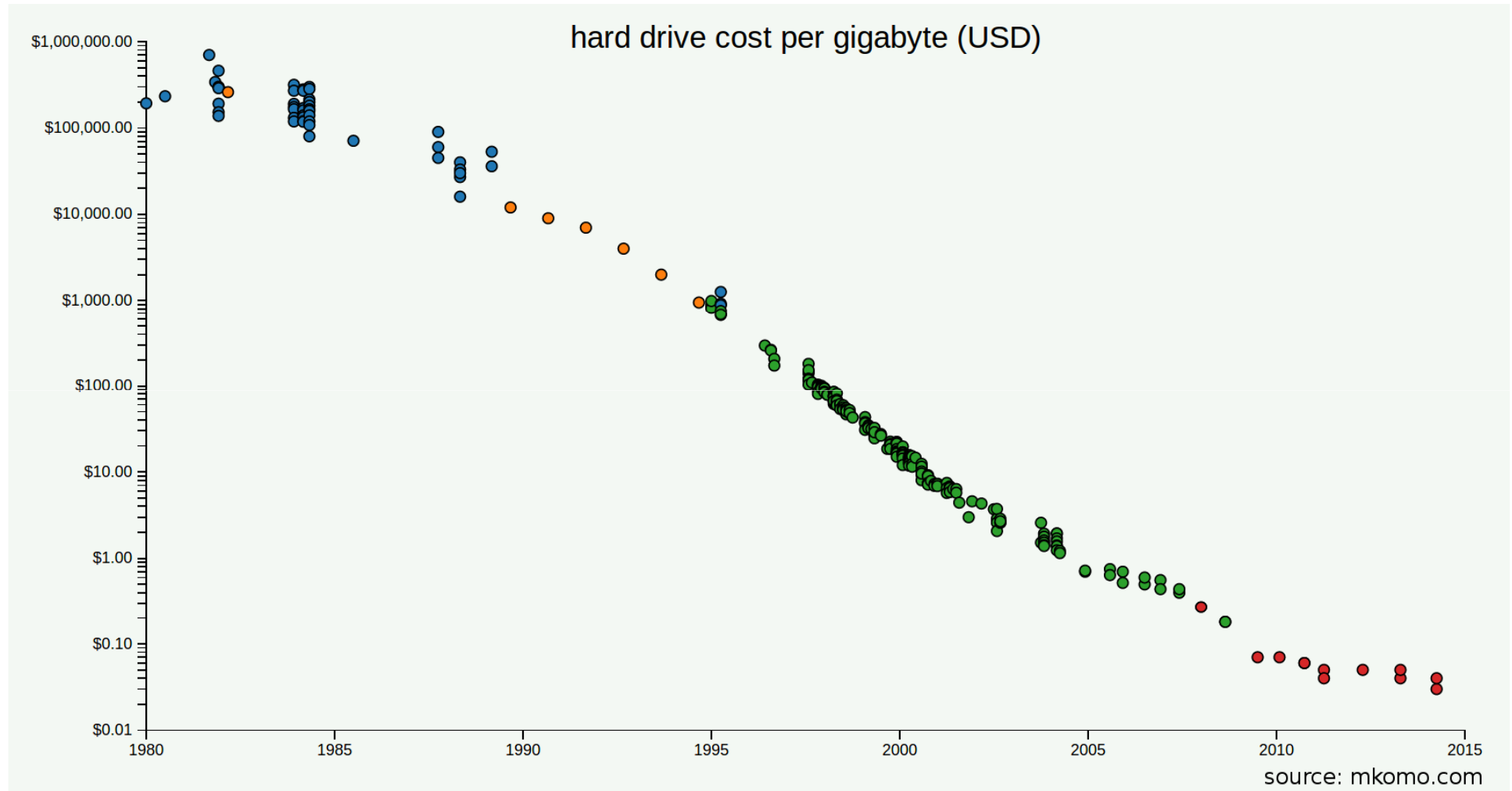
<https://www.youtube.com/watch?v=lqHclFRegLg> (ou taper comme mots clé: GMR soleil vidéo)



2.3. Capteurs de champs magnétique – Disque dur

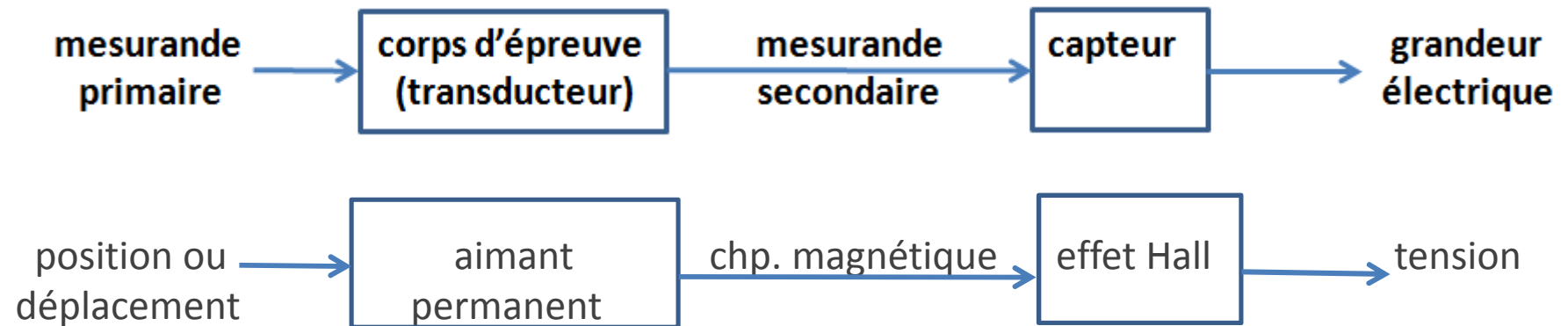


2.3. Capteurs de champs magnétique – Disque dur



2.4. Capteurs de champs magnétique – Autres applications

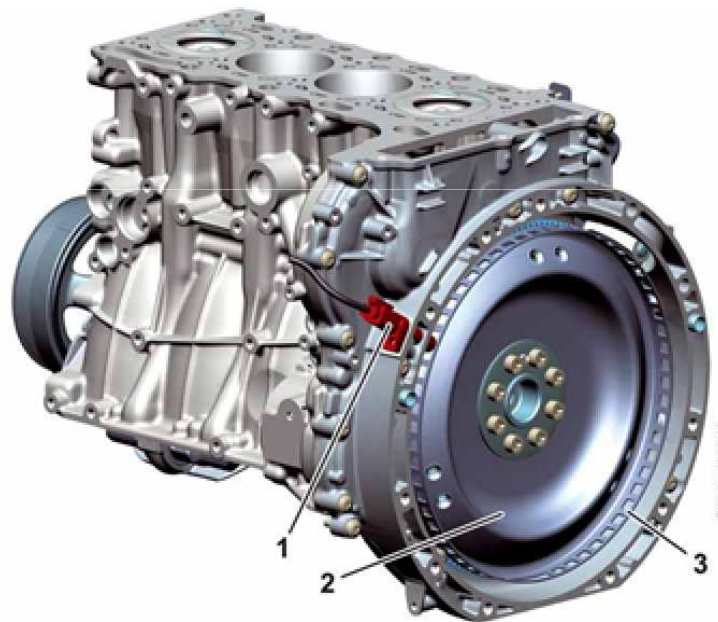
Transduction multiple:



➡ Capteurs de distance, de vitesse de rotation (TP2), détecteur de proximité (avec en plus un trigger).

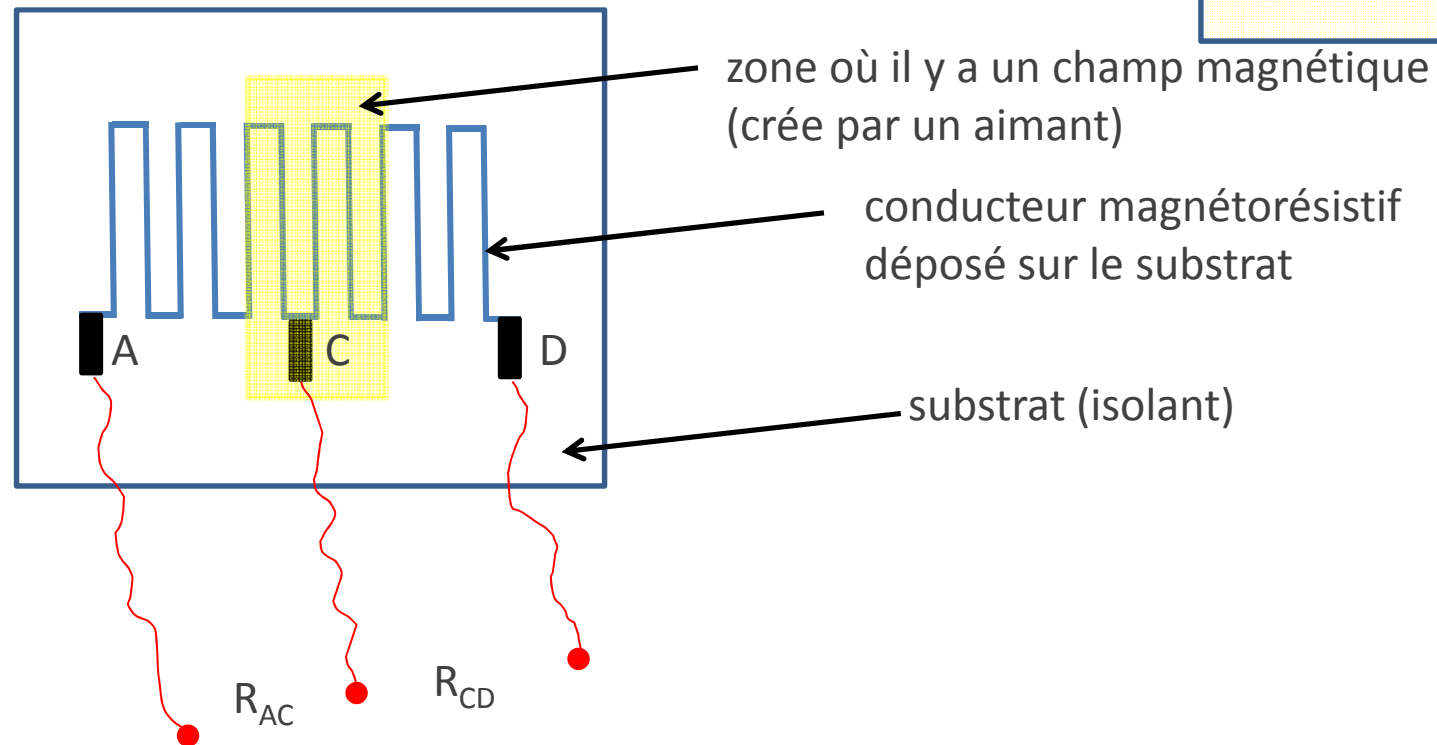
Capteur de position pour le vilebrequin

© <http://www.forum-mercedes.com>

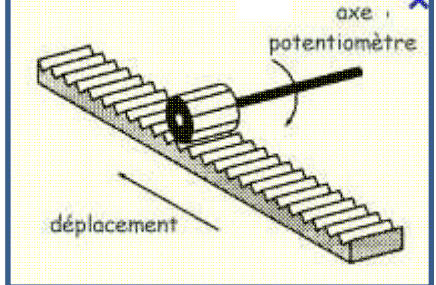


Capteurs de déplacement magnétorésistif (sans frottement)

L'aimant et le substrat sont en mouvement relatif.



Capteur mécanique:
avec frottement



2.4. Capteurs de champs magnétique – Autres applications

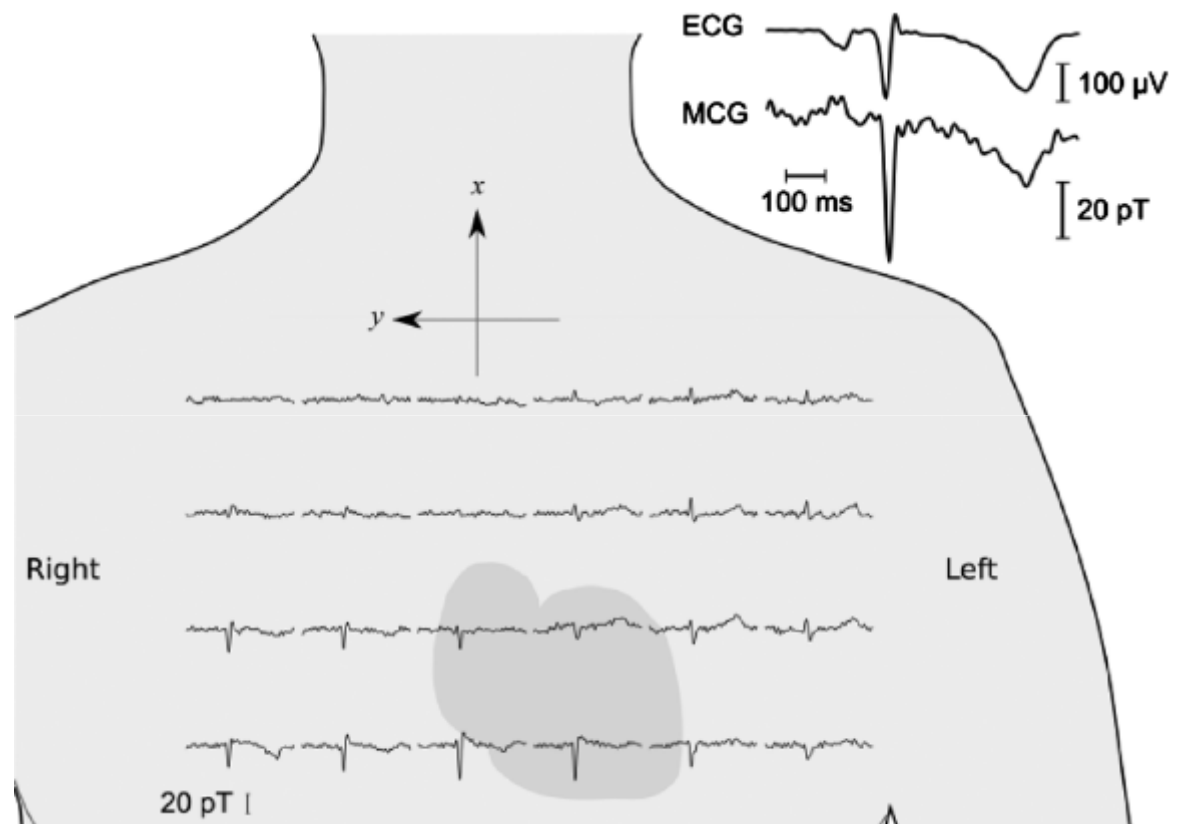
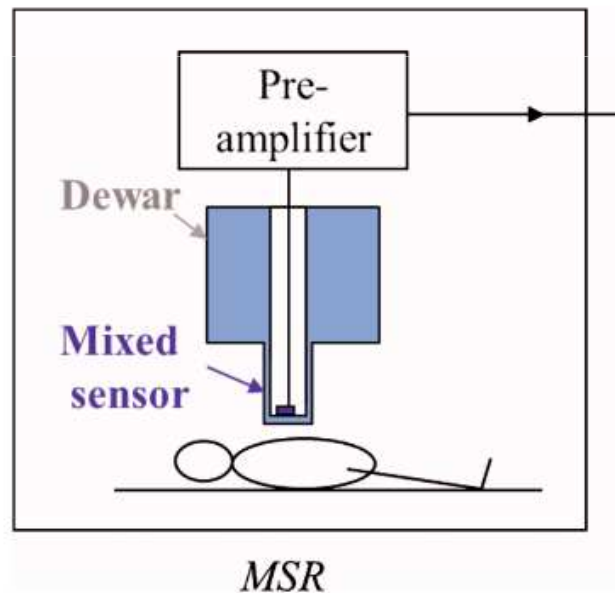
Magneto-cardiographie (MCG)

Complémentaire de l'ECG:

Sans contact

→ Possibilité MCG fœtale

→ Possibilité d'imagerie



M. Pannetier-Lecoeur et col, Magnetocardiography with sensors based on giant magnetoresistance, App Phy Let 98, 153705 (2011)

QCM (ER2 du 16 novembre 2017)

Quelle doit-être l'unité de R_H pour que l'équation du capteur à effet Hall $V_{mes} = R_H IB/z$ soit homogène en dimension ?

1. m^3/C

2. Vm/A

3. Vm/T

4. AT/Vm

La GMR (MagnétoRésistance Géante) est utilisée dans les disques durs pour

1. effacer

2. lire

3. écrire

4. lire, écrire et effacer

QCM (ER2 du 6 novembre 2014)

Une chaîne de mesure d'un champ magnétique supposée linéaire sur l'étendue de mesure a une sensibilité de 10 mV/T. L'incertitude sur la mesure de la tension est de ± 1 mV.

En conséquence, quelle est l'incertitude sur la valeur du champ magnétique ?

1. $\pm 0,01$ T

2. $\pm 0,1$ T

3. ± 1 T

4. ± 10 T

QCM (ER2 du 12 novembre 2015)

On souhaite mesurer la vitesse de rotation d'une éolienne. Pour cela, un aimant fixé sur l'une des pales de l'éolienne et un capteur à effet Hall fixé sur son pied sont utilisés.

Quel est le mesurande primaire et quel est le mesurande secondaire de ce dispositif ?

1. 1^{aire} : champ magnétique, 2^{aire} : vitesse de rotation de l'éolienne
2. 1^{aire} : tension électrique, 2^{aire} : vitesse de rotation de l'éolienne
3. 1^{aire} : champ magnétique, 2^{aire} : il n'y en a pas
4. 1^{aire} : vitesse de rotation de l'éolienne, 2^{aire} : champ magnétique

QCM (ER2 du 17 novembre 2016)

Soit un capteur à effet Hall donnant la valeur du champ magnétique B à partir de la mesure de la tension V_{mes} . Rappelons que $V_{mes} = R_H IB/z$ où R_H est la constante de Hall, I le courant injecté (par un générateur de courant de 100mA) dans le matériau et z l'épaisseur du matériau.

L'utilisateur souhaite diminuer l'énergie électrique consommée d'un facteur 4 en faisant passer le courant de 100 mA à une autre valeur. Quelle est la conséquence sur la sensibilité du capteur ? Elle va être

1. / 4
2. X 4
3. inchangée
4. / 2

QCM (ER2 du 12 novembre 2015)

Soit un capteur à effet Hall. Rappelons que le coefficient de Hall, R_H , relie le champ magnétique B à la tension mesurée V_{mes} ainsi :

$$V_{mes} = R_H I B / z$$

avec $R_H = 1/qN$ (la charge élémentaire $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, N la densité volumique de porteurs de charges libres), I le courant injecté dans le capteur, z l'épaisseur du matériau composant le capteur.

Afin d'avoir une bonne sensibilité, vous proposez

1. d'utiliser un semi-conducteur (par exemple GaAs) plutôt qu'un conducteur (par exemple Cu)
2. de diminuer le plus possible le courant injecté I
3. de diminuer le plus possible la charge électrique élémentaire
4. d'augmenter le plus possible l'épaisseur z

3. Capteurs d'éclairement

3. Capteurs d'éclairement

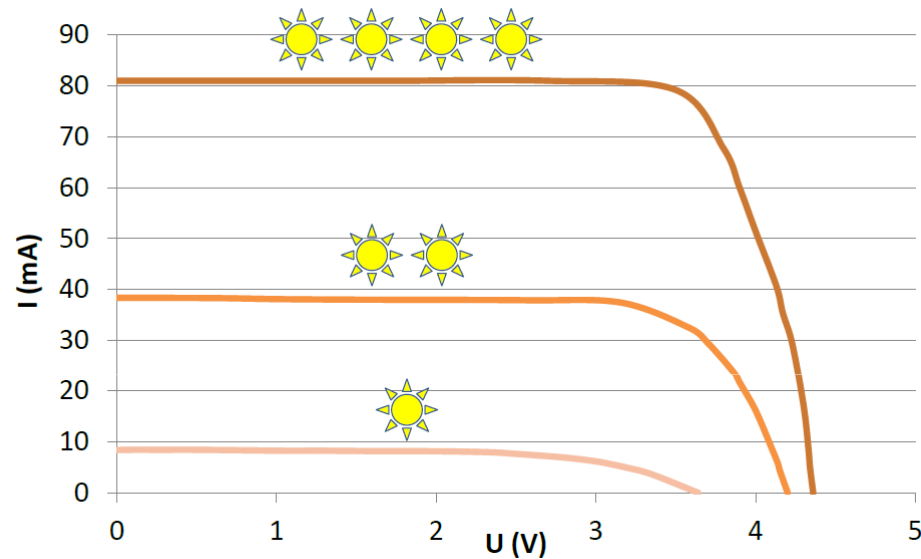
3.1 Effet photovoltaïque

3.2 Photorésistivité

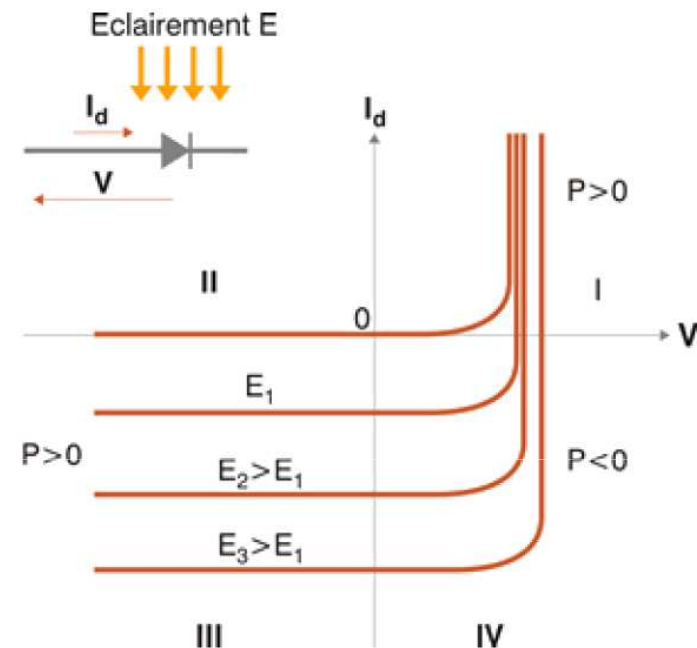
3.3 Autres applications (mesurande primaire \neq éclairement)

3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

Rappel du cours d'Annick Dégardin (partie énergie)



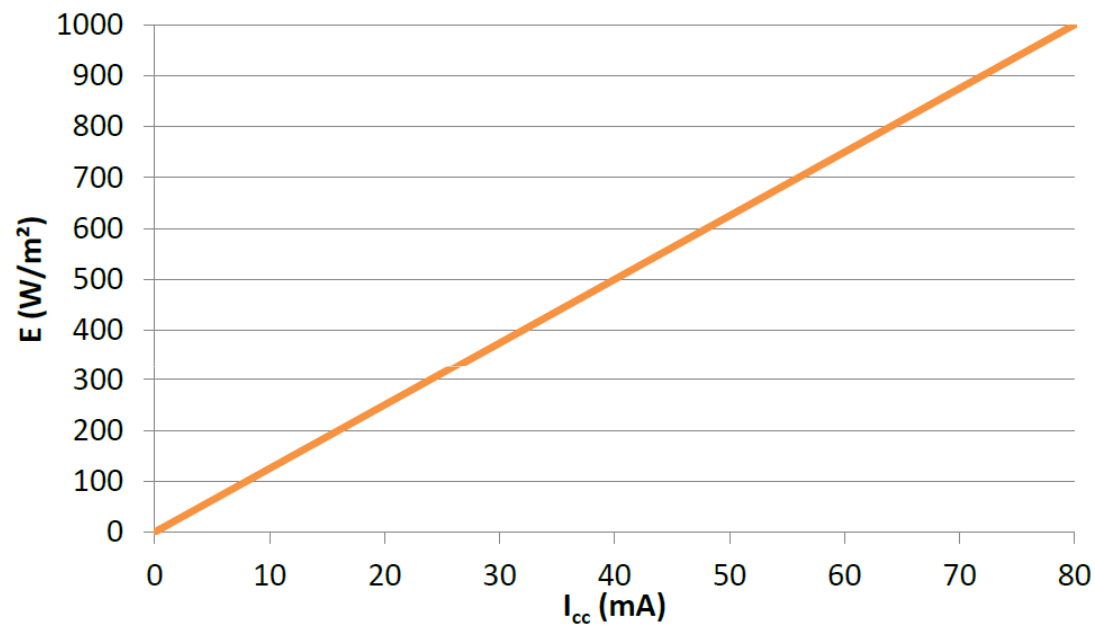
CONVENTION GENERATEUR



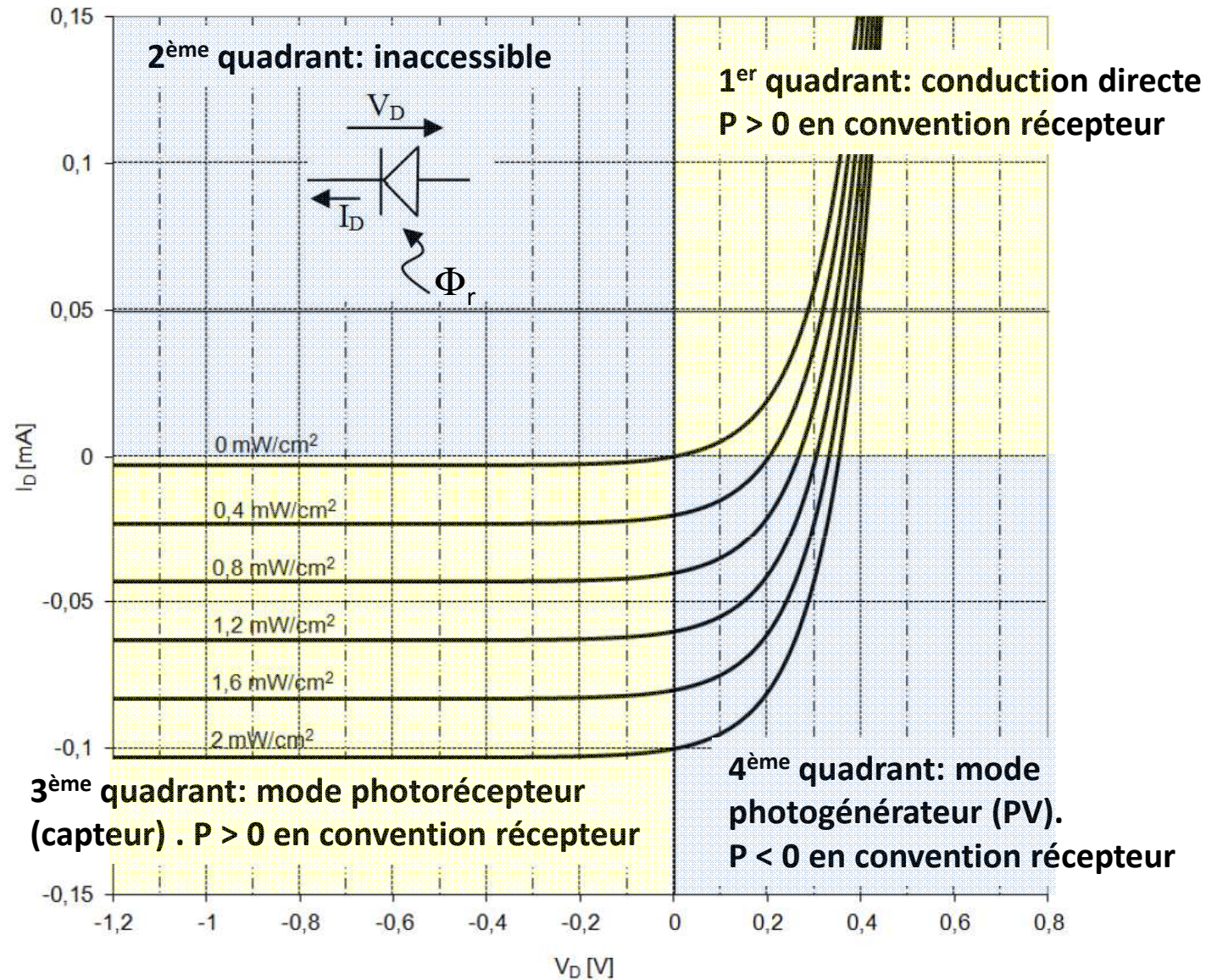
CONVENTION RECEPTEUR

3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

Rappel du cours d'Annick Dégardin (partie énergie)



