

Travaux Dirigés de l'UE 2E102 « Sources d'énergie électrique et capteurs »



1. Production d'énergie électrique : origine nucléaire – origine hydraulique.....	1
2. Énergie solaire et systèmes photovoltaïques.....	6
3. Conversion d'énergie (1) – Effets thermoélectriques	11
4. Conversion d'énergie (2) – Énergie éolienne.....	15
5. Utilisation domestique de l'énergie électrique	18
6. Comment choisir un capteur ?	20
7. <i>Cool & quiet</i>	24
8. Un opacimètre pour Beer & Lambert – Application : détection de gaz	27
9. Circuits de conditionnement pour capteurs de déformation	31

**Les textes de TD sont à préparer avant la séance.
Apporter en TD calculatrice et petit matériel (crayon, règle, etc.)**

SOMMAIRE DÉTAILLÉ

1. Production d'énergie électrique : origine nucléaire – origine hydraulique	1
1. Étude de la production d'une centrale nucléaire	1
2. Étude de cas : dimensionnement d'une petite centrale hydraulique	3
2. Énergie solaire et systèmes photovoltaïques	6
1. Bilan radiatif à la surface de la Terre	6
2. Éclairement optimal de panneaux solaires inclinés	7
3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	8
4. Ingénierie des systèmes photovoltaïques innovants : bâtiment à énergie positive	8
3. Conversion d'énergie (1) – Effets thermoélectriques	11
1. Qu'est-ce-que l'effet Peltier ?	11
2. Sélection d'un module Peltier pour refroidissement	12
3. Générateur thermoélectrique	13
4. Conversion d'énergie (2) – Énergie éolienne	15
1. Quelle est la puissance du vent ?	15
2. Rendement maximum du rotor : limite de Betz	15
3. Estimation de la production d'énergie électrique d'un parc d'éoliennes en Occitanie	16
5. Utilisation domestique de l'énergie électrique	18
1. Rappels de cours	18
2. Étude d'une installation électrique	18
6. Comment choisir un capteur ?	20
1. Sécurité d'une alimentation au gaz	20
2. Reflux dans les soupapes	21
3. Quel capteur de température pour une centrale nucléaire	22
4. Une boussole électrique	23
7. Cool & quiet	24
Préambule : principe de la régulation de température	24
1. La thermistance CTN, un capteur de température	24
2. Circuit de détection de base : pont diviseur et amplificateur	25
3. Amélioration du circuit : ajout d'un trigger	26
8. Un opacimètre pour Beer & Lambert – Application : détection de gaz	27
1. Émission d'un flux optique	27
2. Mesure de la lumière	28
3. Application : détection de gaz dans un gazoduc	30
9. Circuits de conditionnement pour capteurs de déformation	31
1. Simple montage potentiométrique	31
2. Pont à une seule jauge dit « quart de pont »	31
3. Pont à deux jauges dit « demi-pont »	32
4. Pont à deux jauges et amplification	32
5. Performances des différentes chaînes de mesure	32

1. PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

À l'heure actuelle, les sources d'énergie sont en majorité de nature fossile (charbon, gaz, pétrole...). Mais la demande sans cesse croissante en énergie ne peut être soutenue indéfiniment en raison de l'épuisement de ces ressources d'une part et de l'impact néfaste sur l'environnement de leur combustion d'autre part. Nous allons ici étudier deux modes de production d'énergie électrique : source nucléaire (énergie fossile) et source hydraulique (énergie renouvelable), toutes deux à faible empreinte carbone.

1. Étude de la production d'une centrale nucléaire*

Aujourd'hui, l'énergie nucléaire représente 73% de la production d'électricité en France. Le parc, exploité par EDF, est composé de 58 réacteurs nucléaires, d'une puissance de 900 à 1450 MW. La loi de transition énergétique, promulguée en août 2015, est venue pérenniser sur le long terme un socle d'énergie nucléaire à 50% de la production totale d'électricité.

La majorité des réacteurs actuellement en exploitation dans le monde sont des réacteurs de 2^{ème} génération. En France, ils appartiennent à la filière à eau sous pression dite REP (Réacteur à Eau Pressurisée), une technologie américaine adaptée par EDF. Ils sont entrés en service à partir des années 1970. Ils répondaient à la nécessité d'atteindre une meilleure compétitivité de l'énergie nucléaire et d'améliorer l'indépendance énergétique, dans un contexte de fortes tensions sur le cours des énergies fossiles (choc pétrolier).