3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque



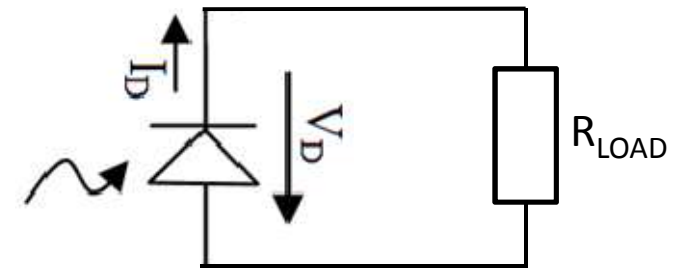
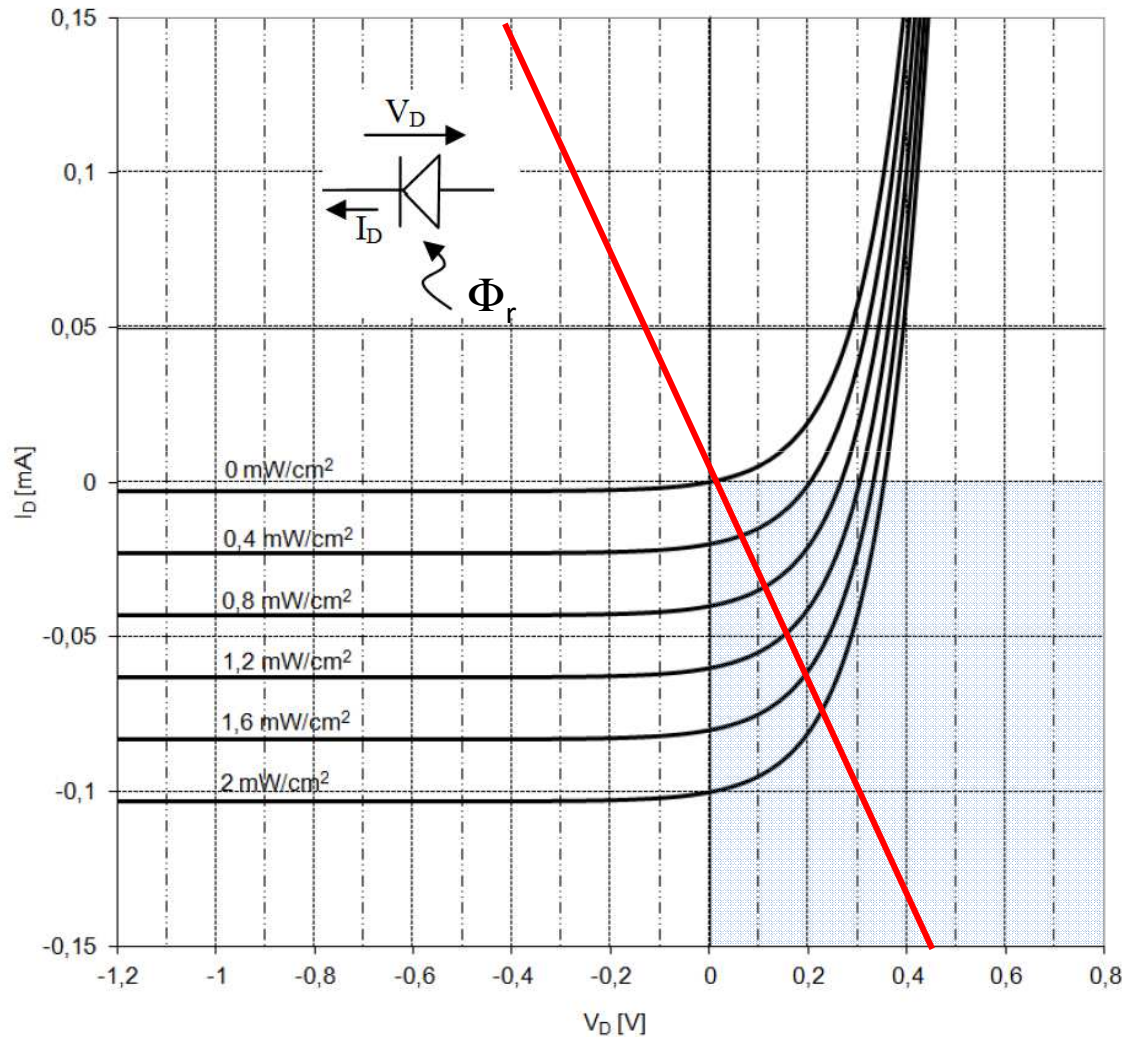
* 1 W/m² = 683 lux pour vert et 50 lux pour rouge ou bleu.

Φ_r = éclairement énergétique (eng.: irradiance, flux lumineux par unité de surface en W/m²).
 Eclairement lumineux (eng.: illuminance) en lux: sensation humaine de l'éclairement*.

3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

4^{ème} quadrant: panneaux solaires (rappel)

Evidemment pas de source externes, une résistance (TP1).



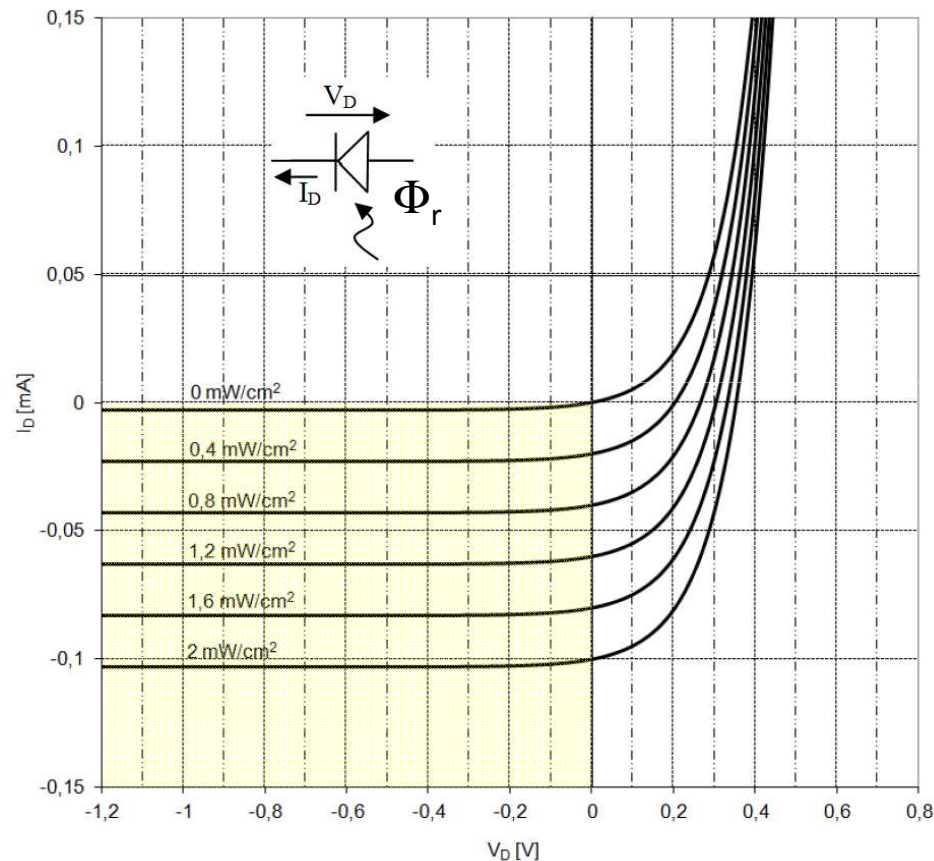
Pour un éclairement donné, le point de polarisation $(V_D, I_D) \in$ à la caractéristique $I_D(V_D)$ de la photodiode et à la droite de charge $I_D = -V_D / R_{LOAD}$ (en rouge sur la figure pour $R_{LOAD} = 3 \text{ k}\Omega$).

Si $R_{LOAD} = 0$: I_D est max. mais $V_D = 0$
 $\rightarrow P = 0$.

Si $R_{LOAD} \rightarrow \infty$: V_D est max. mais $I_D = 0$
 $\rightarrow P = 0$.

\Rightarrow Il existe un R_{LOAD} entre ces 2 extrêmes maximisant la puissance P .

Quel est le meilleur schéma équivalent de la photodiode dans le 3^{ème} quadrant :



1. géné de courant
2. géné de tension
3. résistance
4. court-circuit (interrupteur fermé)

QCM (ER2 du 17 novembre 2016)

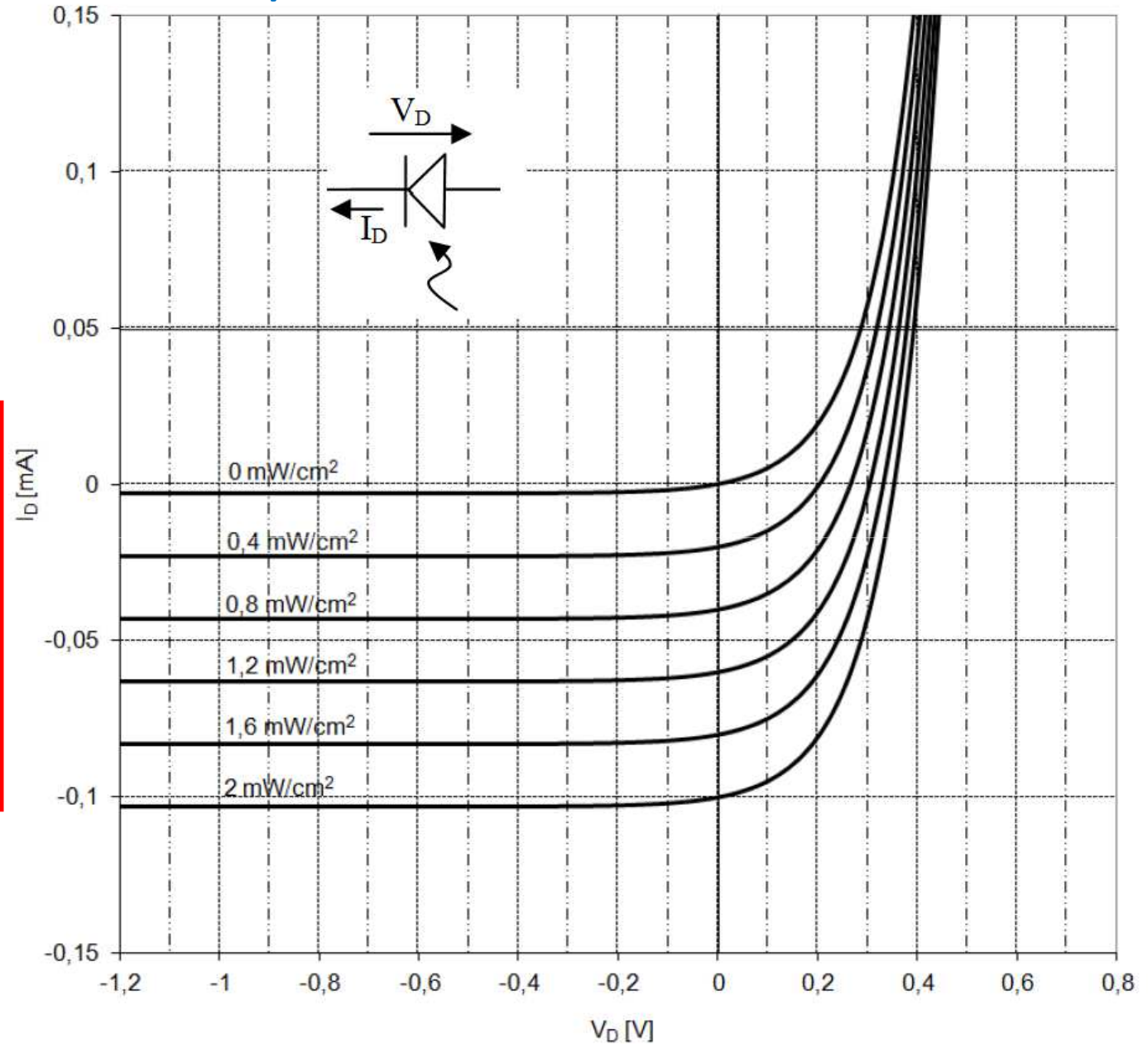
Dans le 3^{ème} quadrant, quelle équation lie le mieux I_D en mA et ϕ_r en mW/cm^2 ?

1. $I_D = -0,05[\text{cm}^2/\text{V}]\phi_r$

2. $I_D = -2[\text{cm}^2/\text{V}]\phi_r$

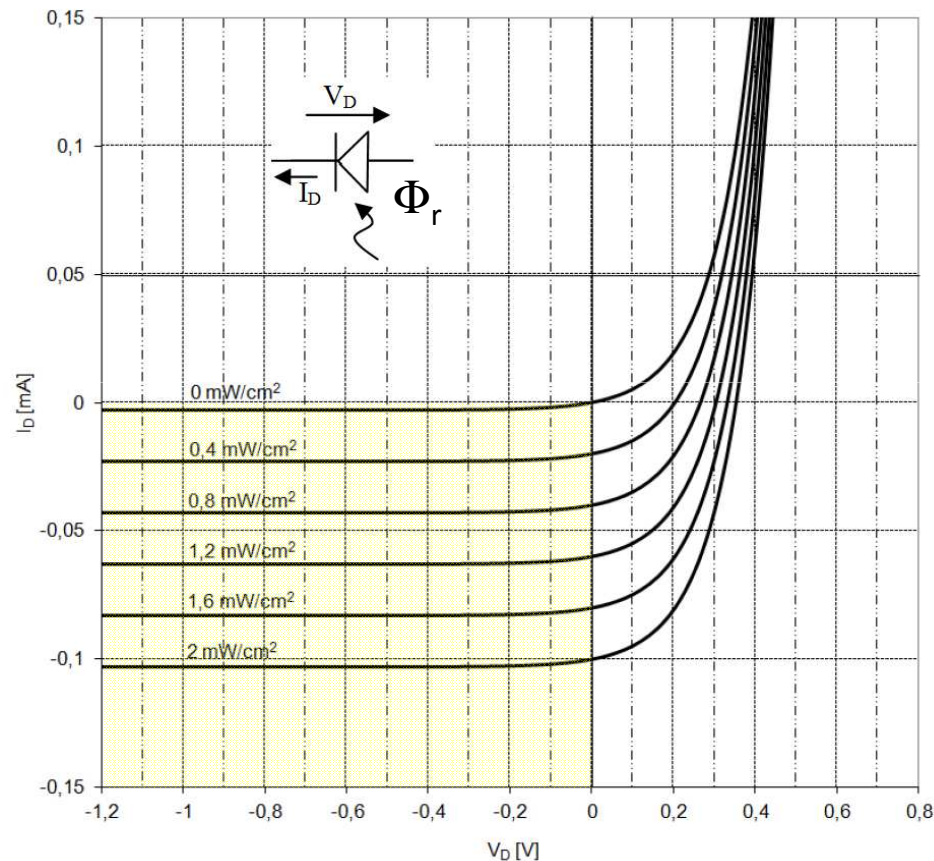
3. $I_D = -20[\text{cm}^2/\text{V}]\phi_r$

4. $I_D = -0,2[\text{cm}^2/\text{V}]\phi_r$

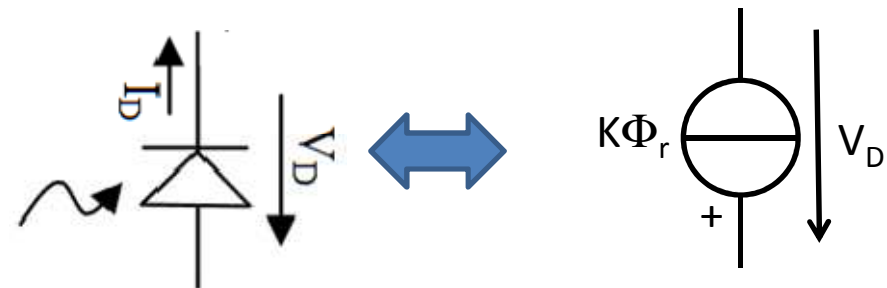


3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

Schémas équivalents de la photodiode dans le 3^{ème} quadrant:



* En 1^{ère} approximation: générateur de courant parfait dont le courant est proportionnel à l'éclairement.

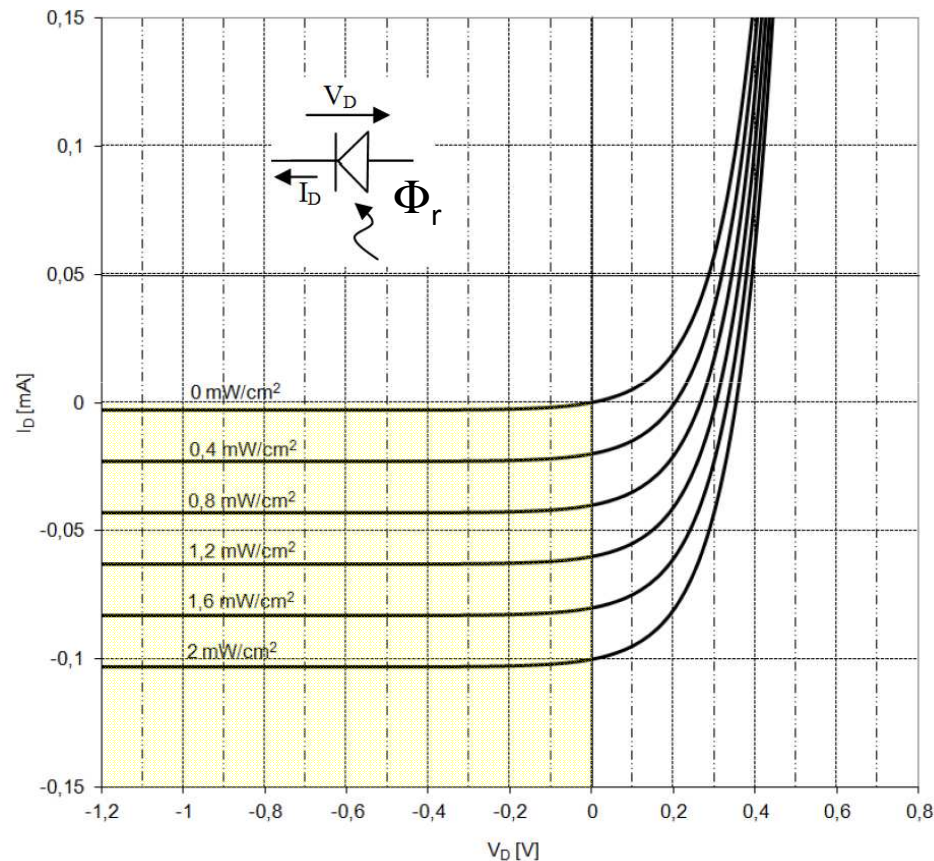


avec K en $\text{Am}^2/\text{W} = \text{m}^2/\text{V}$

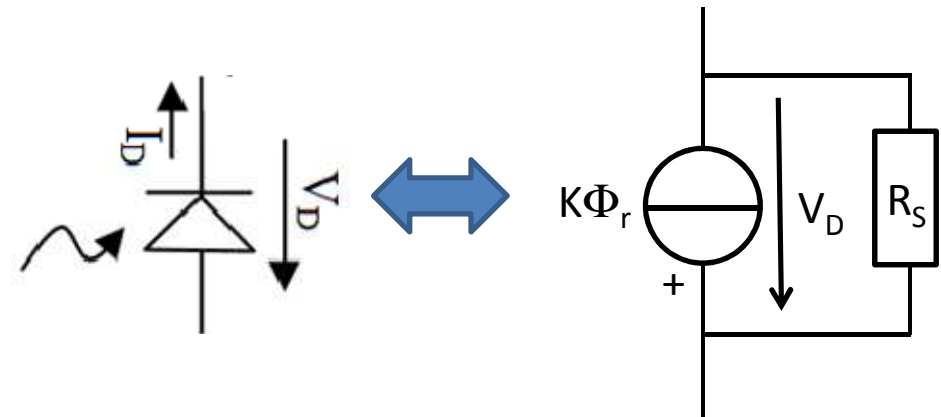
Que vaut K pour cette photodiode?

3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

Schémas équivalents de la photodiode dans le 3^{ème} quadrant:



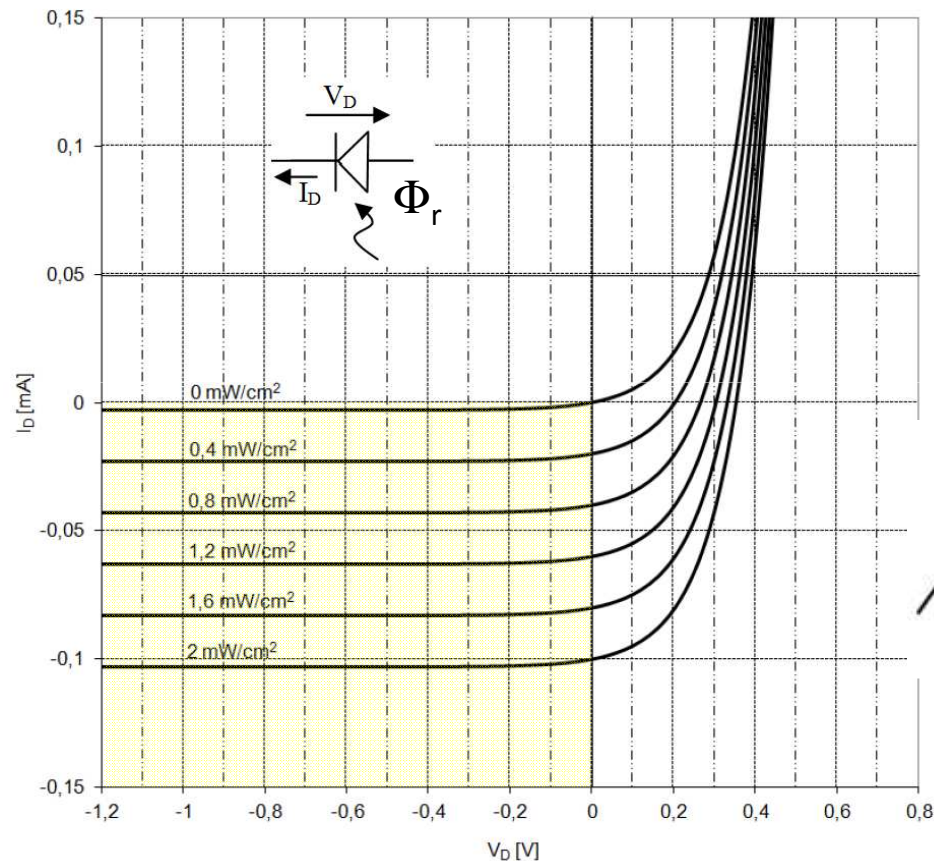
* Plus réaliste: générateur de courant réel dont le courant est proportionnel à l'éclairement.



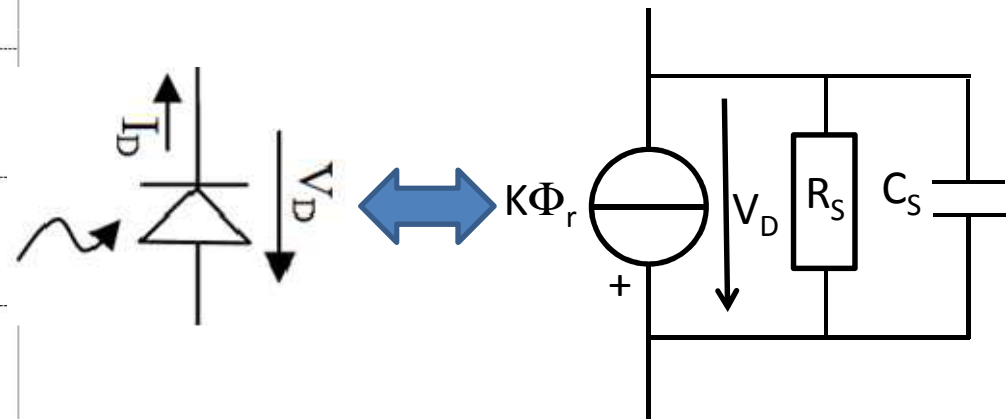
avec K en $\text{Am}^2/\text{W} = \text{m}^2/\text{V}$

3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

Schémas équivalents de la photodiode dans le 3^{ème} quadrant:



* Encore plus réaliste: générateur de courant réel dont le courant est proportionnel à l'éclairement avec en // un condensateur (conséquences: cf. amphi. et TD opacimètre).

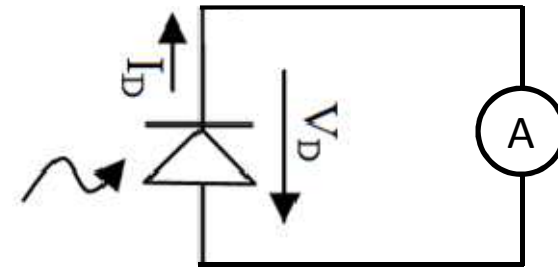
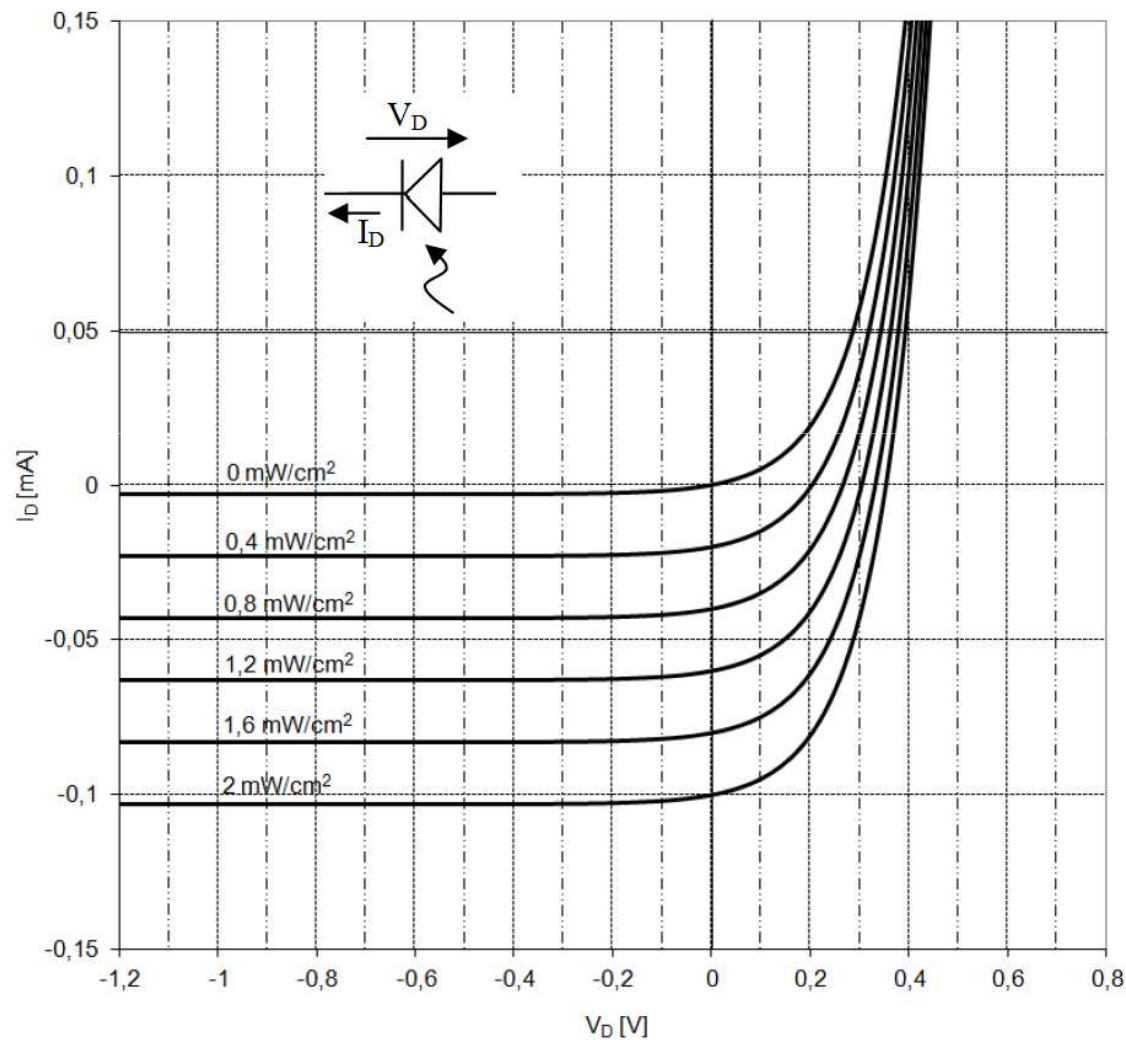


avec K en $\text{Am}^2/\text{W} = \text{m}^2/\text{V}$

3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

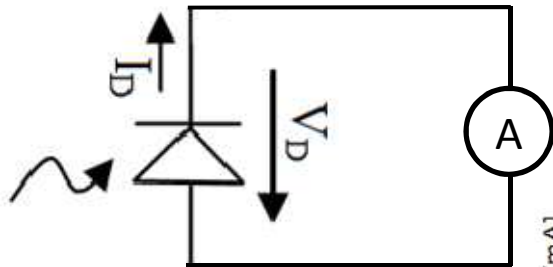
Polarisation:

1^{ère} façon pour se placer dans le 3^{ème} quadrant: pas de source externes, pas de résistance, un ampèremètre.



QCM

L'ampèremètre est parfait.
La droite de charge du circuit ci-dessous est la

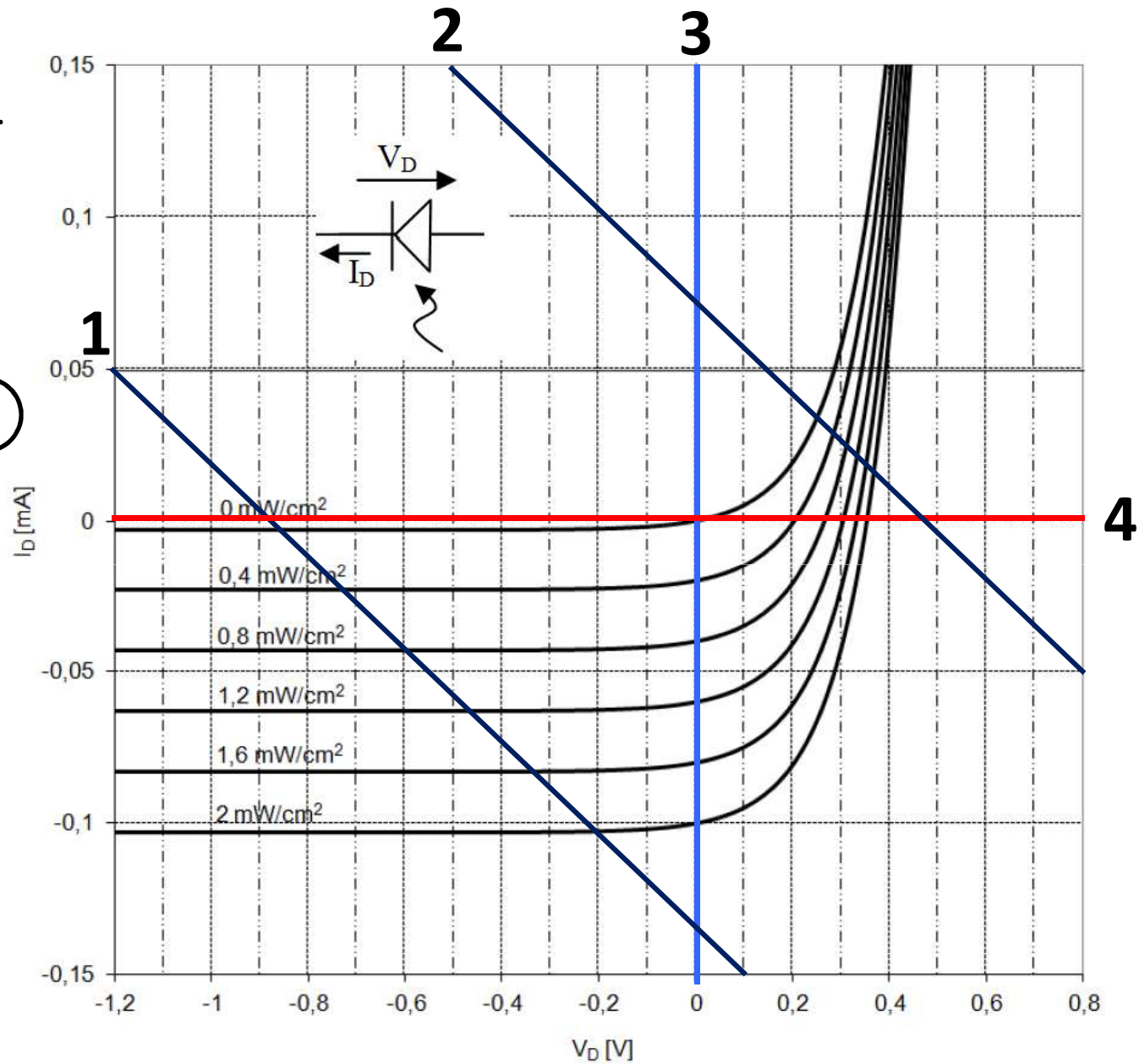


1. 1

2. 2

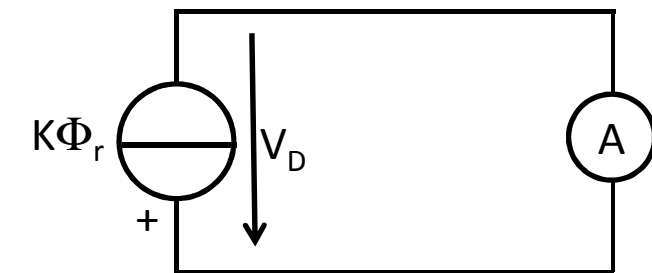
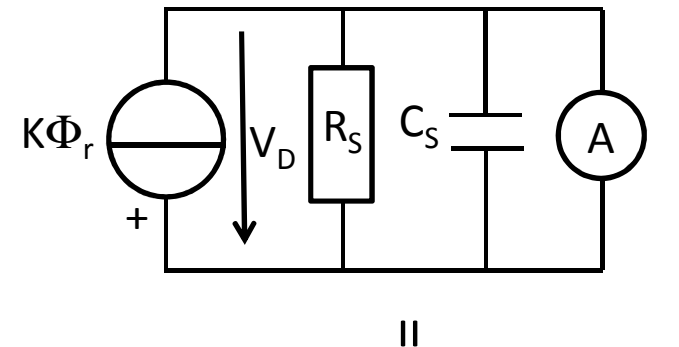
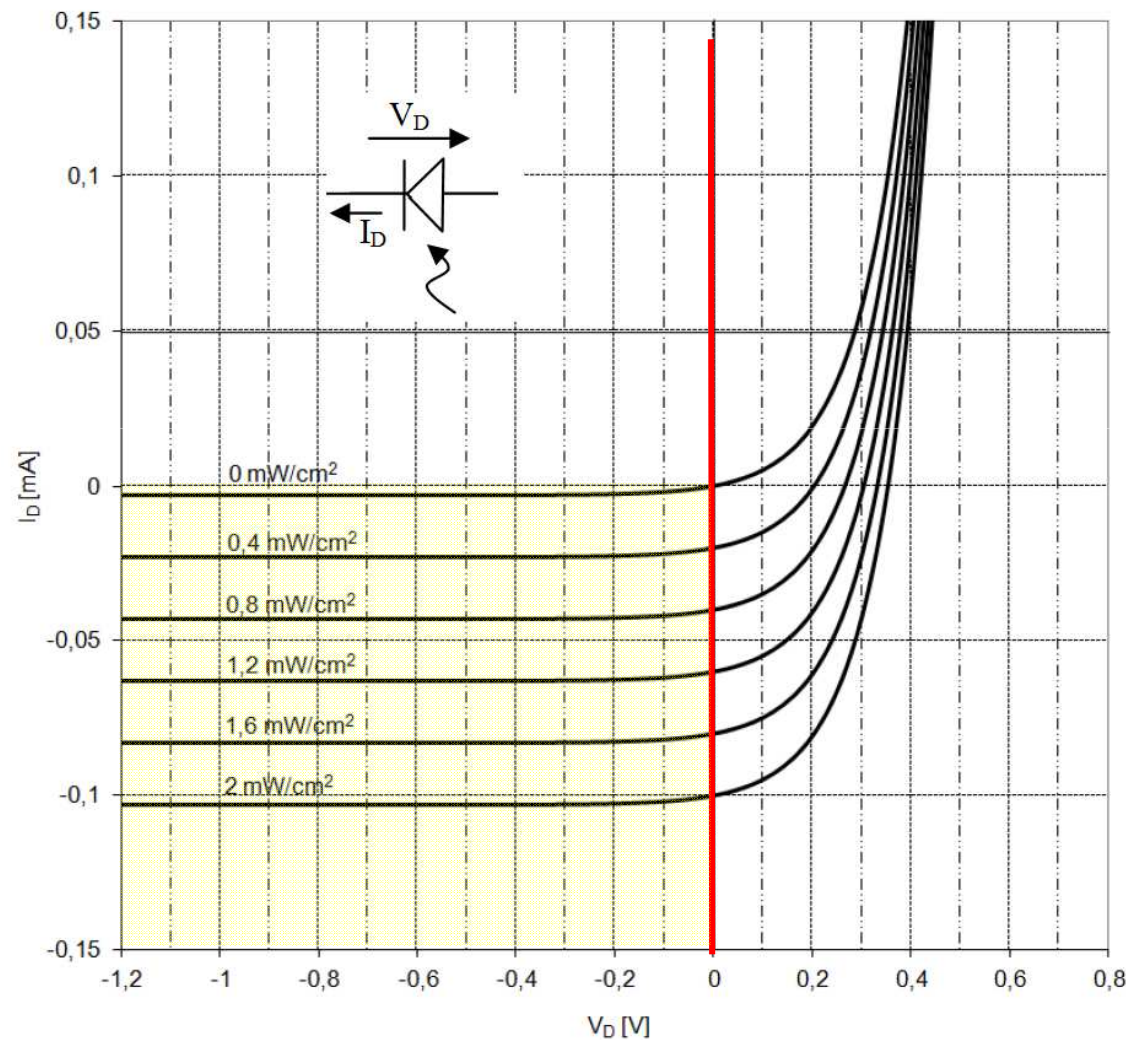
3. 3

4. 4



Polarisation:

1^{ère} façon pour se placer dans le 3^{ème} quadrant: pas de source externe, pas de résistance, un ampèremètre.



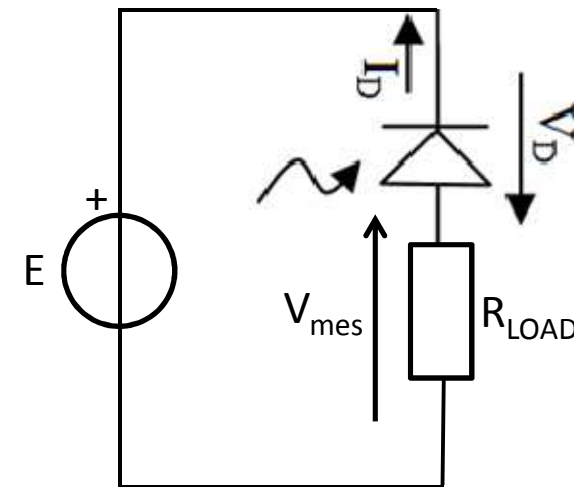
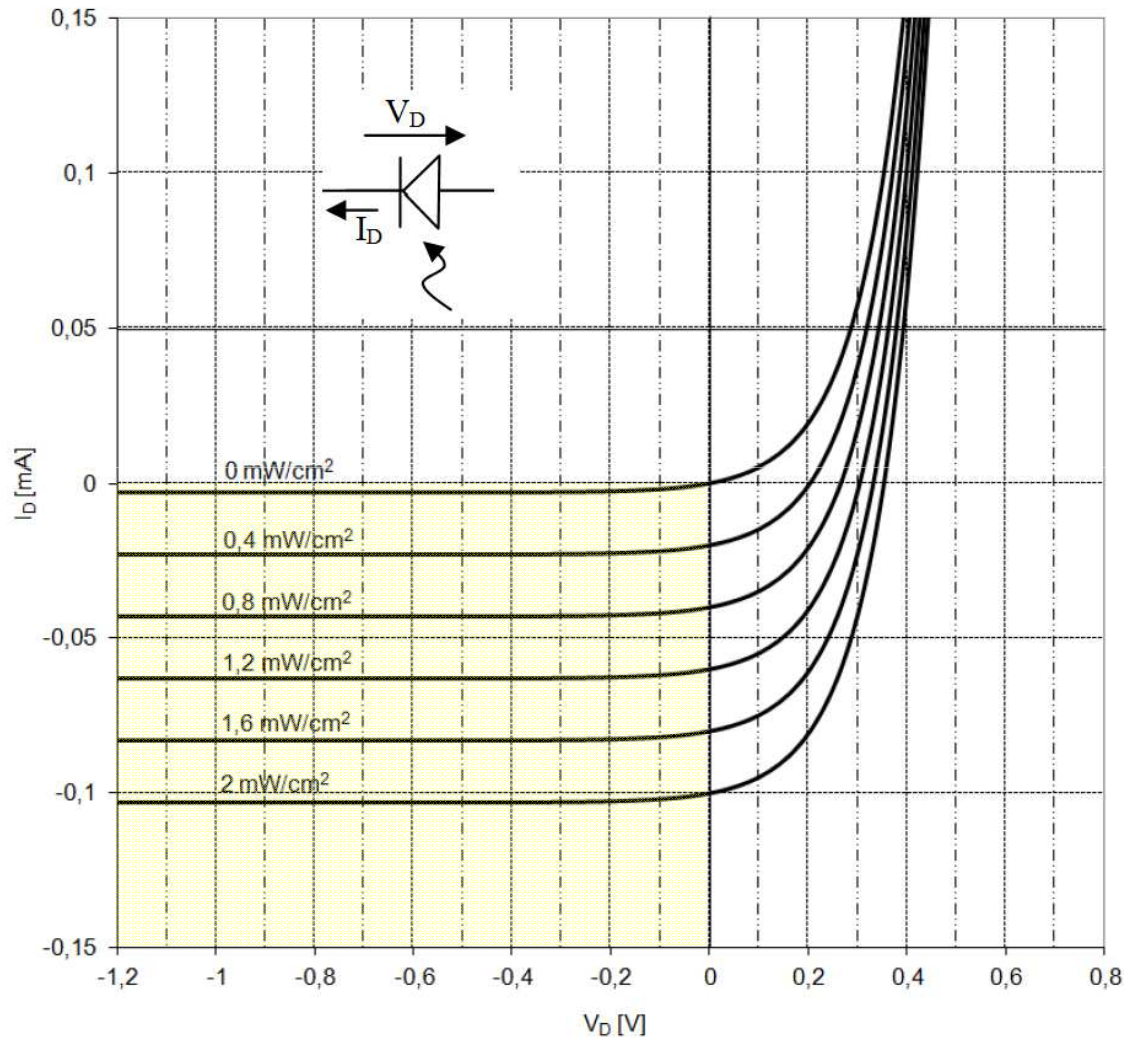
Ici $V_D = 0$ (l'ampèremètre est supposé parfait: résistance interne nulle).
La mesure de $-I_D = K\Phi_r$ donne l'éclairement.

Inconvénient:

3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

Polarisation:

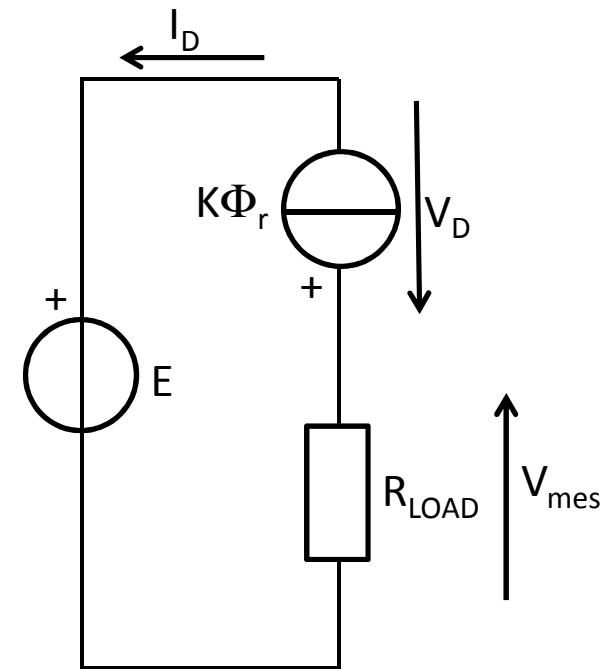
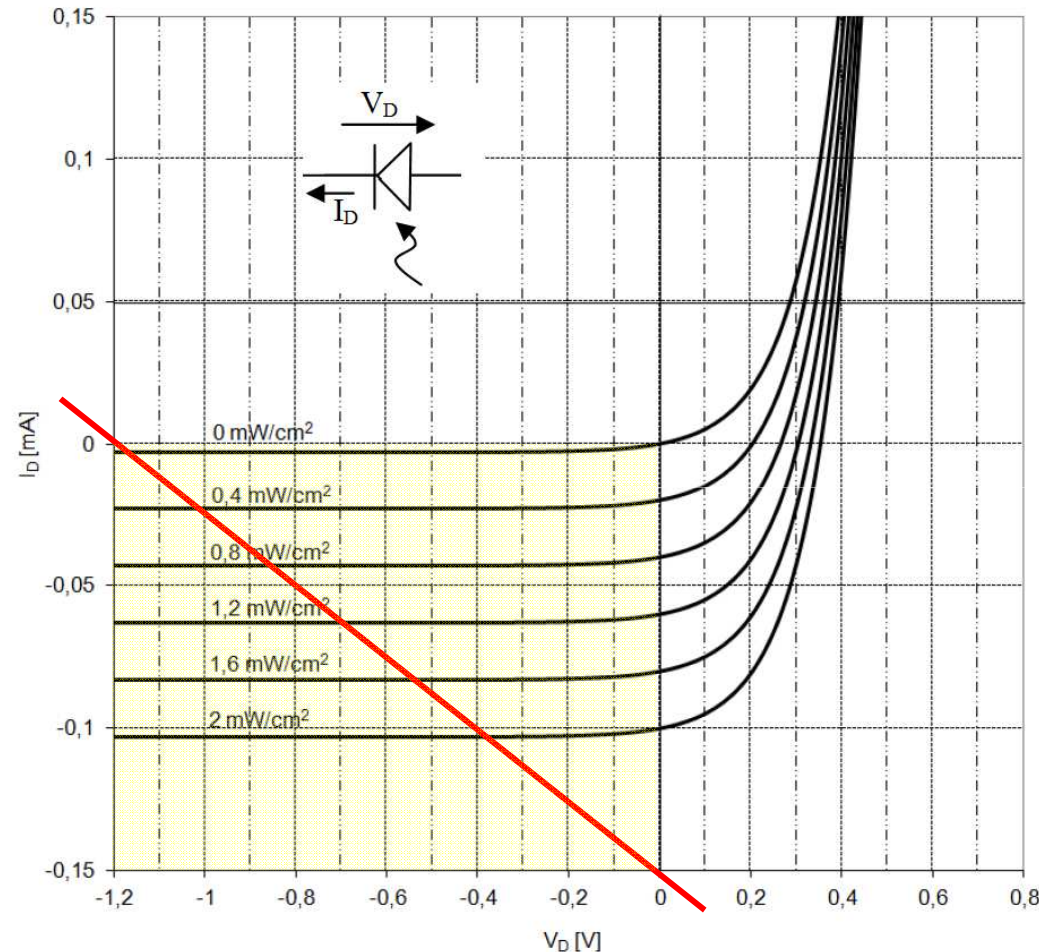
2^{ème} façon pour se placer dans le 3^{ème} quadrant: une source externe, une résistance.



3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

Polarisation:

2^{ème} façon pour se placer dans le 3^{ème} quadrant: une source externe, une résistance.



Pour un éclairement donné, le point de polarisation (V_D , I_D) ∈ à la caractéristique $I_D(V_D)$ de la photodiode et à la droite de charge $I_D = -(E + V_D)/R_{LOAD}$ (en rouge sur la figure pour $E = 1,2$ V et $R_{LOAD} = 8$ k Ω et R_s suffisamment grande pour être négligée).

3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

Polarisation:

2^{ème} façon pour se placer dans le 3^{ème} quadrant: une source externe, une résistance.

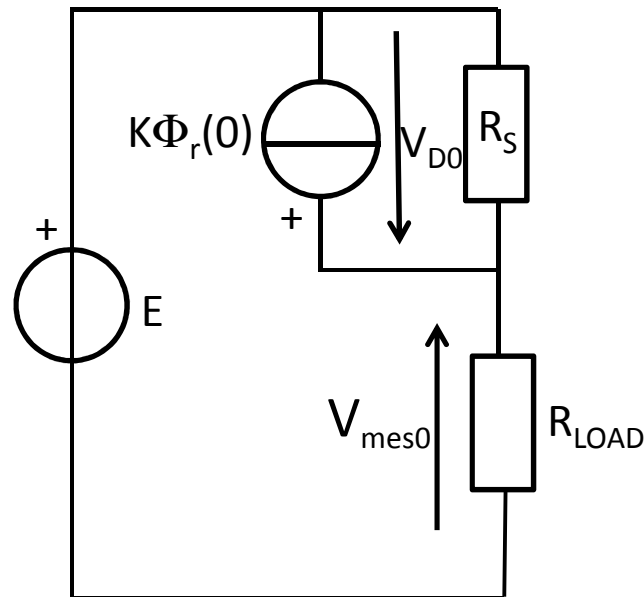
Si le flux lumineux a une composante continue $\Phi_r(0)$ (exemple: le soleil) + une composante sinusoïdale $\Phi_r(\omega)$ (exemple: les néons, une LED clignotante): on applique le principe de superposition au schéma du transparent 63 (cette fois on tient compte de C_s , et au moins dans un 1^{er} temps de R_s).

3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

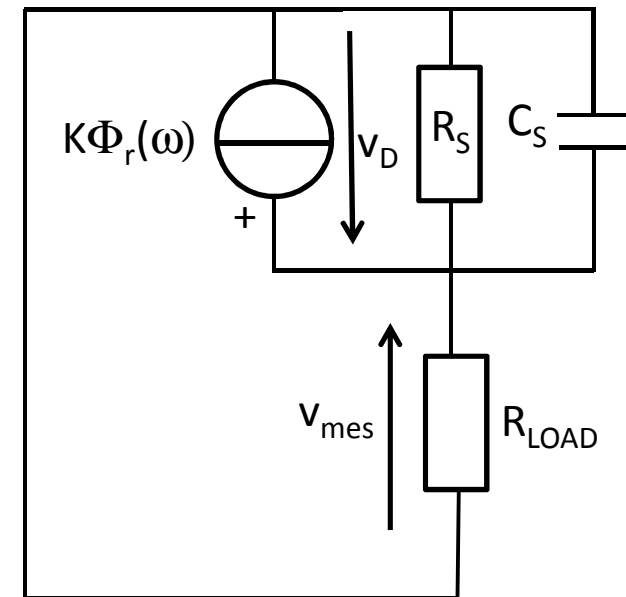
Polarisation:

2^{ème} façon pour se placer dans le 3^{ème} quadrant: une source externe, une résistance.

En continu:



En sinusoïdal:



$$V_{mes} = V_{mes0} + v_{mes}$$

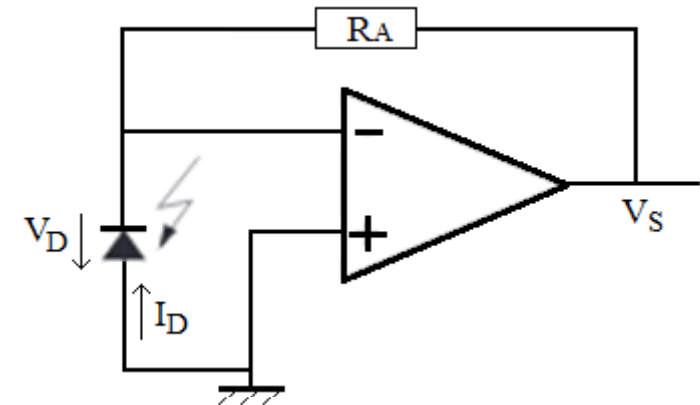
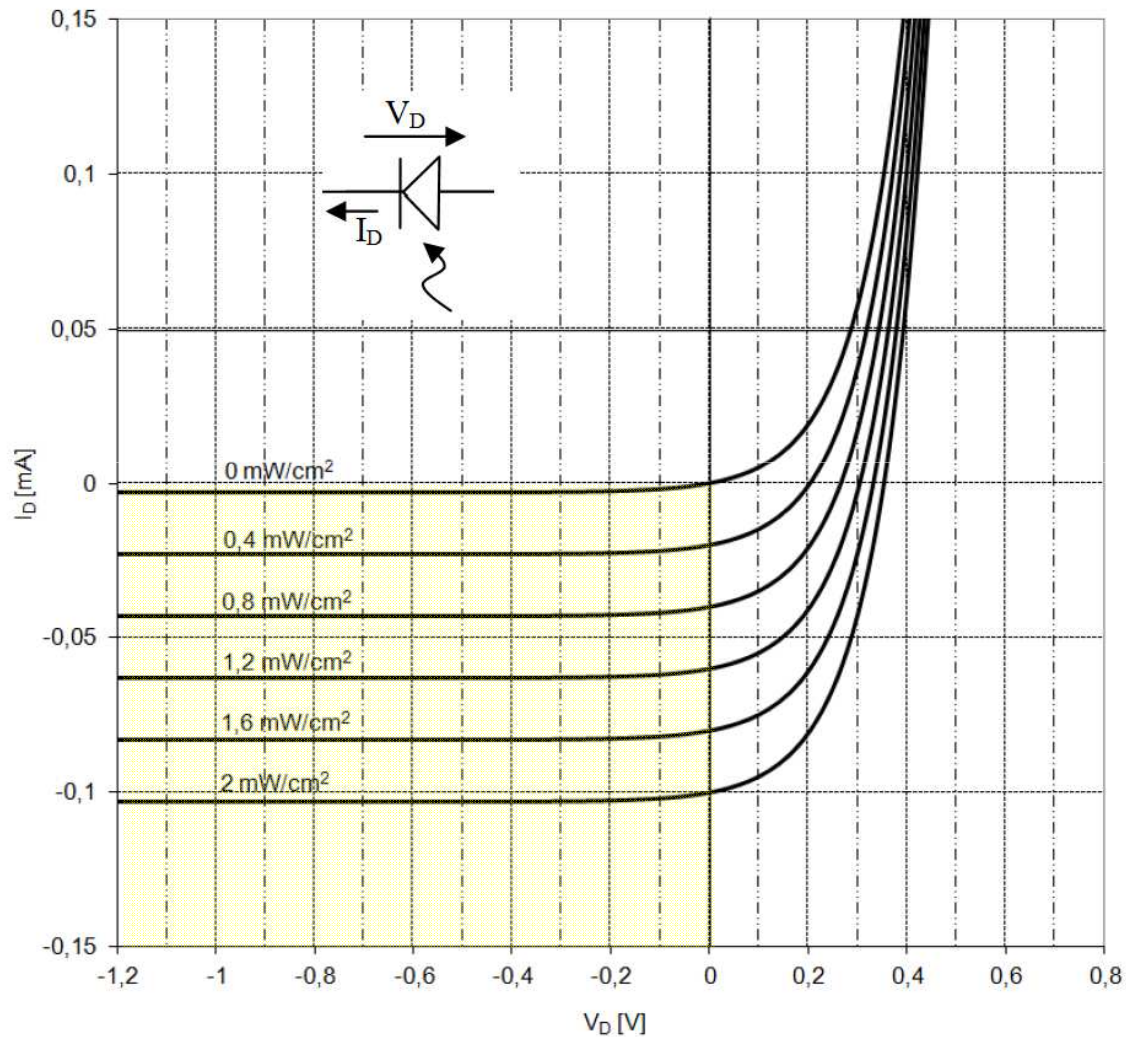
Exercices (pour préparer le TD opacimètre):

- en régime permanent continu, exprimez V_{mes0} en fonction de $\Phi_r(0)$, K , E , R_{LOAD} et R_S .
- en régime sinusoïdale permanent, exprimez v_{mes} en fonction de $\Phi_r(\omega)$, K , R_{LOAD} , C_S et R_S .

3.1. Capteurs d'éclairement – Effet photovoltaïque

Polarisation:

3^{ème} façon pour se placer dans le 3^{ème} quadrant: convertisseur courant-tension.



Dessinez la droite de charge.

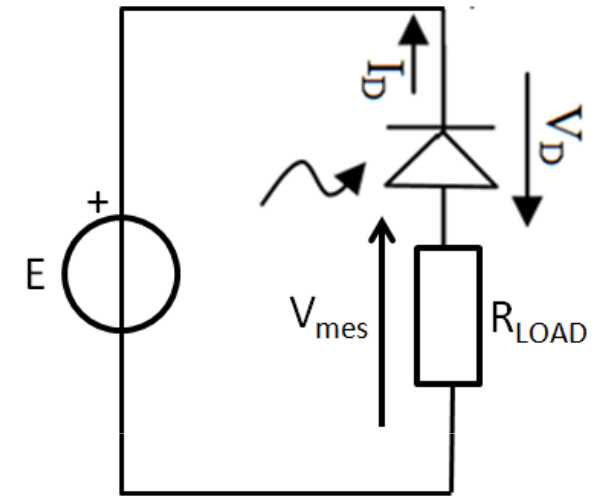
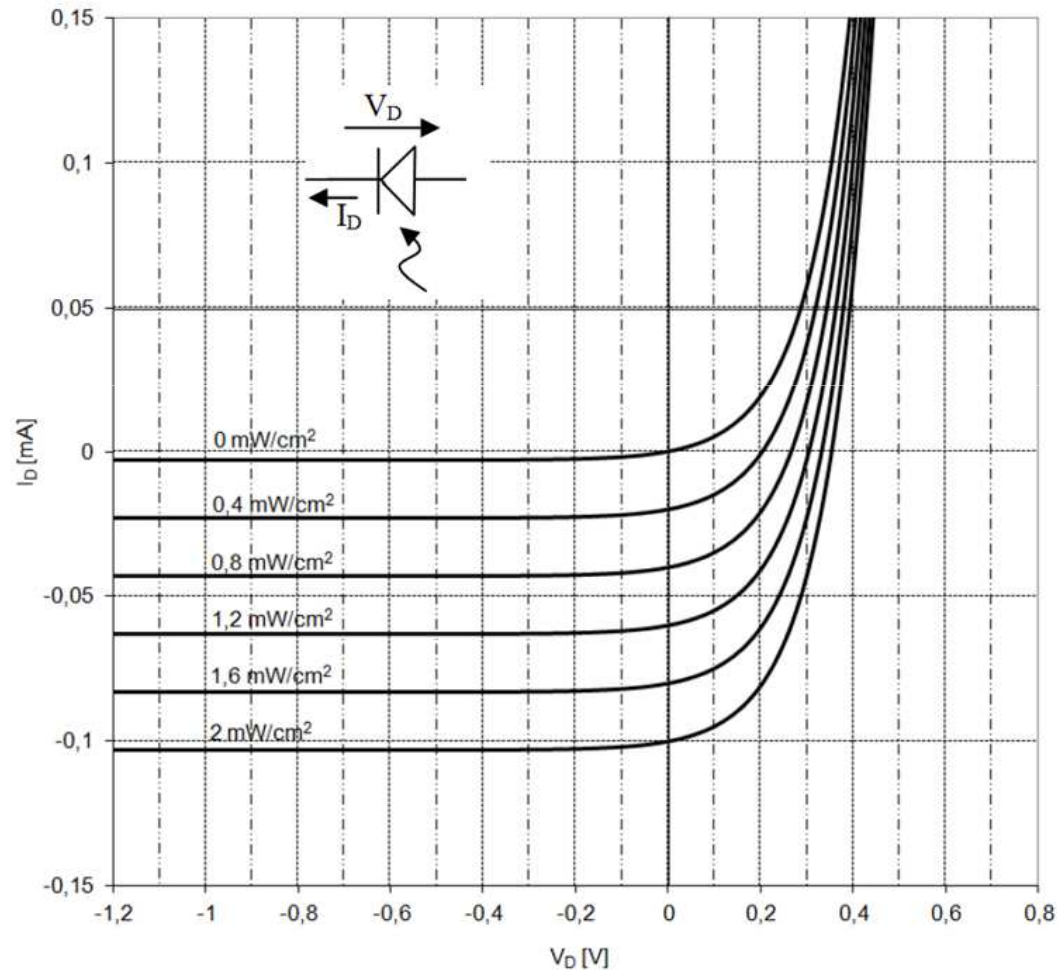
Où est le point de polarisation pour un éclairement donné?

V_S en fonction de Φ_r ?

Avantages?

QCM (ER2 du 12 novembre 2015)

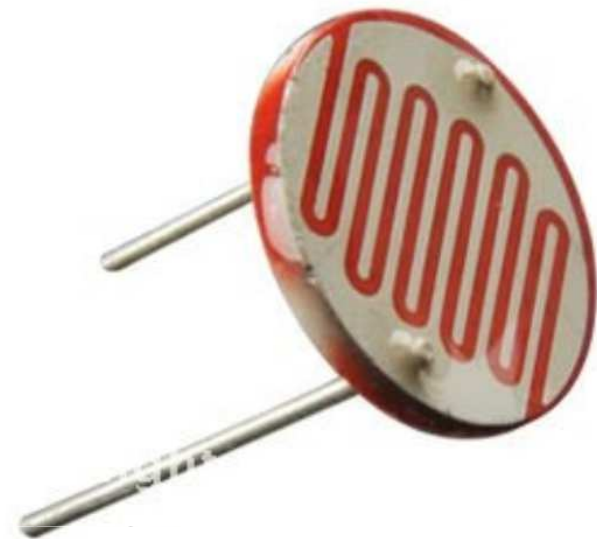
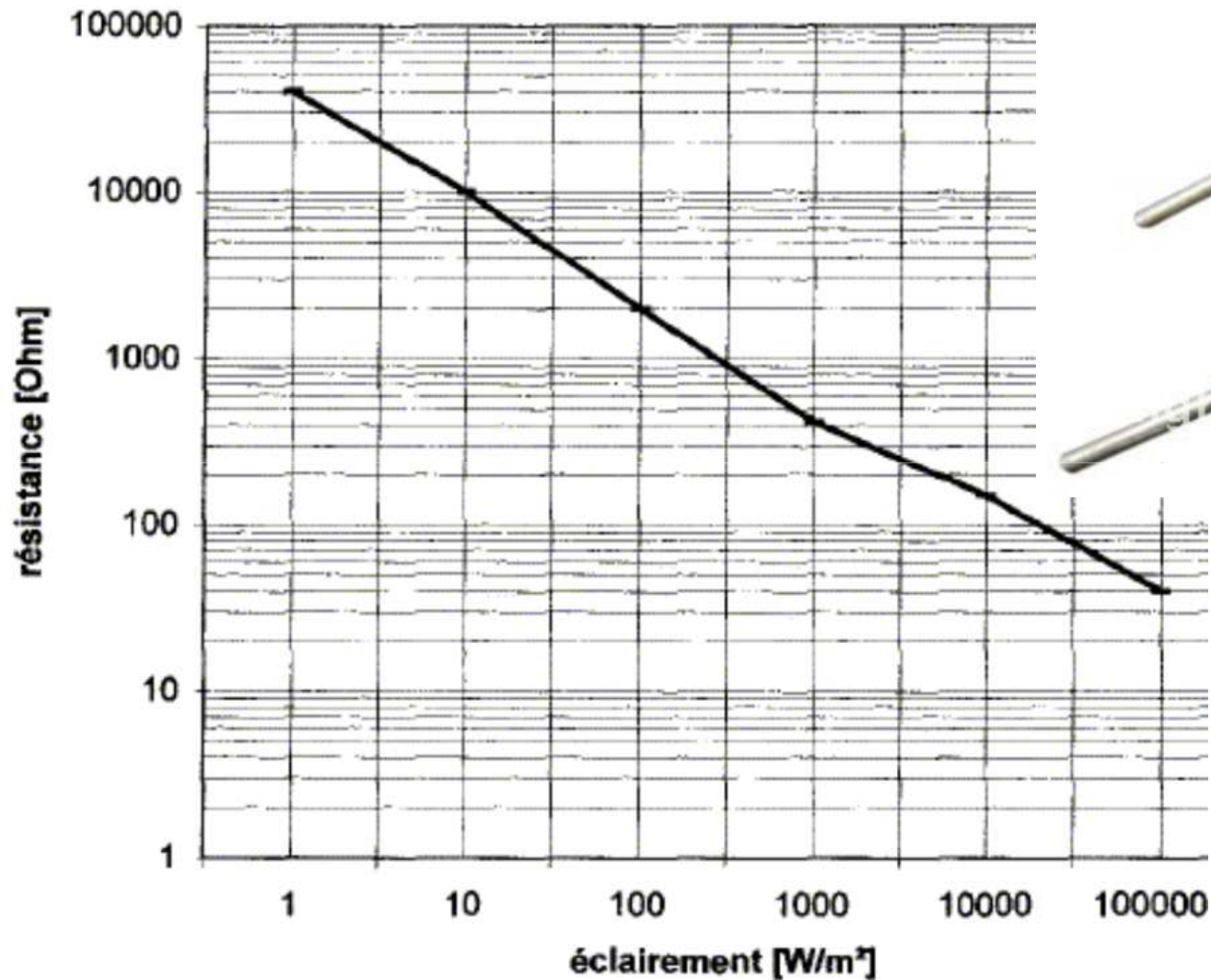
La caractéristique d'une photodiode est donnée sur la figure ci-dessous pour différents éclairements. Cette photodiode est placée dans le circuit ci-dessous où $E = 1,2 \text{ V}$ et $R_{\text{LOAD}} = 8 \text{ k}\Omega$. Que vaut approximativement ϕ_r pour $V_{\text{mes}} = 0,8 \text{ V}$?



1. $\phi_r \approx 2 \text{ mW/cm}^2$
2. $\phi_r \approx 1,2 \text{ mW/cm}^2$
3. $\phi_r \approx 1,6 \text{ mW/cm}^2$
4. $\phi_r \approx 0,8 \text{ mW/cm}^2$

3.2. Capteurs d'éclairement – Photoconductivité

Type de matériau: semi-conducteur.



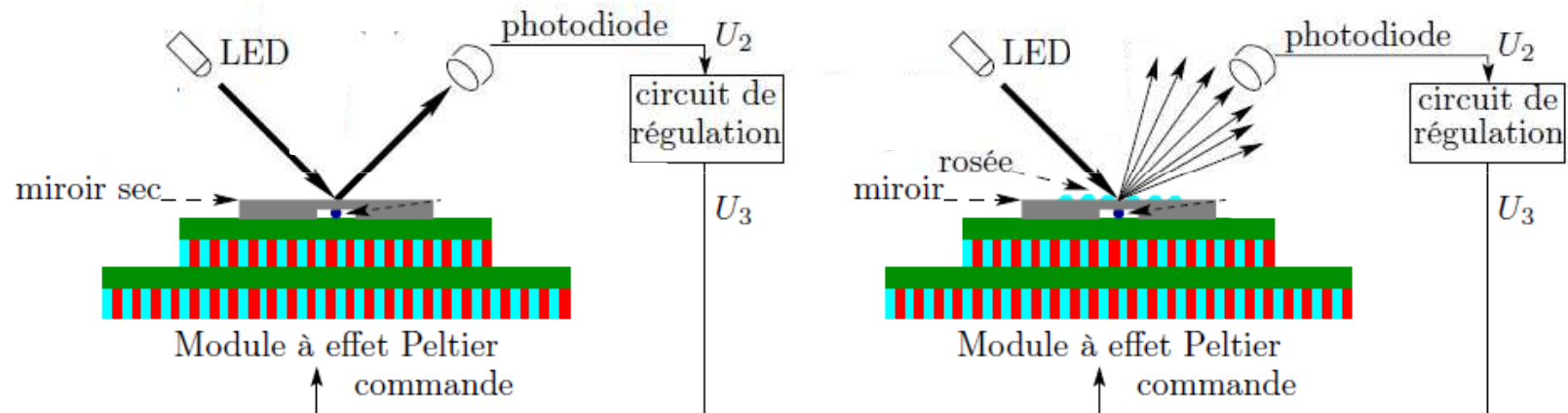
Exercice: trouver la relation entre R et E.

Point faible: rapidité \ll à photodiode

3.3. Capteurs d'éclairement – Autres applications

Mesure de la vitesse de rotation
Cf. TP Eolien

Détecteur de condensation



© J. Lefrère

3.3. Capteurs d'éclairement – Autres applications

Détecteur de fumée.

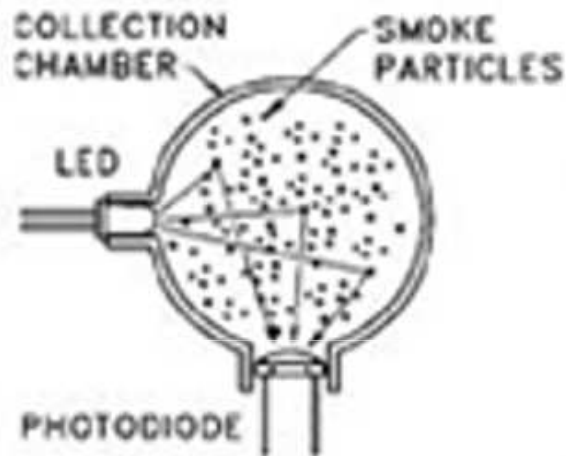


Fig. 2a

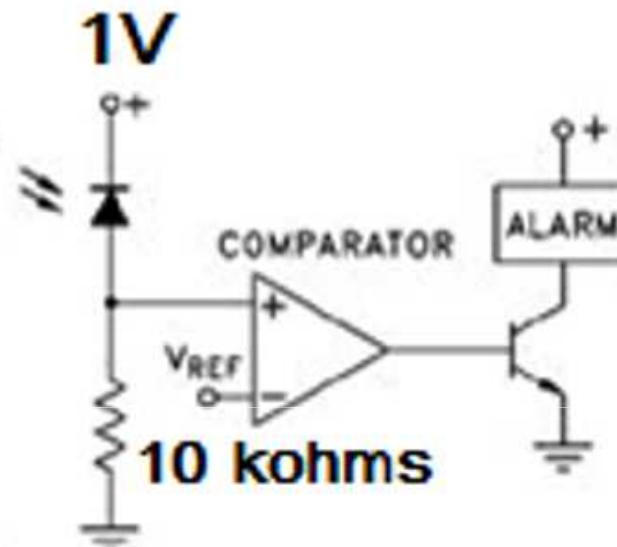


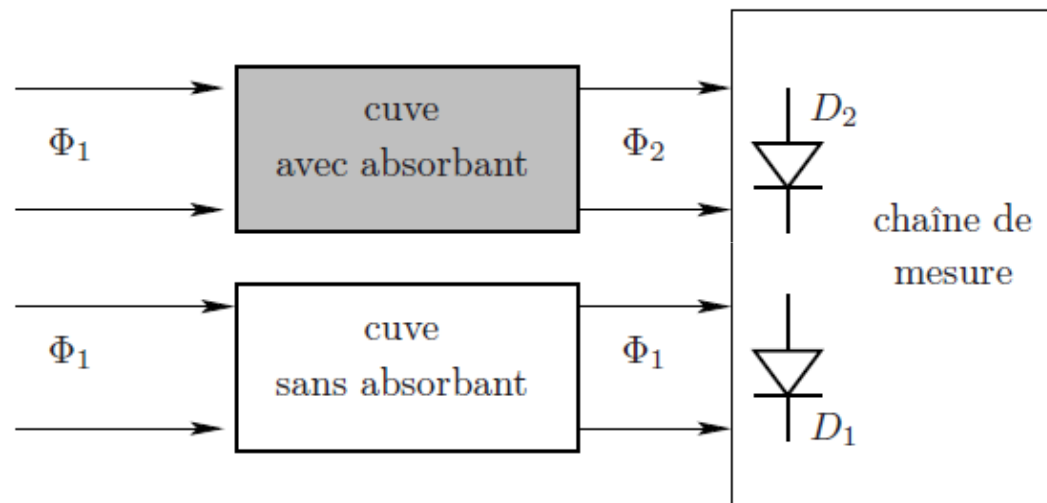
Fig. 2b

Smoke Detector

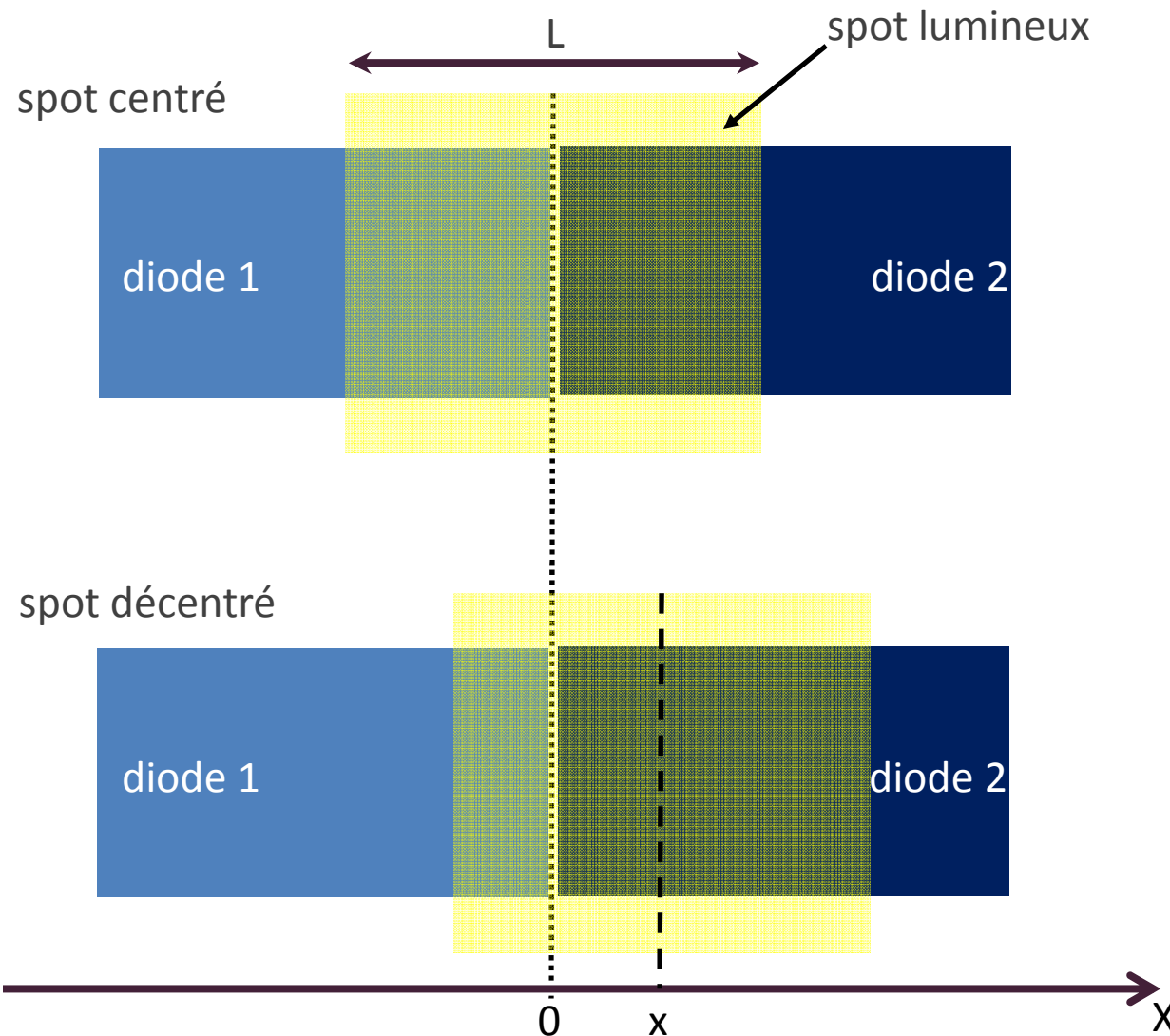
© Excelitas Tech.

3.3. Capteurs d'éclairement – Autres applications

Caractérisation d'un milieu : détecteur de fumée, de vapeur d'eau, éthylotest.



Mesurande primaire: la position d'un spot lumineux (1 dimension)



La photodiode 1 est polarisée de façon que I_1 soit égal à

K

x par l'éclairement du spot (W/m^2)

x par la surface éclairée

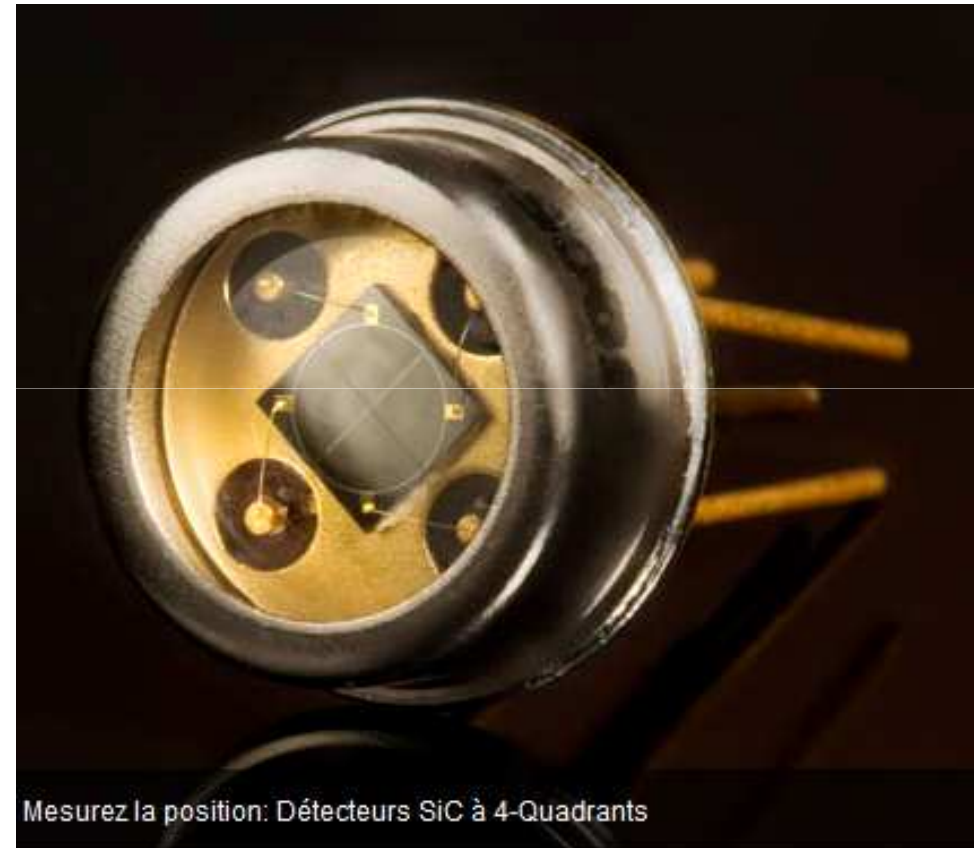
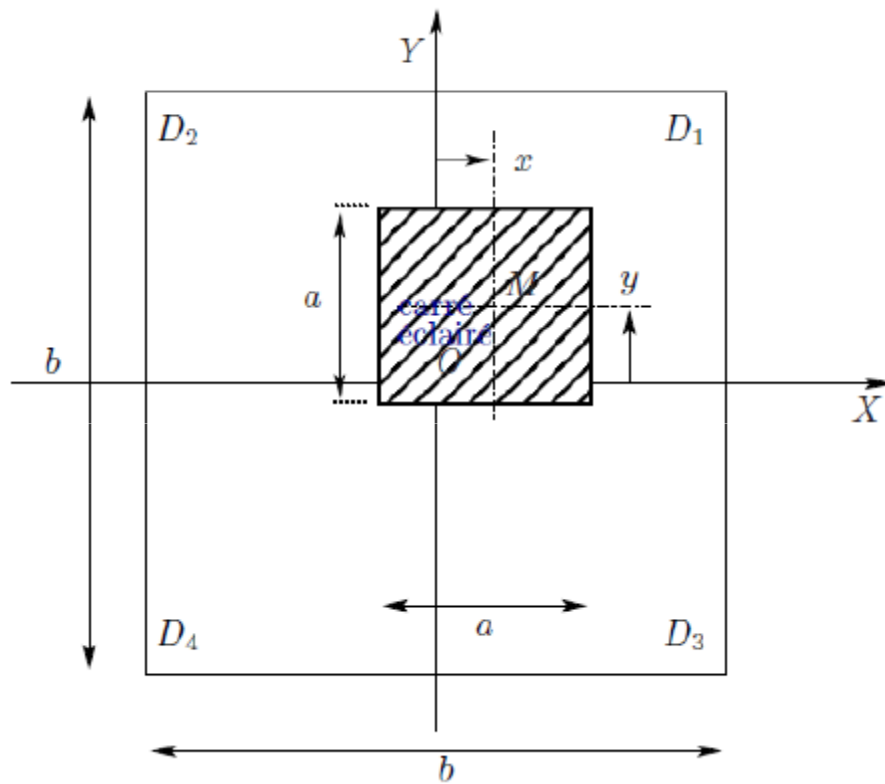
/ par la surface de la photodiode 1

Idem pour la photodiode 2.

On sait mesurer $I_1 + I_2 = I_0$ et $I_1 - I_2$.

Exprimez x en fonction de I_0 , $I_2 - I_1$ et L pour $-L/2 < x < L/2$.

Mesurande primaire: la position d'un spot lumineux (2 dimensions)



Mesurez la position: Détecteurs SiC à 4-Quadrants

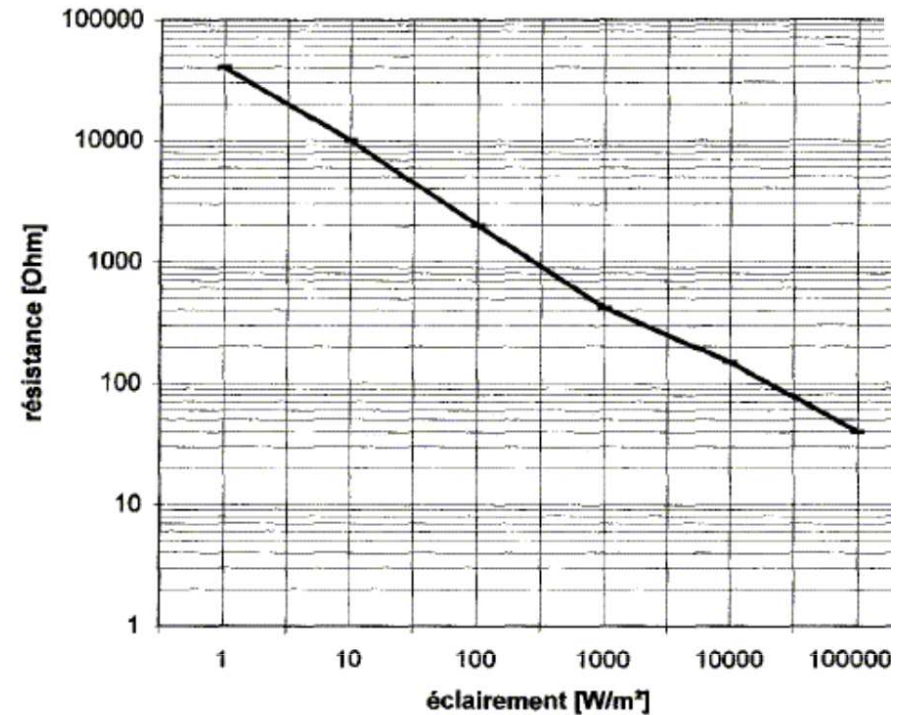
© lasercomponents

QCM

Les photodiodes et les photorésistances sont respectivement des capteurs

1. actif et passif
2. passif et actif
3. actif et actif
4. ça dépend

Quelle proposition est correcte?

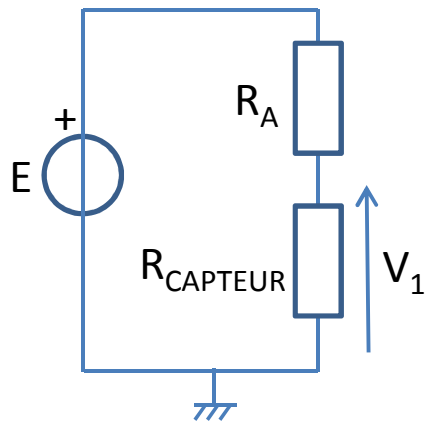


1. capteur linéaire et la T° est une grandeur d'influence
2. capteur non linéaire et la sensibilité s'exprime en m^2ohm/W
3. sensibilité indépendante de l'éclairement et étendue de mesure [$1 W/m^2$; $100000 W/m^2$]
4. capteur linéaire et la sensibilité s'exprime en $W/(m^2ohm)$

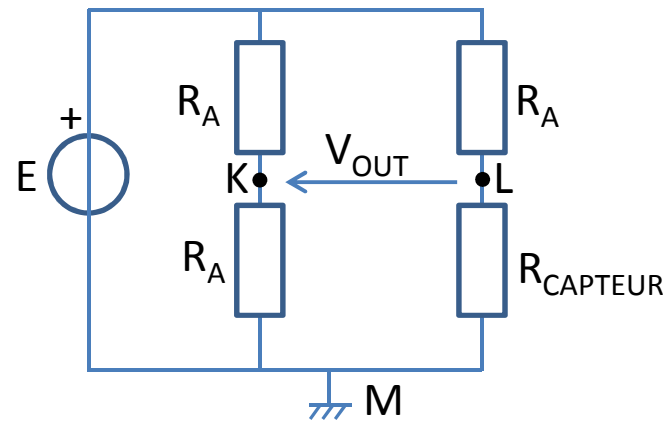
Pont diviseur de tension versus pont de Wheatstone (quart de pont)

Comparaison vis-à-vis de:

- la sensibilité,
- l'immunité au bruit s'ajoutant à la source parfaite E .



Pont diviseur



Pont de W. (quart de pont)

Mesurande: T° , champ magnétique, éclaircissement, etc.

Capteur résistif: $R_{\text{CAPTEUR}} = R_0 + \Delta R$ où ΔR dépend du mesurande (et donc potentiellement du temps) et où R_0 est une constante.

Pont diviseur de tension versus pont de Wheatstone (quart de pont)

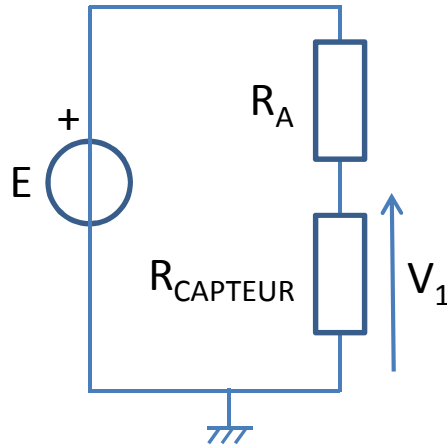
- Choix de R_A : On montre que fixer $R_A = R_0$ est le meilleur choix pour avoir la meilleure sensibilité autour de R_0 ($\Delta R \ll R_0$). Quelle est la sensibilité $dV_{\text{mesurée}}/dm$ pour dR_{CAPTEUR}/dm connu (m : le mesurande)?

Pont diviseur de tension versus pont de Wheatstone (quart de pont)

- Pour $R_A = R_0$, on montre que les erreurs engendrées par un bruit sur l'alimentation E ($E = E_0 + \Delta E(t)$ où $\Delta E(t)$ est aléatoire et E_0 une constante) sont bien plus faibles avec le pont de W. qu'avec le pont diviseur (cas traité: $\Delta R \ll R_0$).

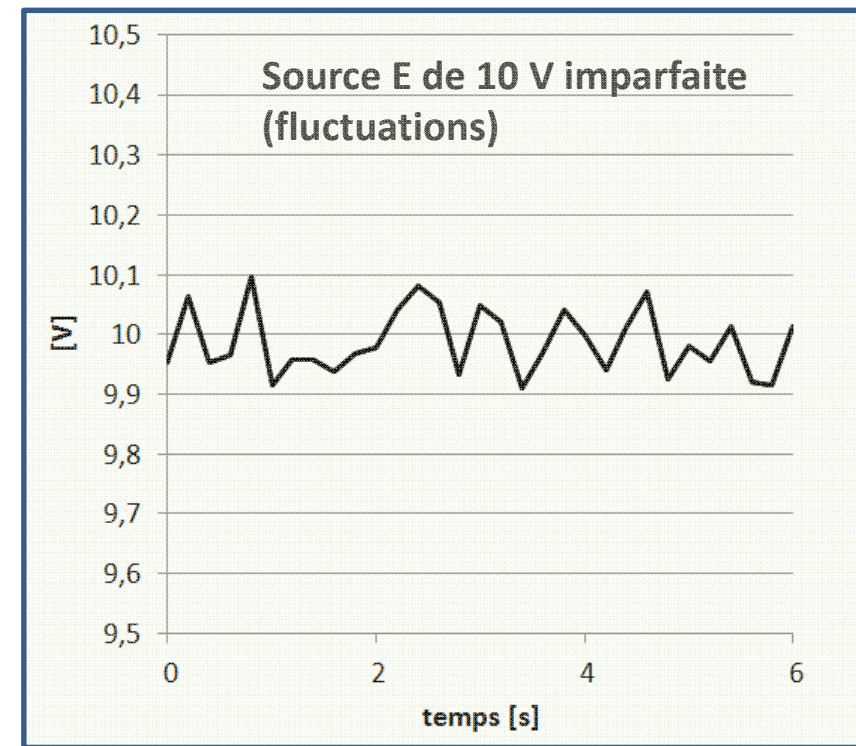
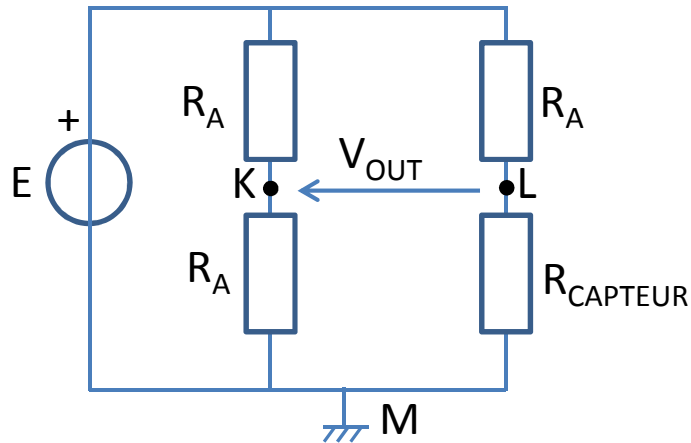
- Autres avantages du pont de Wheatstone: 0V au point de repos \rightarrow ...
- Choix de E :

Exemple avec une sonde Pt100



$$R_{\text{CAPTEUR}} = 100(1 + aT) [\Omega] \text{ avec } a = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{et } R_A = R_{\text{CAPTEUR}}(0^\circ\text{C}) = 100 \Omega$$



Exemple avec une sonde Pt100

Influence des fluctuations de la source E

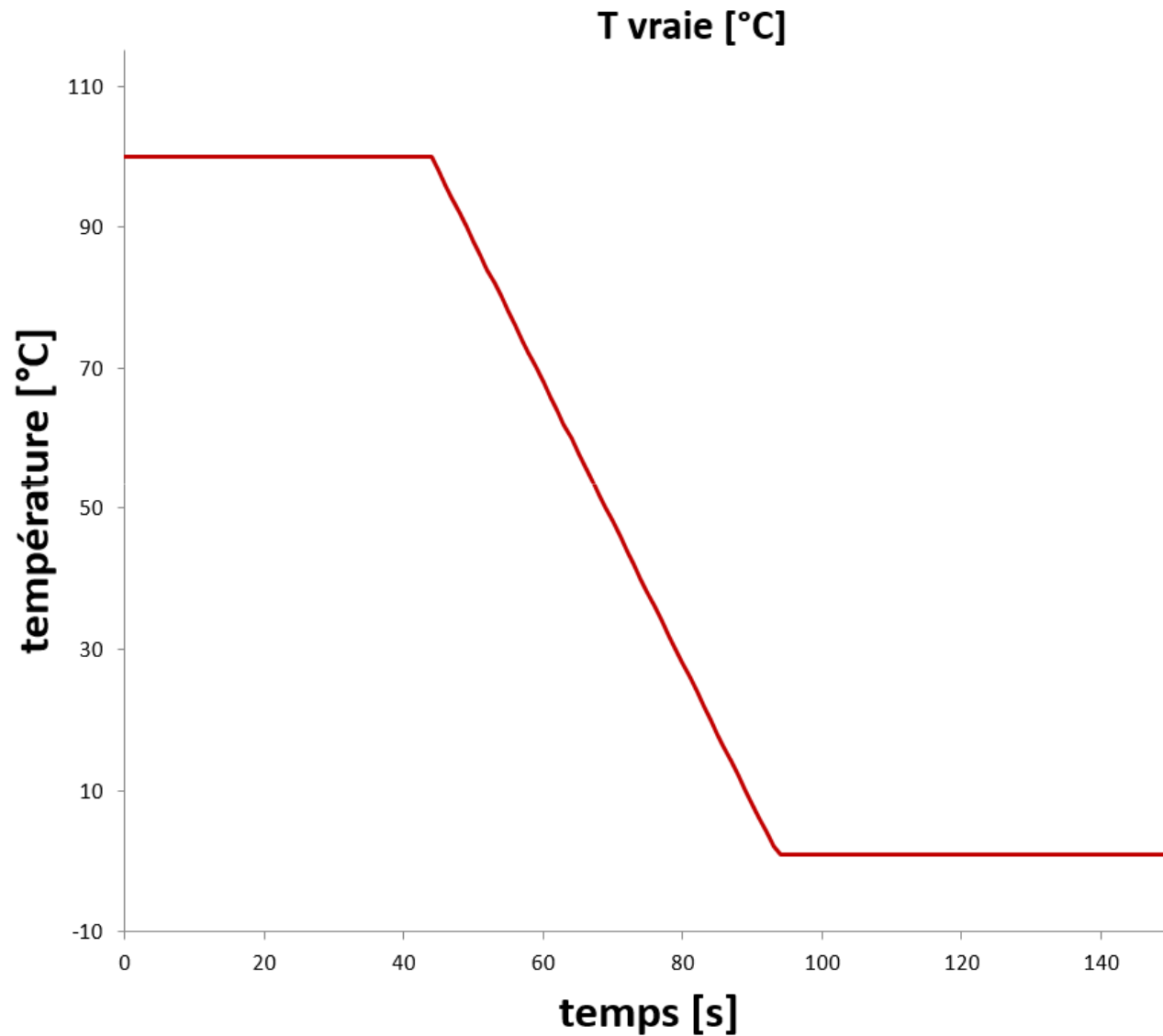
Tension mesurée (V_1 pour le pont diviseur ou V_{OUT} pour le pont de W.)

→ R_{capteur} calculée en supposant $E = 10V$
(on ne tient pas compte des fluctuations)

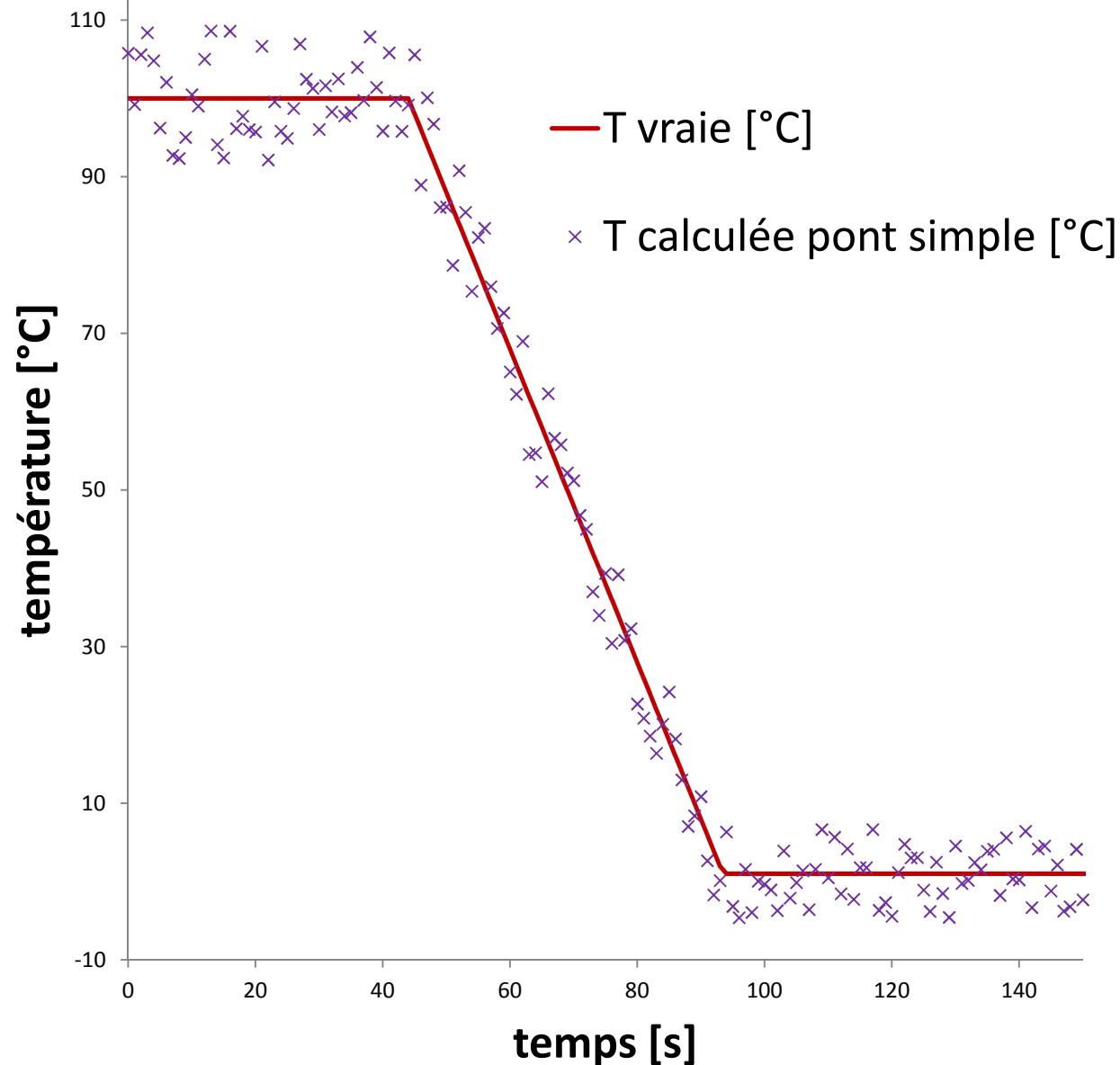
→ T° calculée connaissant la loi $R_{\text{capteur}}(T)$ de la Pt100

Exemple: T° de $100^\circ C$ puis de $1^\circ C$

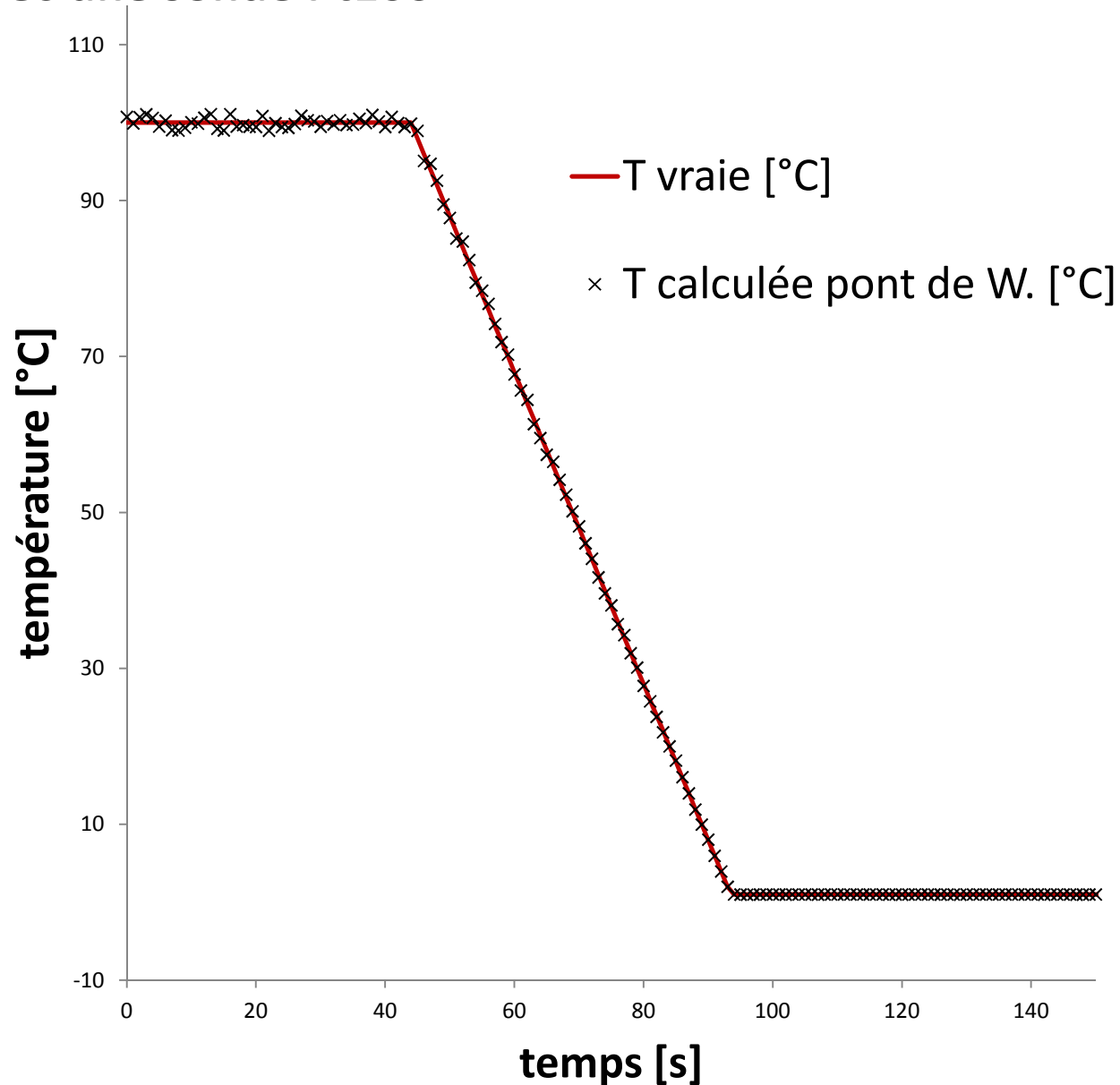
Exemple avec une sonde Pt100



Exemple avec une sonde Pt100



Exemple avec une sonde Pt100



QCM

Quel type d'erreur produit les fluctuations de la source de tension (exemples des 2 ponts précédents)?

- 1. systématique**
- 2. aléatoire**
- 3. systématique et aléatoire**
- 4. d'étalonnage**

Question subsidiaire: comment minimiser ces erreurs?

QCM

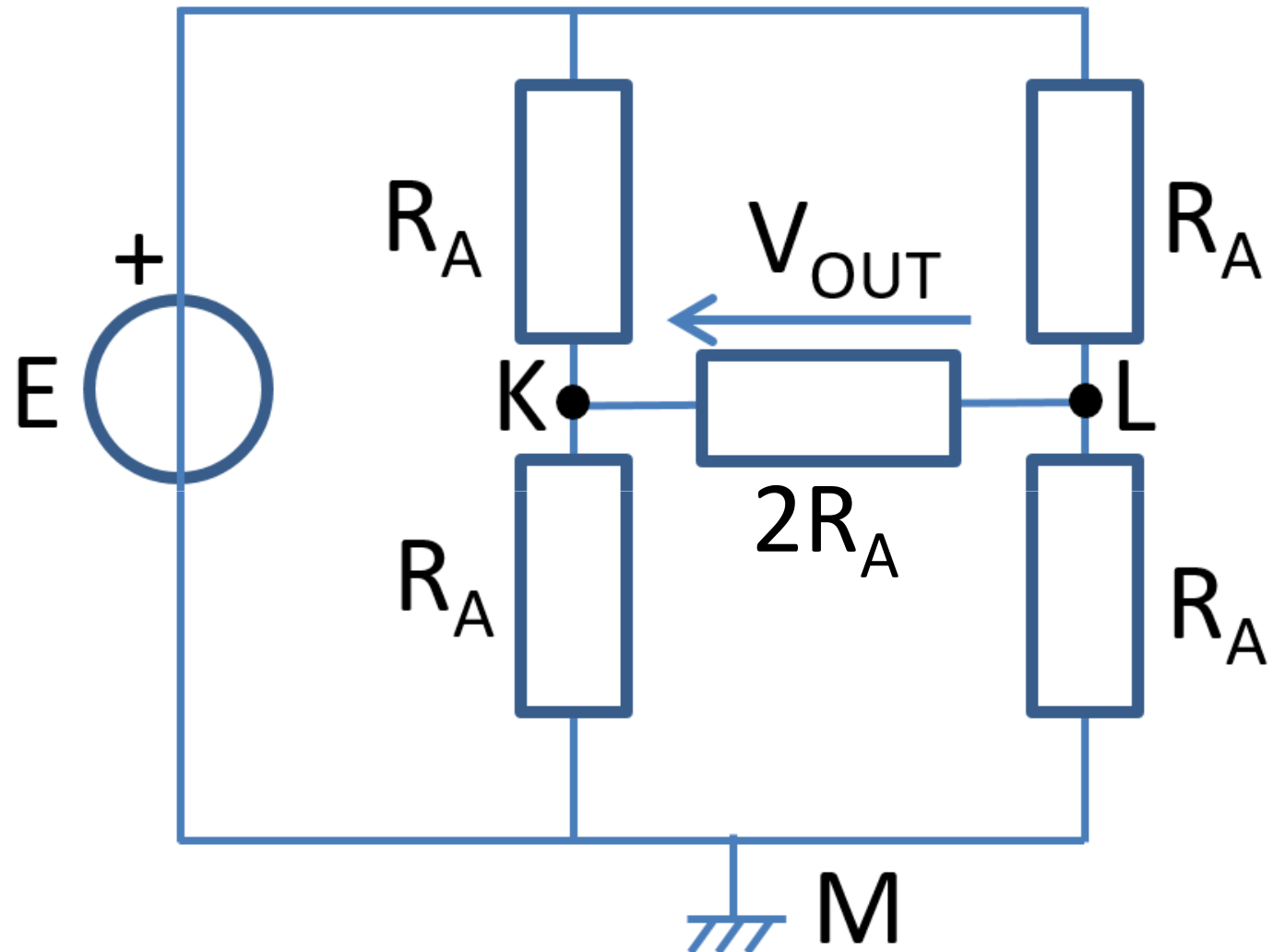
$V_{OUT} =$

1. 0 V

2. E

3. E/2

4. E/4



Calcul différentiel

$f(x, y, z)$

La différentielle de f :

$$df = (\delta f / \delta x) dx + (\delta f / \delta y) dy + (\delta f / \delta z) dz$$

$$df/f = ((\delta f / \delta x) dx + (\delta f / \delta y) dy + (\delta f / \delta z) dz) / f$$

Pour de petites variations (f supposé affine localement):

$$\Delta f / f \approx ((\delta f / \delta x) \Delta x + (\delta f / \delta y) \Delta y + (\delta f / \delta z) \Delta z) / f$$

Exemple: $f = xy/z$

$$df = (y/z) dx + (x/z) dy - (xy/z^2) dz$$

$$df/f = ((y/z) dx + (x/z) dy - (xy/z^2) dz) / (xy/z)$$

$$\Delta f / f \approx \Delta x / x + \Delta y / y - \Delta z / z$$

Plus simple:

$$\ln(f) = \ln x + \ln y - \ln z$$

$$d(\ln(f)) = df/f = dx/x + dy/y - dz/z$$

$$\Delta f / f \approx \Delta x / x + \Delta y / y - \Delta z / z$$

4. Capteurs de déformation et de force

4. Capteurs de déformation et de force

4.1 Jauge de contrainte

4.2 Effet piézoélectrique: application aux capteurs

4.3 Mesure de pression

$\varepsilon_{//} = \Delta l/l$: allongement relatif de la poutre et de la jauge dans la direction de la force.

Lien entre allongement relatif $\varepsilon_{//}$, contrainte σ et force F : $\sigma = F/S = Y\varepsilon_{//}$ (loi de Hooke, domaine élastique)

Exple.:

or: 78GPa, diamant: 1000GPa

Lien entre $\varepsilon_{//}$ et ε_{\perp} : $\varepsilon_{\perp} = -\gamma\varepsilon_{//}$

$R_{\text{jauge}} = R + r$

* R : résistance de la jauge au repos (pas de contrainte)

* r : variation de la résistance de jauge causée par la déformation.

$r/R = K \varepsilon_{//}$ (démon.: cf. cours amphi.)

où K : facteur de jauge (expression de K) ($K \approx 2$ pour un métal, 100 à 200 pour un SC)

Métallique: $\Delta\rho/\rho = C\Delta V/V$ (C : cste de Bridgman ≈ 1).

SC: $\Delta\rho/\rho = \pi\sigma = \pi Y\varepsilon_{//}$ (π est le coef. piézorésistif et Y le module de Young).

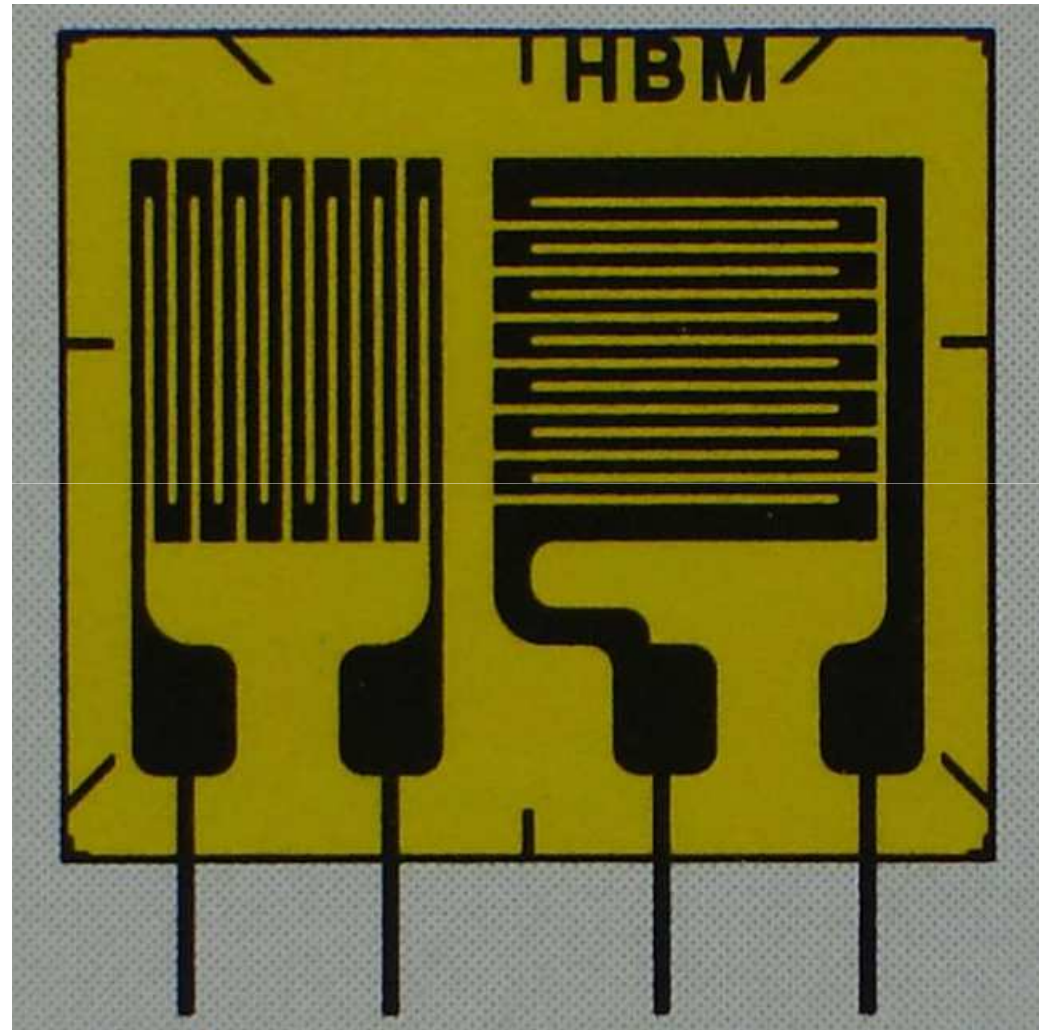
4.1. Capteurs de déformation et de force – Jauge de contrainte

On mesure une tension dépendant de r en plaçant R_{jauge} dans un pont diviseur ou dans un pont de Wheatstone:

→ $V_{\text{mesurée}}$

→ r calculée

→ $\varepsilon_{//}$ déduit



© ??

4.1. Capteurs de déformation et de force – Jauge de contrainte

Conditionnement:

1 jauge dans un pont diviseur, dans un pont de Wheatstone (cf. TD9)

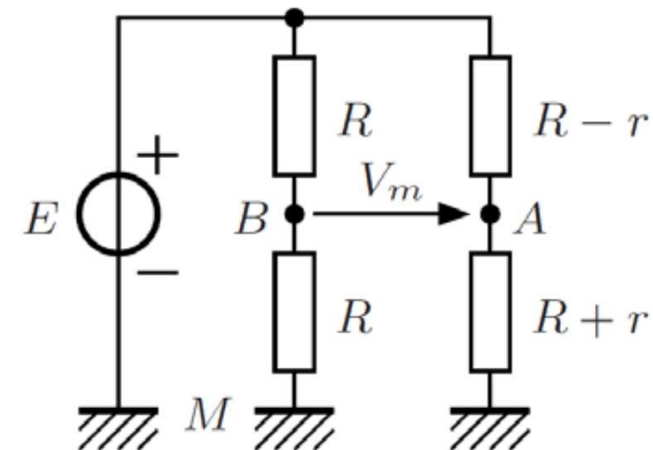
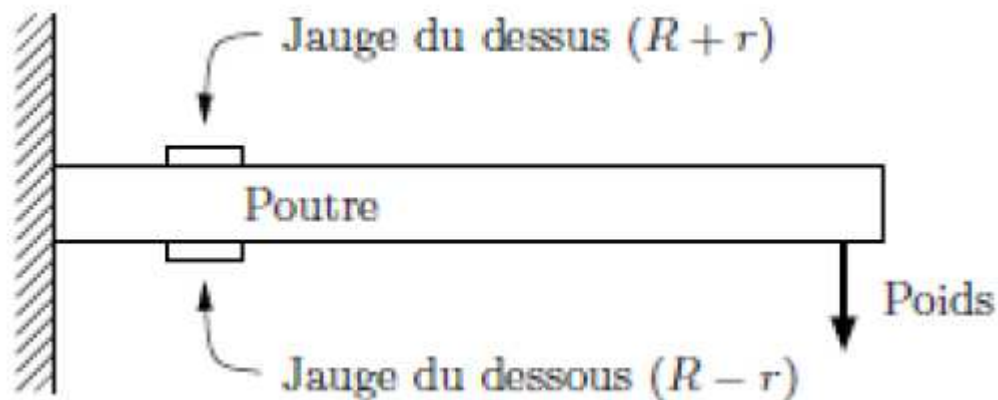
Comment choisir la résistance additionnelle R_A pour avoir la meilleure sensibilité autour du point de repos ($\varepsilon_{//} = 0$)? Voir T78.

2 jauges dans un pont de W.: 1 dessus, 1 dessous (cf. TD9)

Dessus: $R_{\text{jauge}} = R + r$

Dessous: $R'_{\text{jauge}} = R - r$

Déterminez S , la sensibilité de la chaîne de mesure ($S = dV/d\varepsilon_{//}$ où V est la tension mesurée).
La chaîne de mesure est-elle linéaire? Quels sont les avantages de ce montage par rapport à un montage avec une seule jauge dans un pont diviseur?

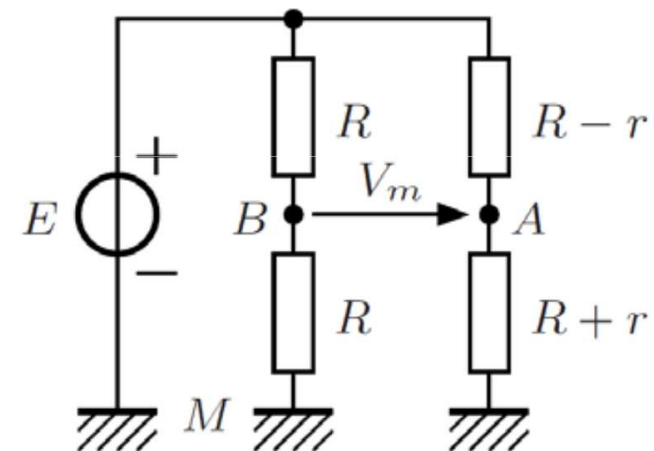
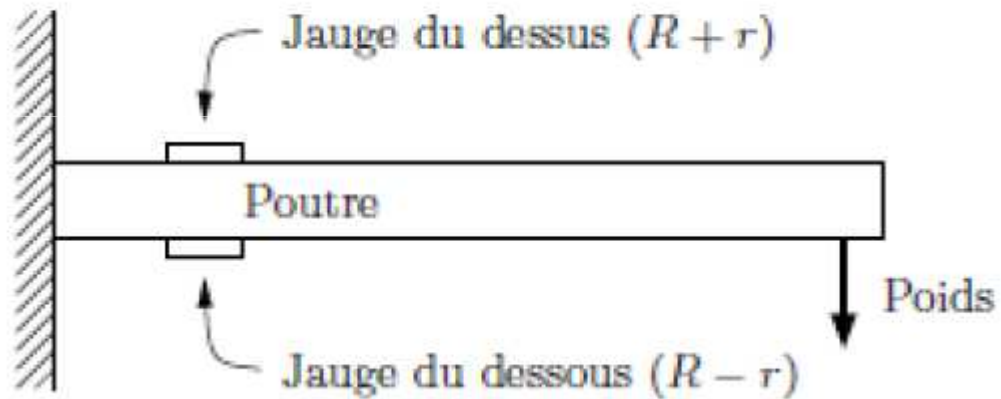


4.1. Capteurs de déformation et de force – Jauge de contrainte

Conditionnement (suite):

2 jauges dans un pont de W.: 1 dessus, 1 dessous (cf. TD9):

Intérêt vis-à-vis de la non linéarité des jauges (terme « parasite » en $(\varepsilon_{//})^2$ en plus dans l'expression de r/R ?



QCM

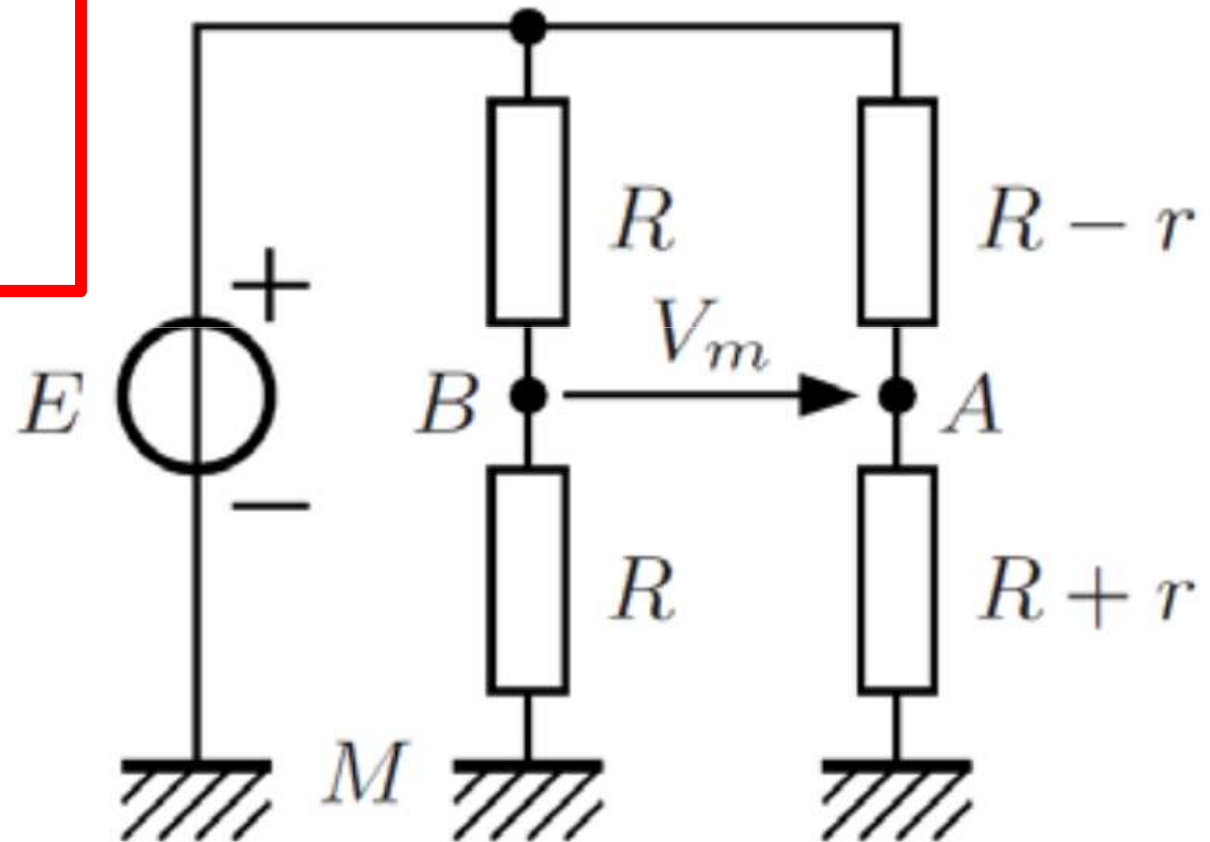
Quelle puissance fournit le générateur à l'équilibre (i.e. quand $r = 0$):

1. $2E^2/R$

2. E^2/R

3. $E^2/2R$

4. $E^2/4R$



QCM

$R = 250\Omega$ et $r/R \ll 1$ (ce qui équivaut ici à supposer $r \approx 0$).

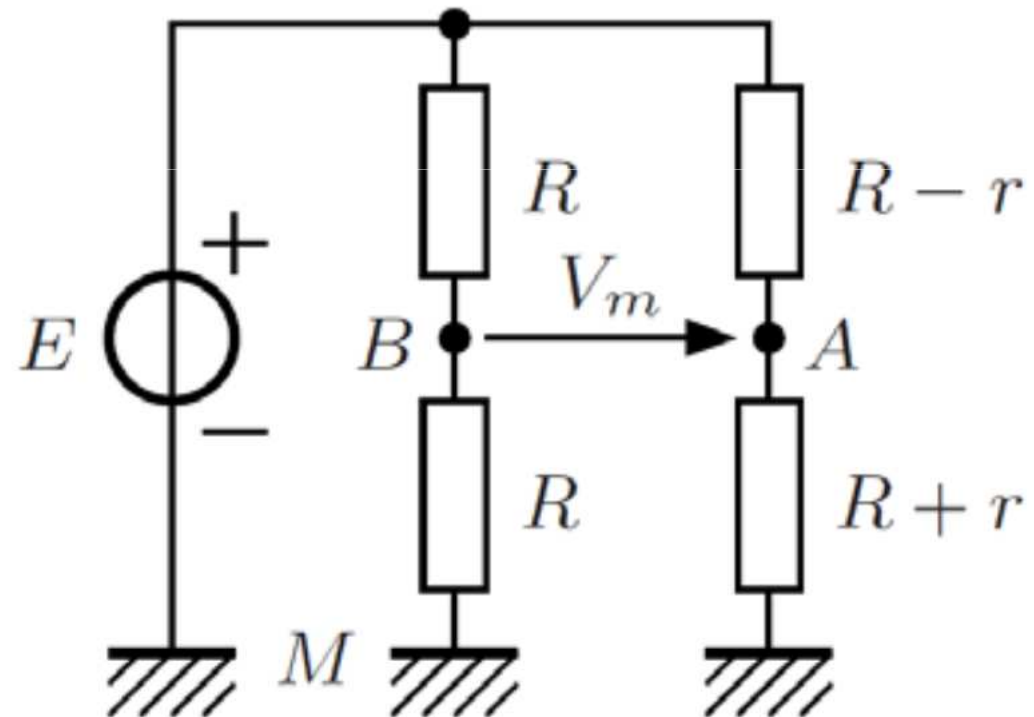
Si le générateur est une batterie de capacité 100mAh et délivrant 5V, en combien de temps passe-t-elle de l'état 100% chargée à 100% déchargée?

1. 30mn

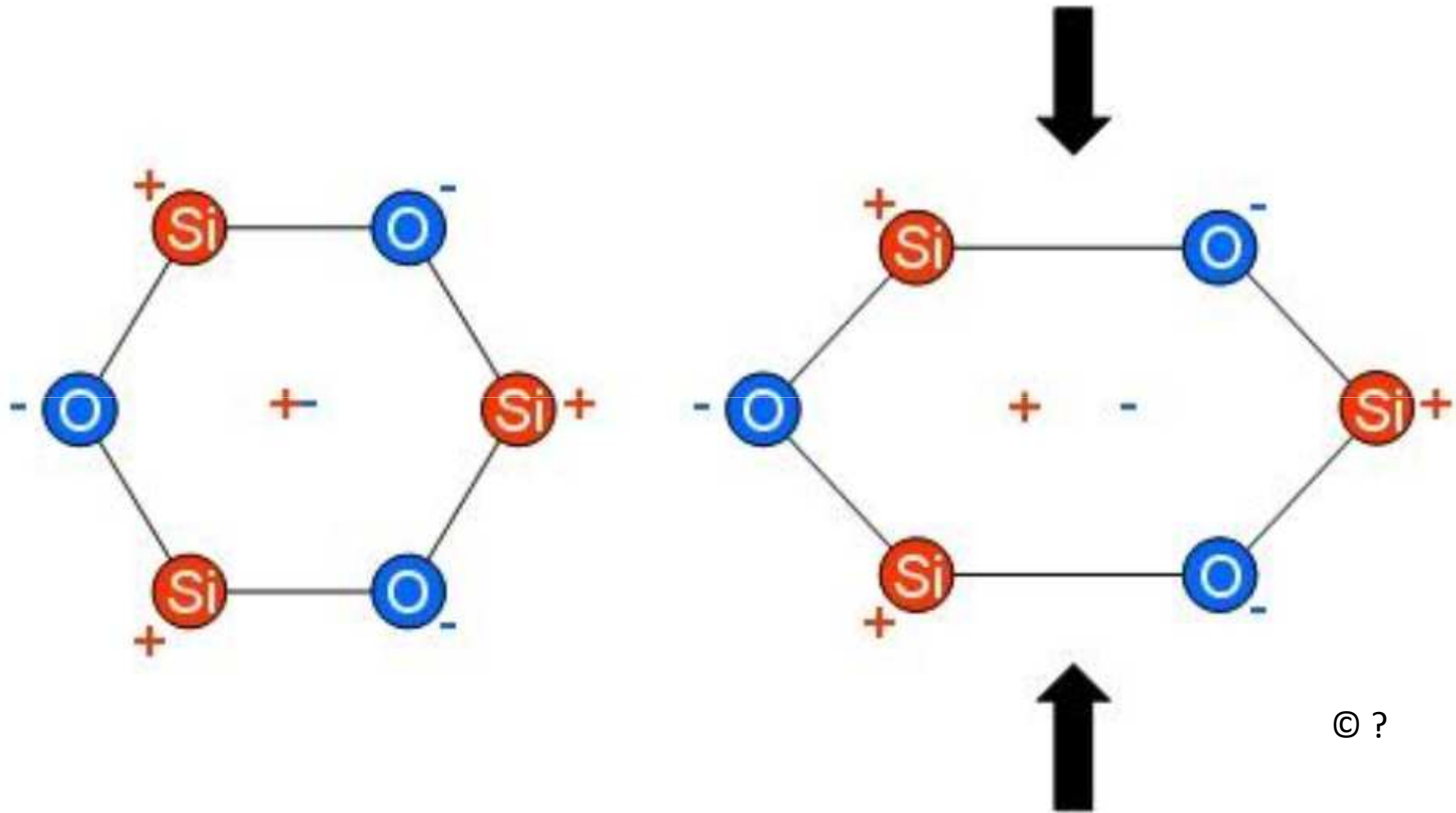
2. 1h

3. 2h

4. 5h



4.2. Capteurs de déformation et de force – Effet piézoélectrique



© ?

Rappel (cours Annick Dégardin)

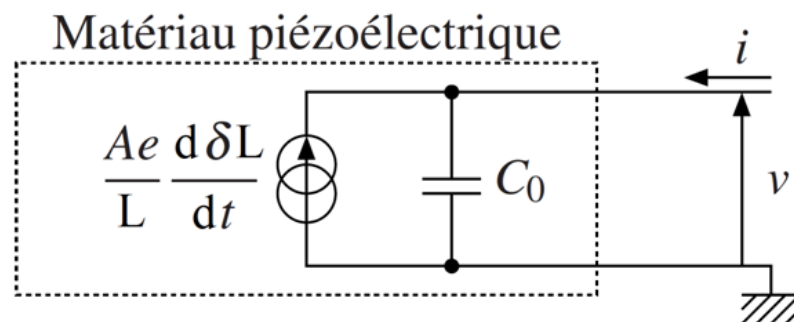
LA PIÉZOÉLECTRICITÉ

L'effet piézoélectrique :

✕ Schéma électrique équivalent :

Le courant I total se décompose donc en deux courants :

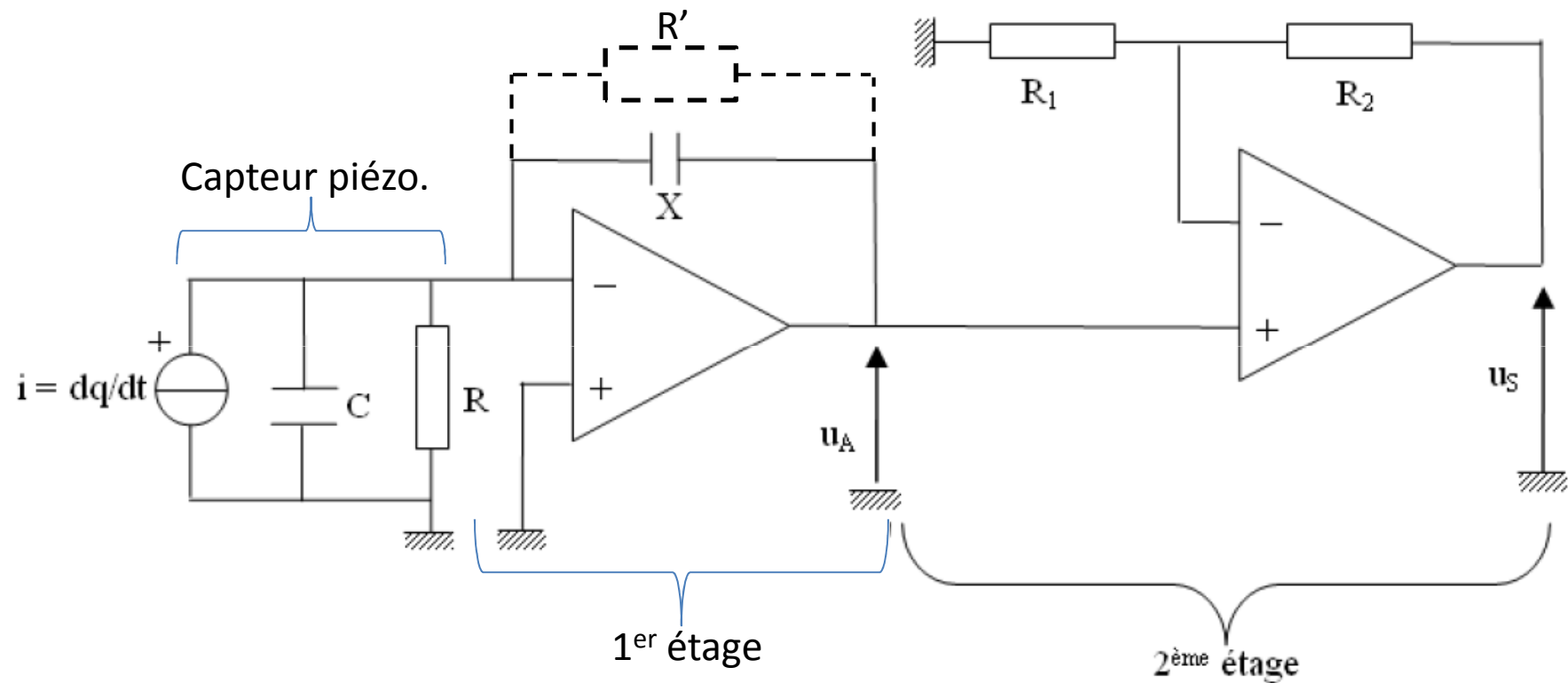
$$I = -\underbrace{\frac{\epsilon A}{L} \frac{dU}{dt}}_{C_0} + \frac{Ae}{L} \frac{d(\delta L)}{dt}$$



Utilisable pour étudier les variations. Pas de variation, pas de courant, pas de capteur.

4.2. Capteurs de déformation et de force – Effet piézoélectrique

Exemple de conditionnement: q est ici supposé proportionnel à la force.



Pourquoi doit-on ajouter R' ?

Exemple de conditionnement: q est ici supposé proportionnel à la force.

Etudiez ce montage en supposant le régime sinusoïdal (exemple: étude des vibrations), fréquence f .

Bande-passante, sensibilité dans la bande-passante, ... compromis

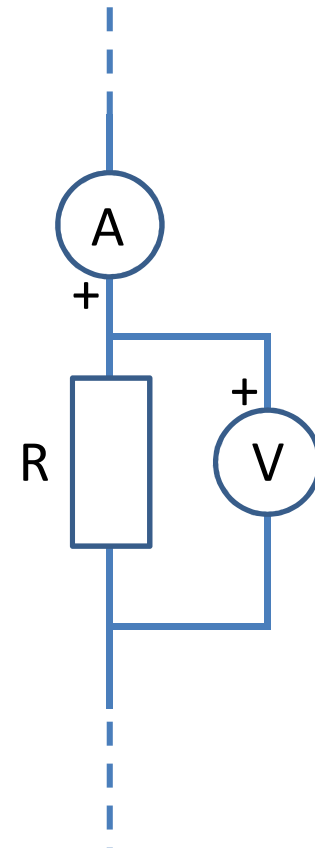
Avantage supplémentaire: le coefficient de proportionnalité liant q à F dépend de la tension aux bornes du piézo.: ici, ...

QCM

La valeur de la résistance R d'un capteur résistif est calculée à partir de la mesure au voltmètre de la tension U à ses bornes et de la mesure à l'ampèremètre du courant I y circulant (appareils supposés parfaits).

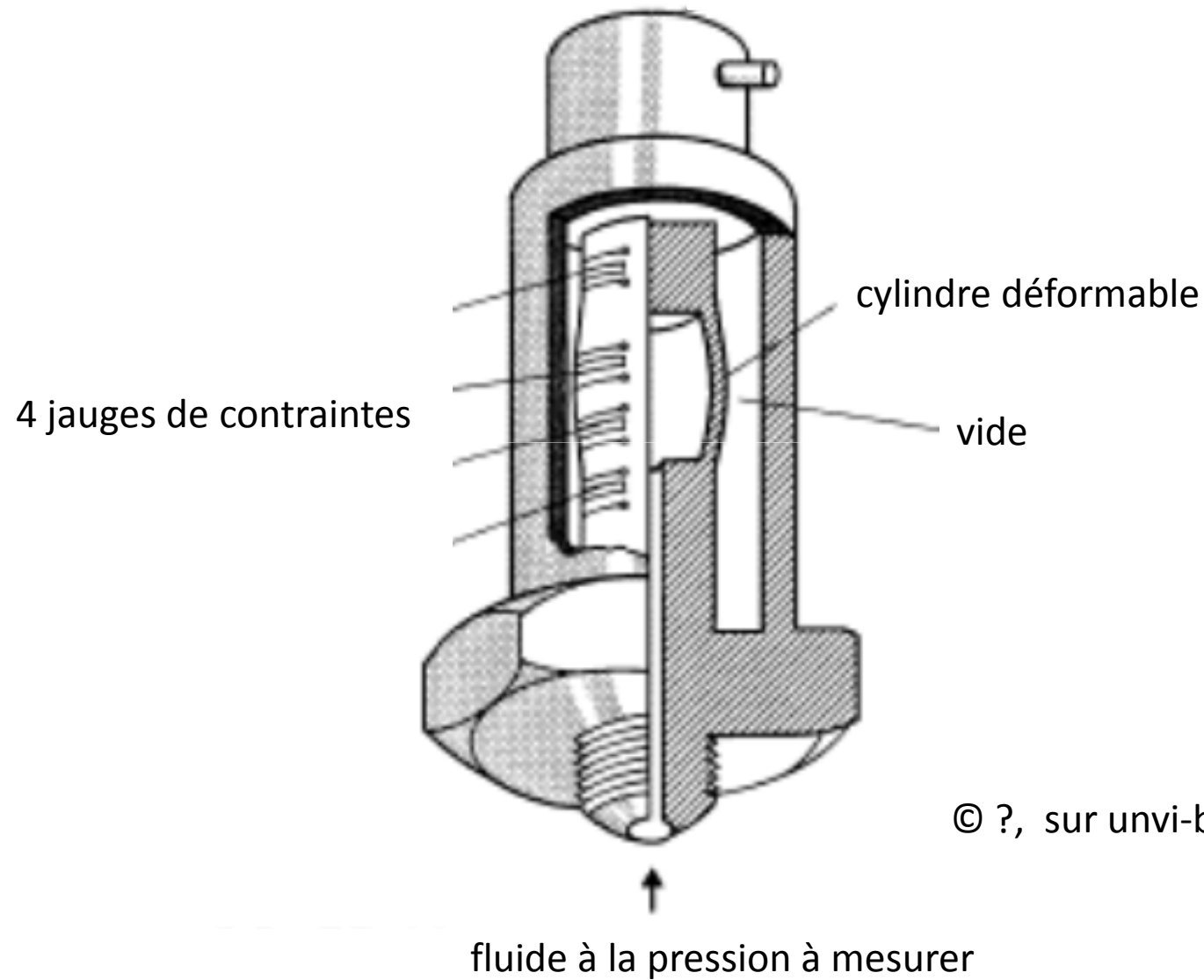
Quelle est l'expression de ΔR , l'incertitude absolue sur R , ΔI et ΔU étant les incertitudes sur I et U ?

1. $\Delta R \approx \Delta U/I + U\Delta I/I^2$
2. $\Delta R \approx \Delta U/U + \Delta I/I$
3. $\Delta R \approx \Delta U/I + U/\Delta I$
4. $\Delta R \approx (U/I)(\Delta U/U + \Delta I/I)$



4.3. Capteurs de déformation et de force – Pression

A jauges de contrainte



© ?, sur unvi-brest.fr/lpo

4.3. Capteurs de déformation et de force – Pression

A jauges de contrainte

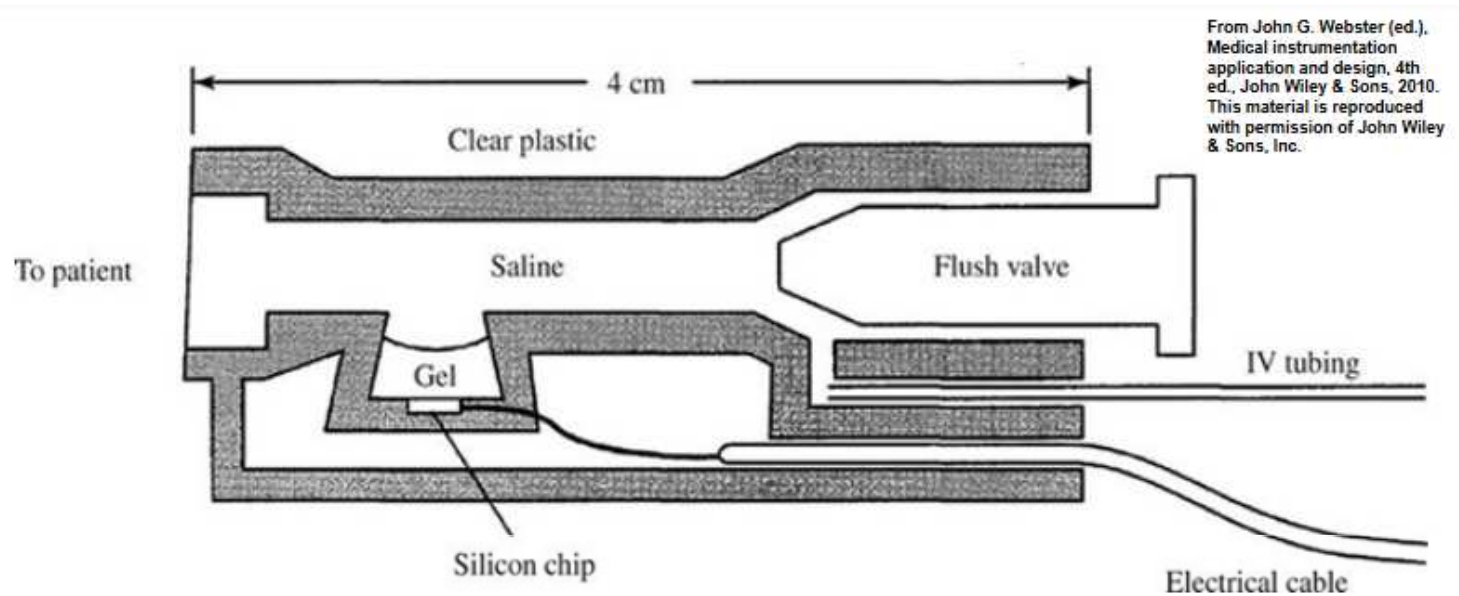
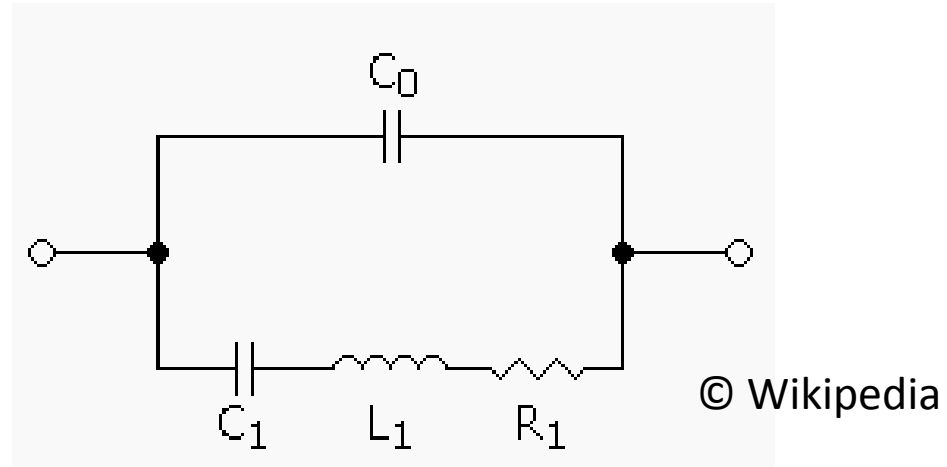


Figure 2.5 Isolation in a disposable blood-pressure sensor. Disposable blood pressure sensors are made of clear plastic so air bubbles are easily seen. Saline flows from an intravenous (IV) bag through the clear IV tubing and the sensor to the patient. This flushes blood out of the tip of the indwelling catheter to prevent clotting. A lever can open or close the flush valve. The silicon chip has a silicon diaphragm with a four-resistor Wheatstone bridge diffused into it. Its electrical connections are protected from the saline by a compliant silicone elastomer gel, which also provides electrical isolation. This prevents electric shock from the sensor to the patient and prevents destructive currents during defibrillation from the patient to the silicon chip.

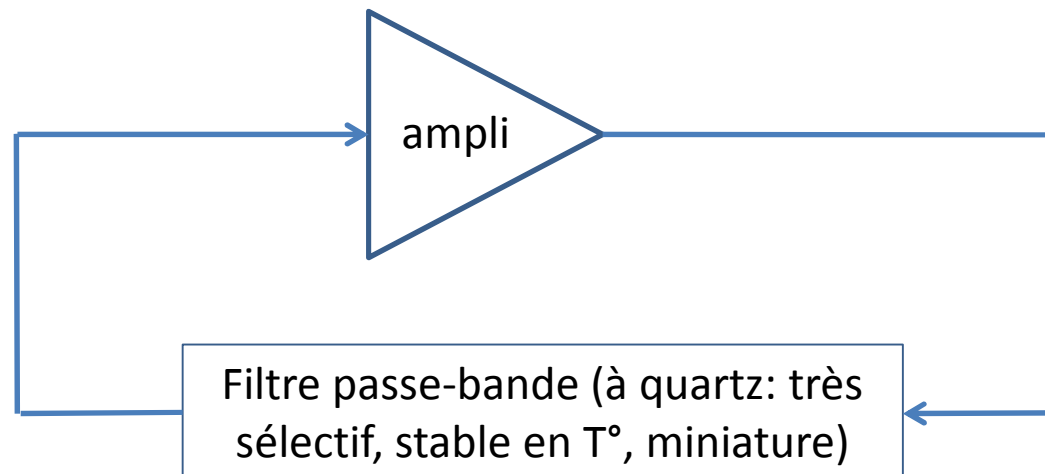
4.3. Capteurs de déformation et de force – Pression

A quartz

Schéma équivalent d'un quartz



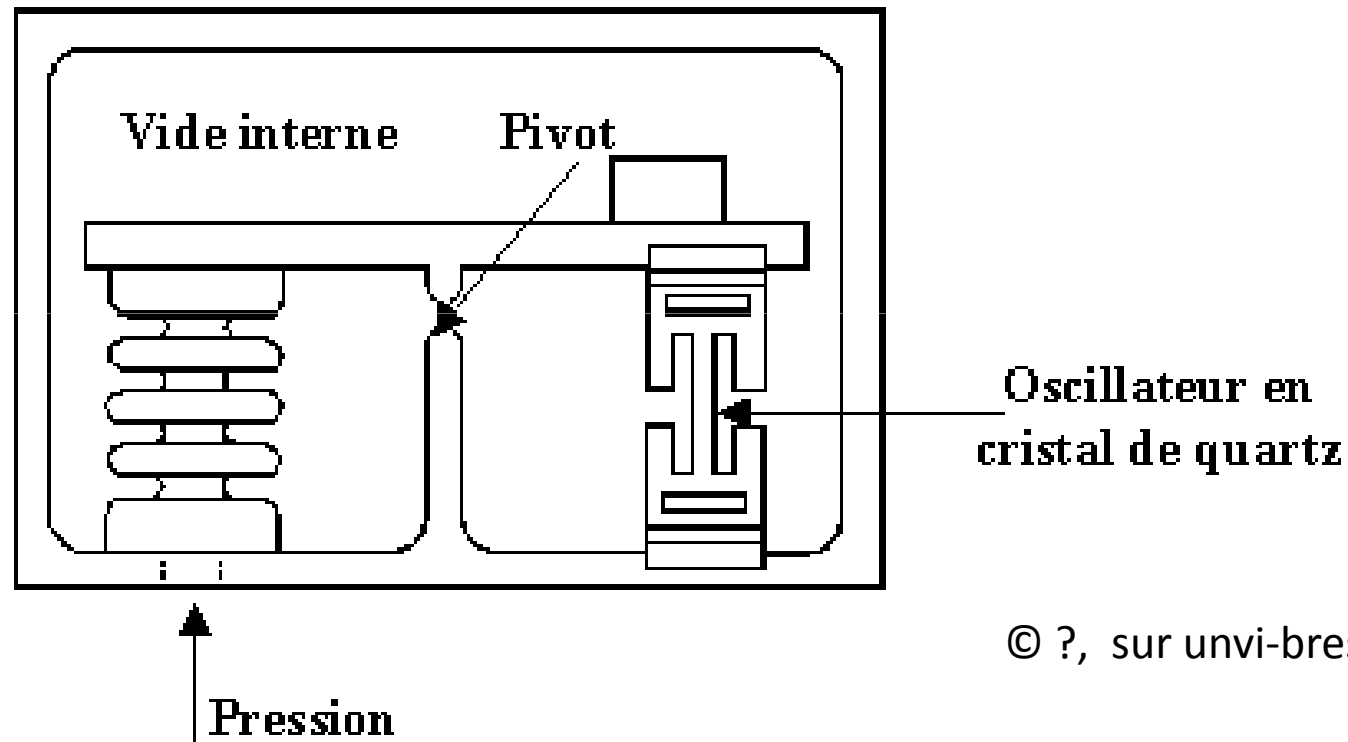
Oscillateur à quartz



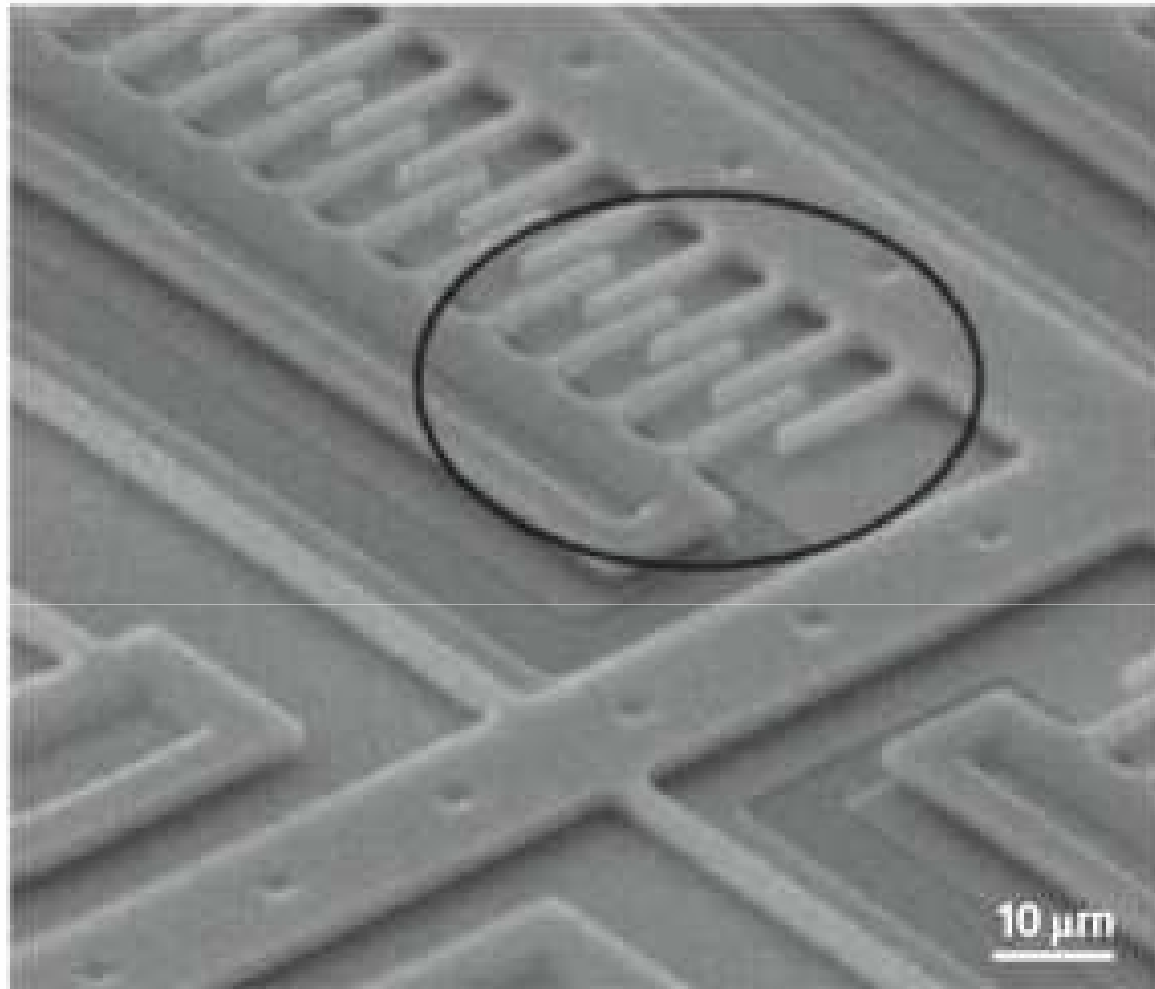
4.3. Capteurs de déformation et de force – Pression

A quartz (suite)

Application capteur de pression

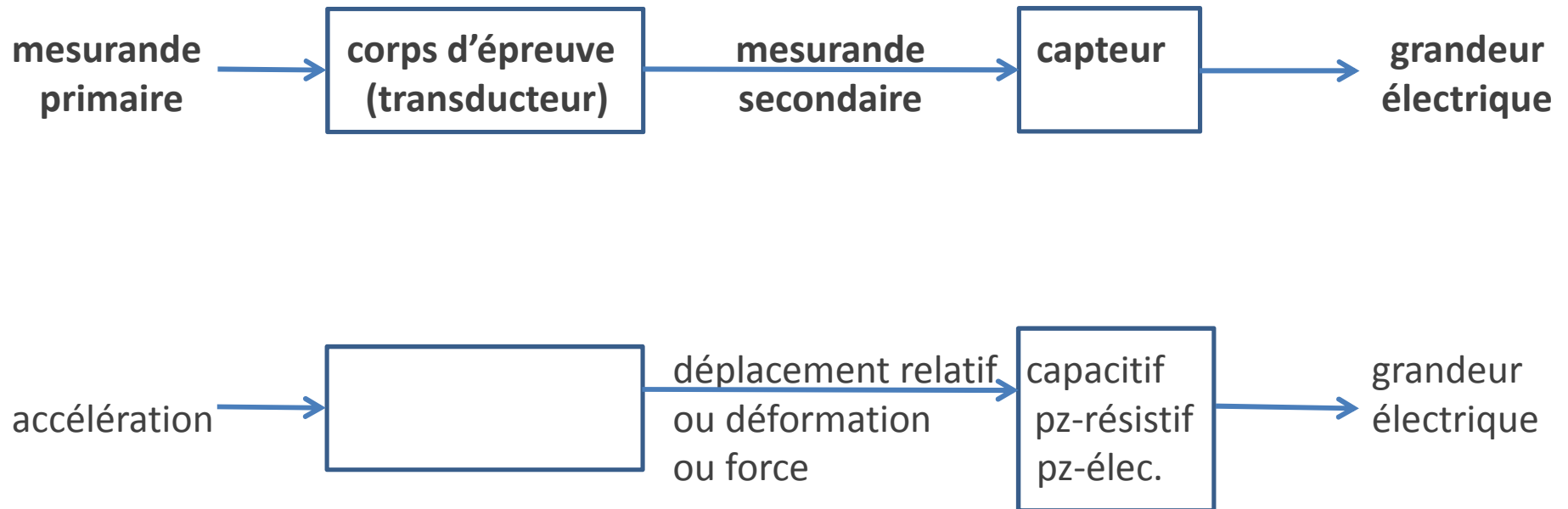


5.1. Accéléromètre – Capacitif



© Techniques de l'Ingénieur

Principe



Mesure de déplacement relatif (mesurande secondaire)

Principe

Rappel: la capacité d'un condensateur plan: $C = \epsilon_0 \epsilon_r S / e$

où $\epsilon_0 \epsilon_r$ est la permittivité, S la surface des armatures et e l'espacement entre 2 armatures.

Capacité entre la partie verte et la partie noire:

Surface en regard: S

Espacement entre 2 armatures: $e - \Delta e$

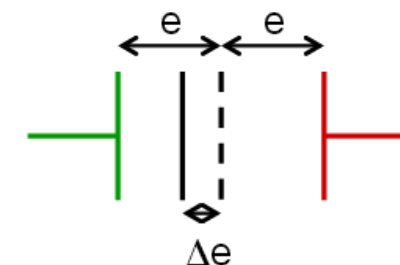
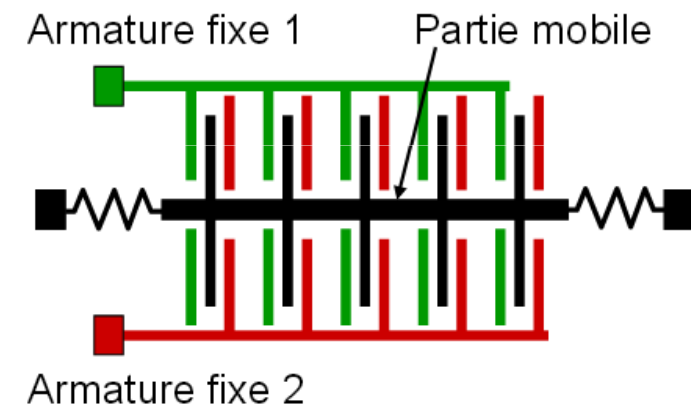
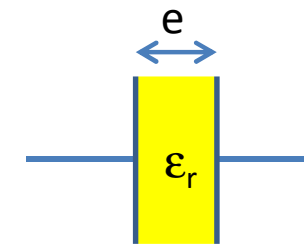
$C_V =$

Capacité entre la partie noire et la partie rouge:

Surface en regard: S

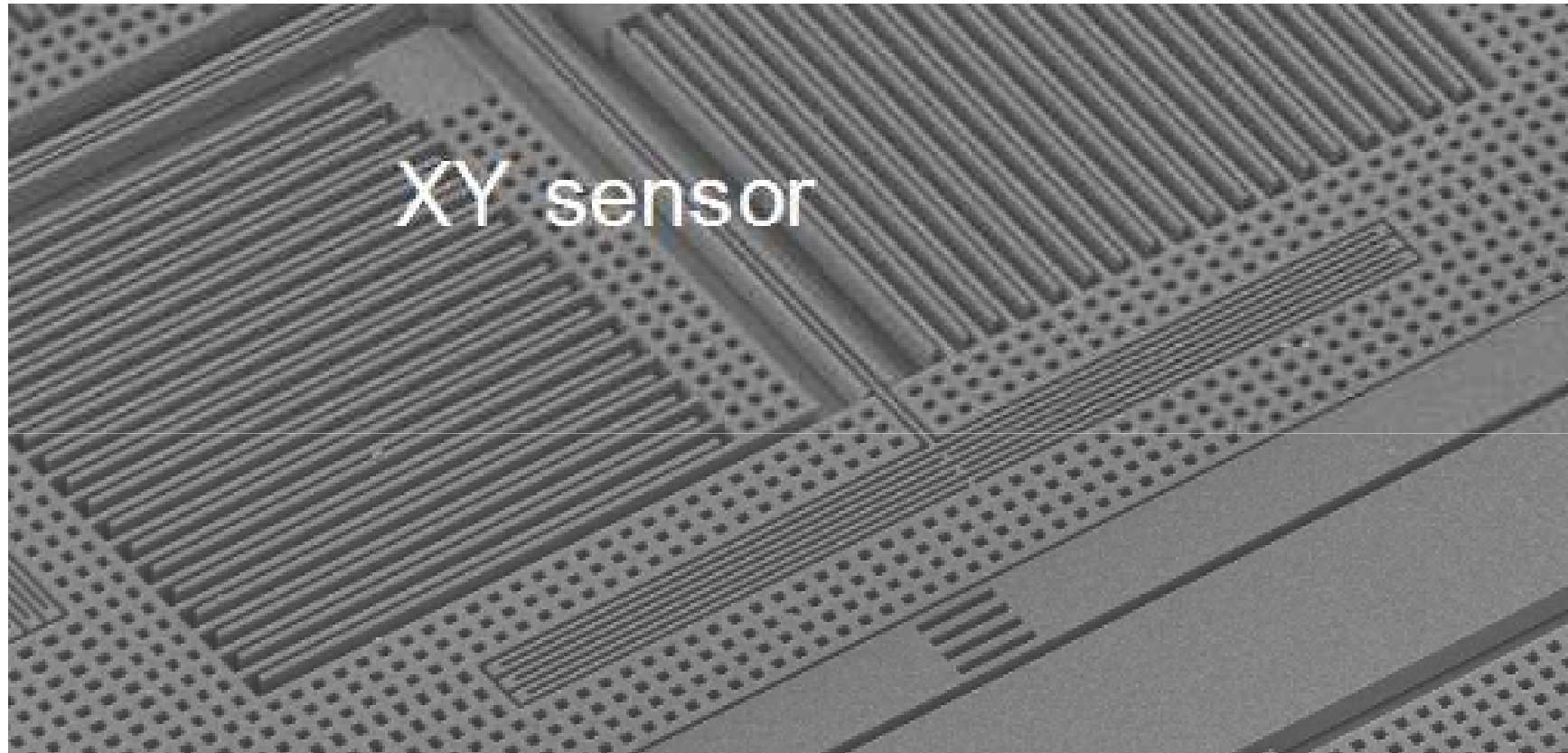
Espacement entre 2 armatures: $e + \Delta e$

$C_R =$



© ??

Mesure de déplacement relatif (mesurande secondaire) (suite)



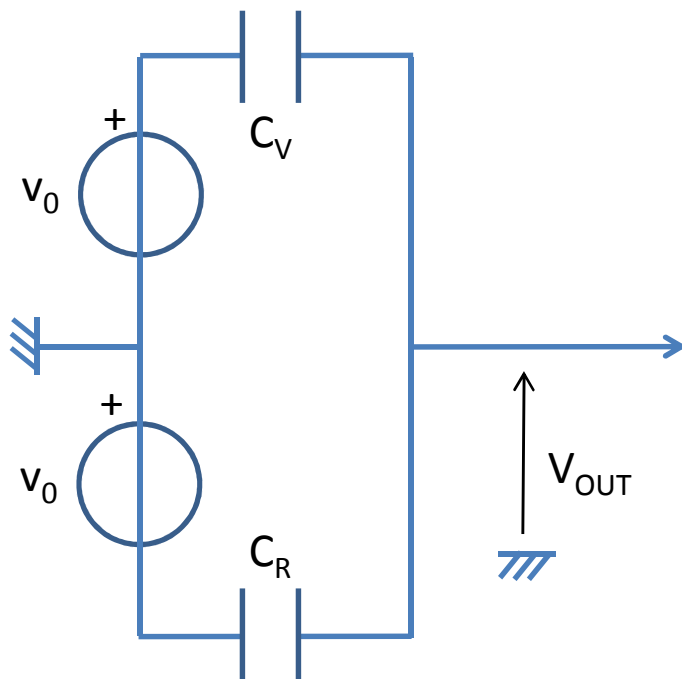
© STMicroelectronics, pour Iphone

5.1. Accéléromètre – Capacitif

Mesure de déplacement relatif (mesurande secondaire) (suite)

Exemple de conditionnement

$$v_0 = A \cos \omega t$$



V_{OUT} dépendant de $\Delta e...$

5.1. Accéléromètre – Capacitif

Lien déplacement relatif - accélération

x_2 : position de m_c
 x_1 : position du boîtier

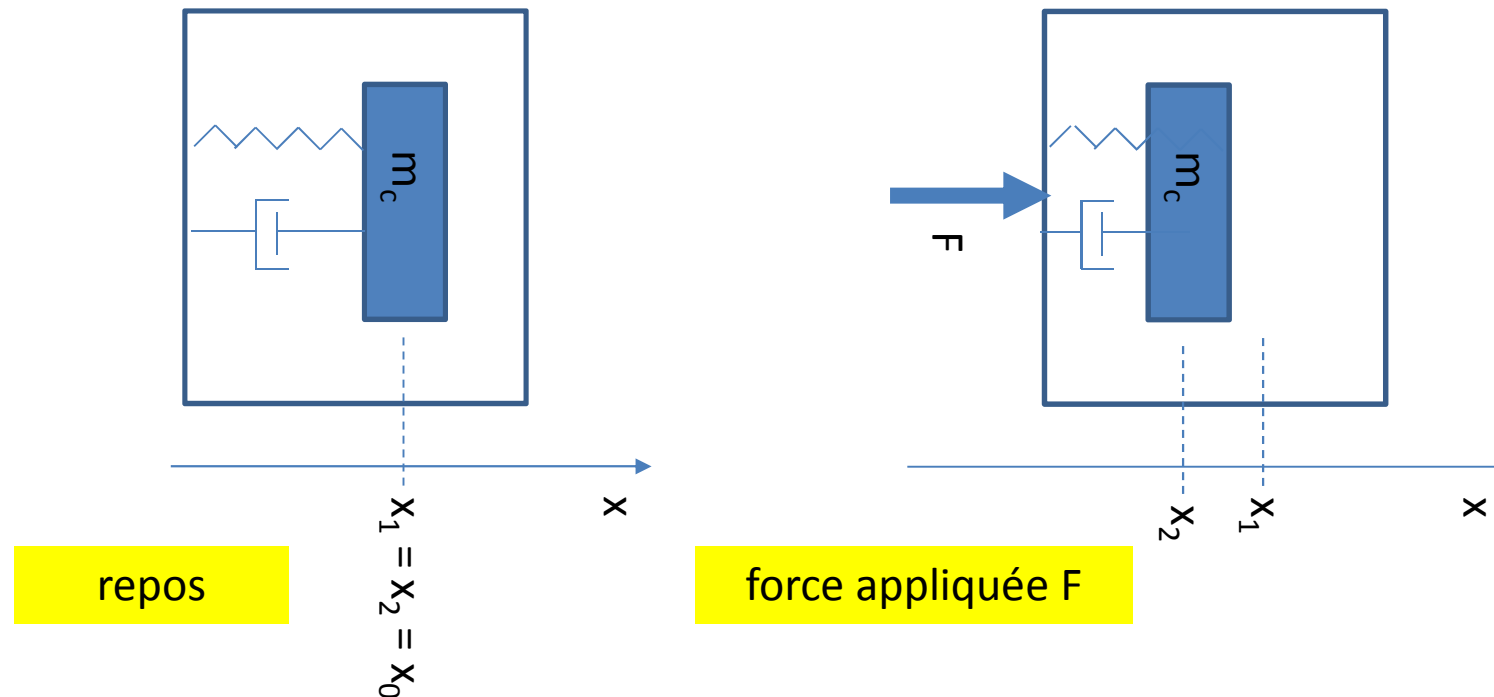
Détermination de l'accélération γ

$m_c x_2'' = -k(x_2 - x_1) - c(x_2' - x_1')$ avec c coef. de frottement (viscance),
 k coef. de rappel du ressort (raideur).

$$\gamma = x_1''$$

En régime sinusoïdal, on définit: $H = (X_1 - X_2)/\Gamma$

(X_1 , X_2 , Γ : amplitudes complexes de x_1 , x_2 , γ)



D'après Davoust et Vanzo, « Capteurs d'accélération », cours de Supélec, 1999

Lien déplacement relatif – accélération (suite)

Détermination de l'accélération γ

$$\rightarrow H = 1/(\omega^2 - k/m_c - j\omega c/m_c)$$

$$|H|_{MAX} = m_c/k$$

$$\text{Pulsation propre } \omega_0 = (k/m_c)^{0,5} \quad (H(\omega_0) \rightarrow \infty \text{ si } c = 0)$$

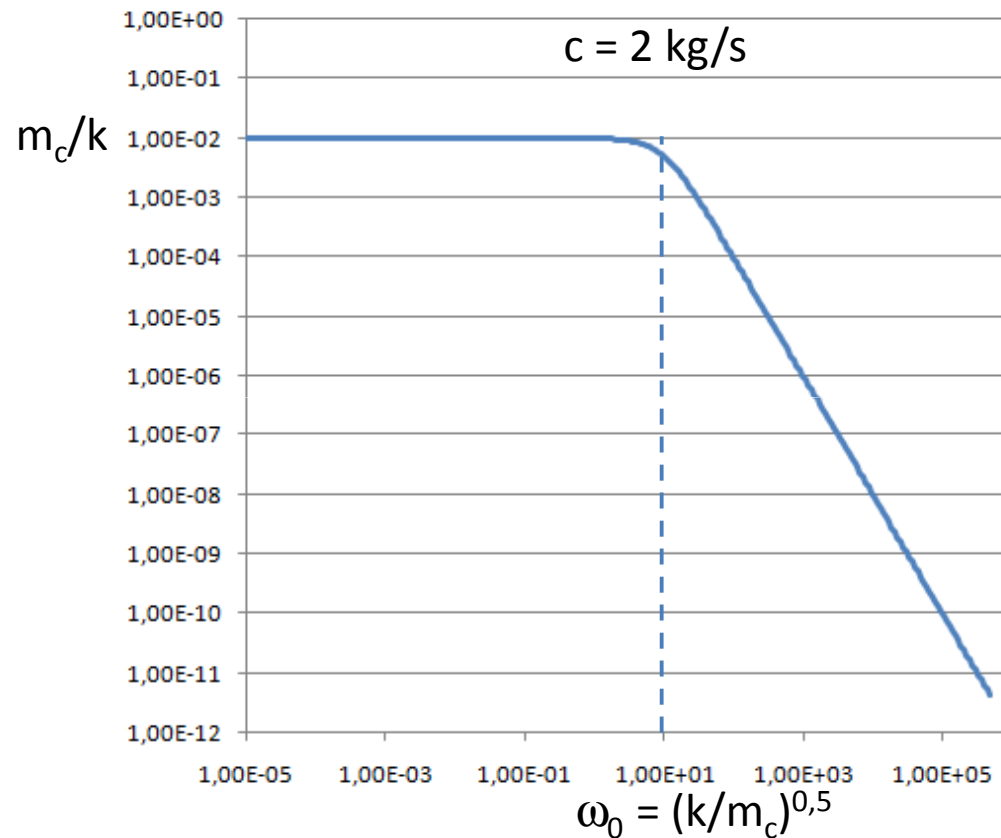
Il suffit de connaître $x_1 - x_2$ pour trouver γ .

5.1. Accéléromètre – Capacitif

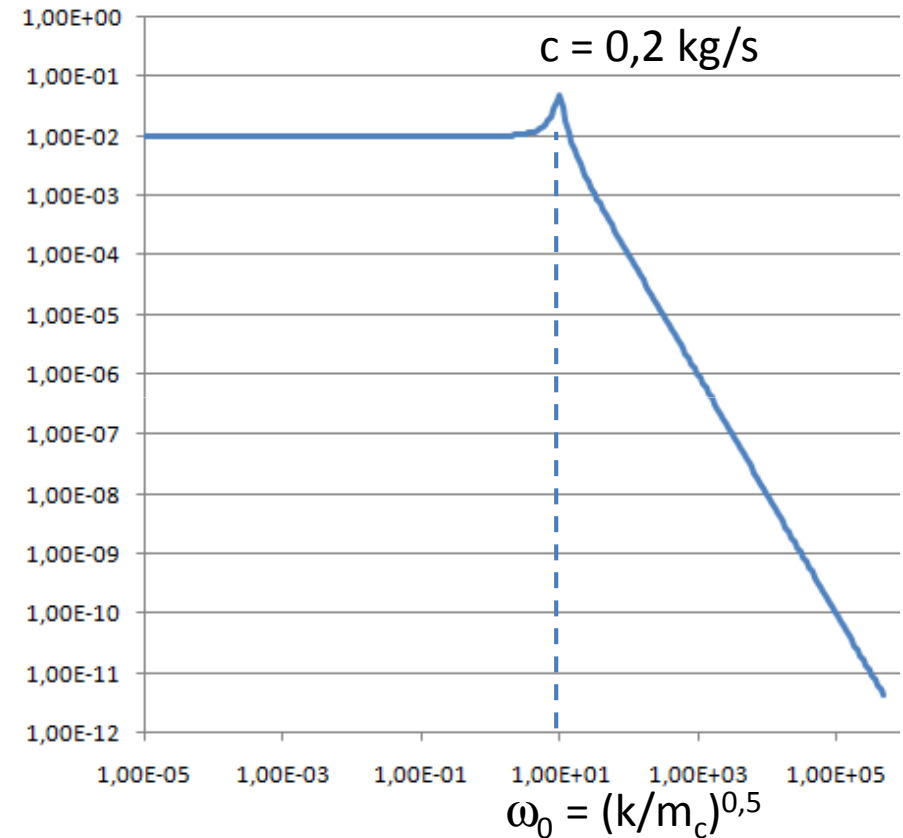
Lien déplacement relatif – accélération (suite)

$$m_c = 0,1 \text{ kg}; k = 10 \text{ kg/s}^2;$$

Tracé en Bode de $|H|$ (en s^2)



Pulsation de l'acc. en rad/s

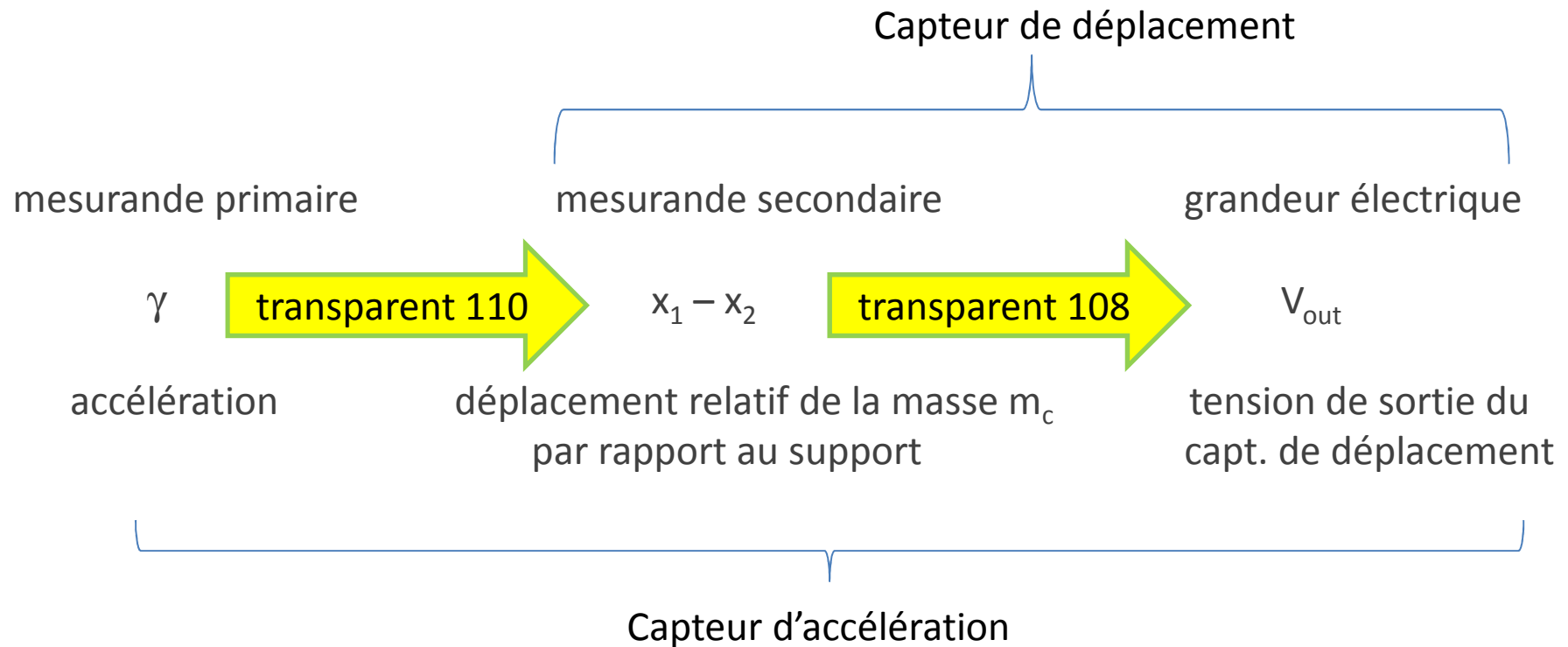


Pulsation de l'acc. en rad/s

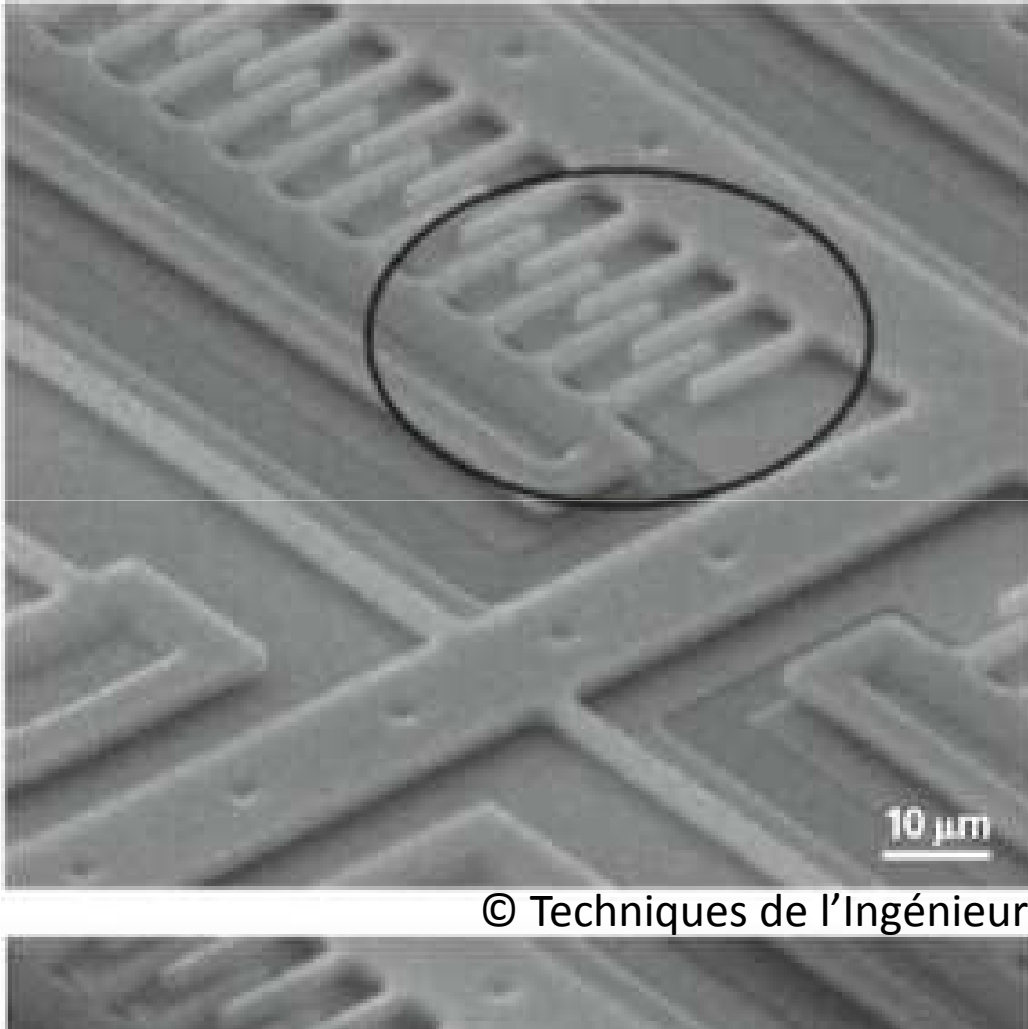
Si on augmente la masse m , la sensibilité dans la BP augmente mais il y a 2 inconvénients : ...

5.1. Accéléromètre – Capacitif

Accéléromètre dans son ensemble



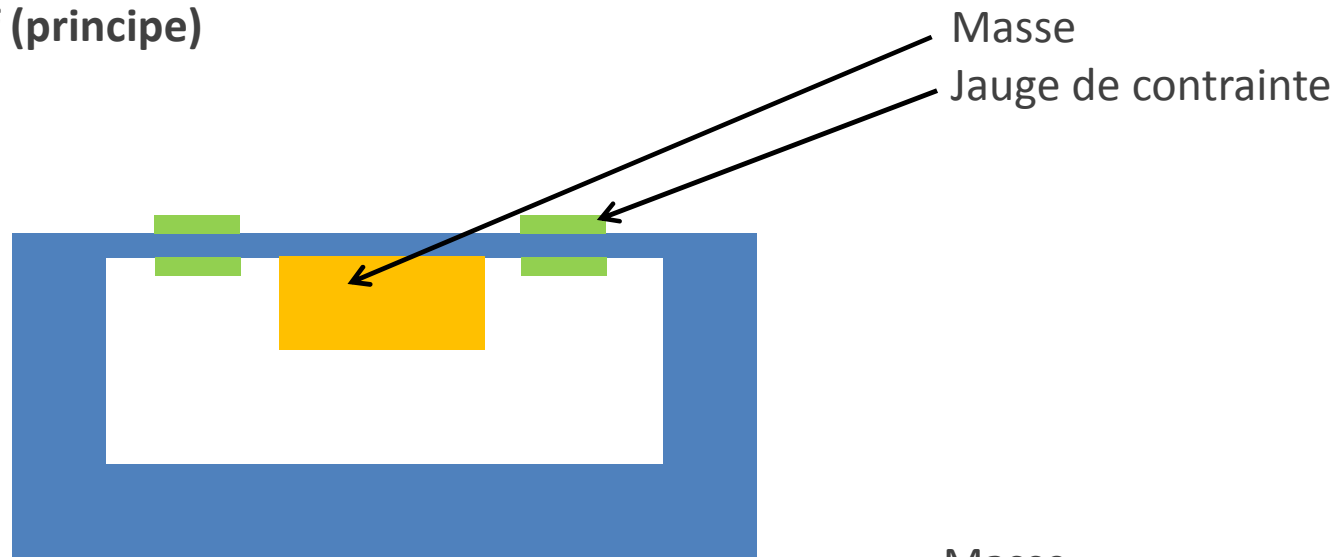
5.1. Accéléromètre – Capacitif



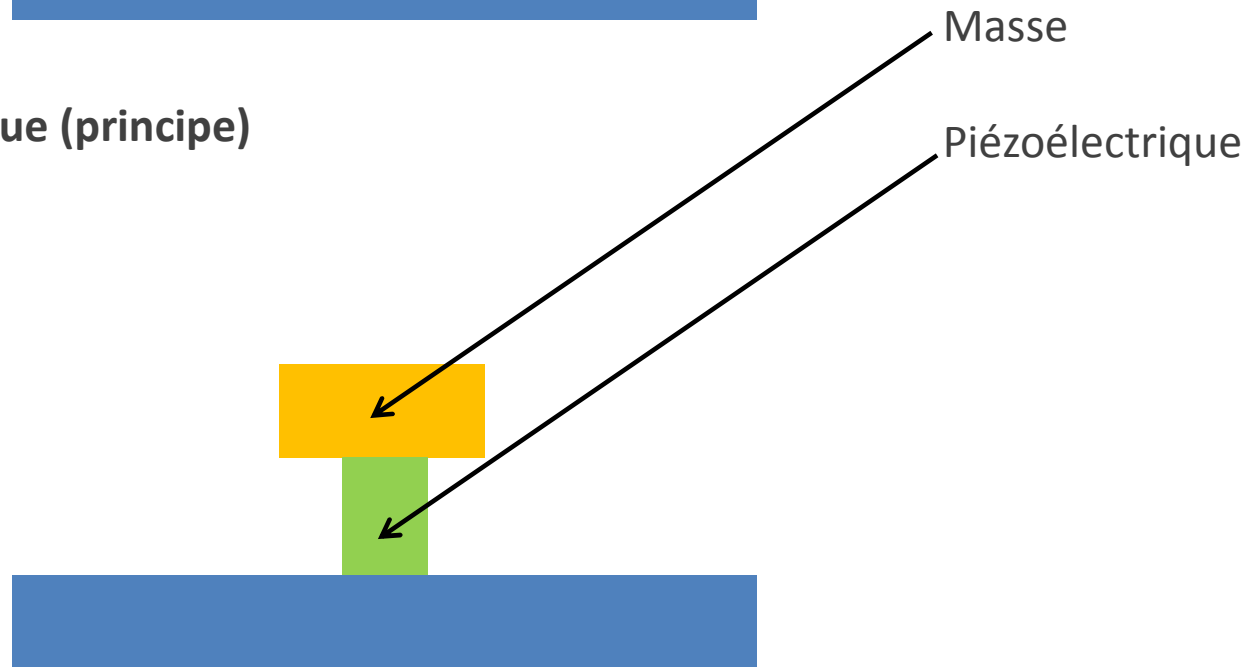
Vidéo

5.2. Accéléromètre – Piézorésistif et piézoélectrique

Piézorésistif (principe)



Piézoélectrique (principe)



QCM (ER2 du 17 novembre 2016)

Soit un accéléromètre capacitif.

Après une brève étude, le concepteur montre que pour améliorer sa sensibilité il faut augmenter la masse du capteur. Cela se fera au détriment de

1. sa fidélité
2. sa finesse
3. sa linéarité
4. rien

6. Mesure de forts courants électriques

Mesure par induction

Théorème d'Ampère (dans un environnement non magnétique, i.e. $\mu_r = 1$)

$$\oint_{\tau} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum I_{\text{traversant}}$$

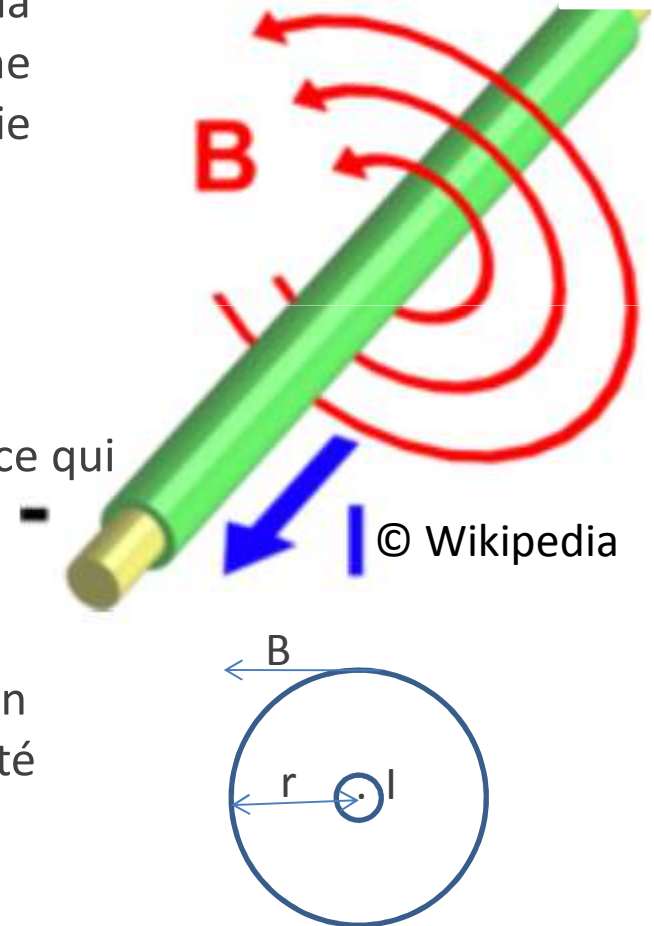
Pour un fil infini dans lequel circule I : B ne dépend que de la distance r au fil et est tangentiel. On applique le théorème d'Ampère le long d'un cercle de rayon r dont l'axe de symétrie est le fil dans lequel circule le courant à mesurer:

$$B = \mu_0 I / (2\pi r)$$

B est mesuré avec une sonde à effet Hall placée dans une pince qui permet de maîtriser la distance r .

Si on place entre la sonde à effet Hall et le fil (dans la pince) un anneau constitué par un matériau magnétique de perméabilité relative μ_r :

$$B = \mu_0 \mu_r I / (2\pi r)$$



QCM

Quel est l'intérêt de placer un matériau magnétique entre le fil dans lequel circule le courant électrique à mesurer et le capteur à effet Hall?

- 1. augmenter l'étendue de mesure**
- 2. augmenter la sensibilité**
- 3. améliorer la linéarité**
- 4. maîtriser la distance entre le capteur et le fil**

6. Mesure de forts courants électriques

Mesure par induction



Jusqu'à 1500 A...