Le schéma de principe d'une centrale nucléaire de la filière REP est représenté sur la figure 1.1. Des valeurs de puissances mises en jeu dans une telle centrale (combustible : uranium 235) sont rassemblées dans le tableau 1.1.

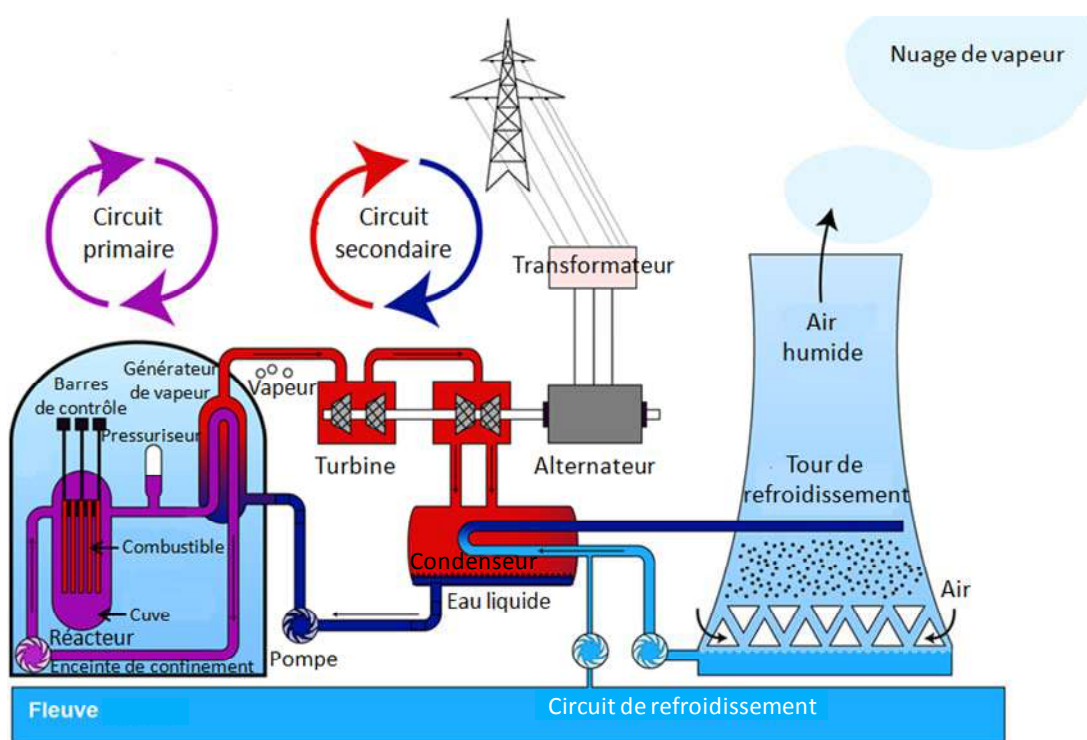


Figure 1.1. Schéma de principe d'une centrale nucléaire de la filière REP. Source : d'après Wikipedia.

Tableau 1.1. Puissances mises en jeu dans une centrale nucléaire de la filière REP.

Circuit primaire		Circuit secondaire	
Puissance du réacteur	3800 MW	Puissance en sortie de l'échangeur	3762 MW
Puissance à fournir au pressuriseur	1400 kW	Puissance en sortie de la turbine	1292 MW
Nombre de pompes	3	Puissance en sortie de l'alternateur	1266 MW
Puissance à fournir à une pompe	5400 kW	Puissance totale à fournir aux pompes	16,4 MW

1.1. Bilan de puissance

- À partir de la figure 1.1, décrire le fonctionnement de la centrale nucléaire.
- Compléter le schéma-bloc (figure 1.2) représentant le bilan de puissance de la centrale en précisant la nature de la puissance en entrée et/ou sortie des principaux éléments constitutifs.
- À partir du tableau 1.1 et en s'aidant du schéma-bloc, déterminer :
 - ✓ le rendement du circuit primaire ;
 - ✓ le rendement du circuit secondaire ;
 - ✓ le rendement de l'alternateur.
- En déduire la puissance absorbée, la puissance utile et la puissance perdue.
- Calculer le rendement global de la centrale nucléaire.

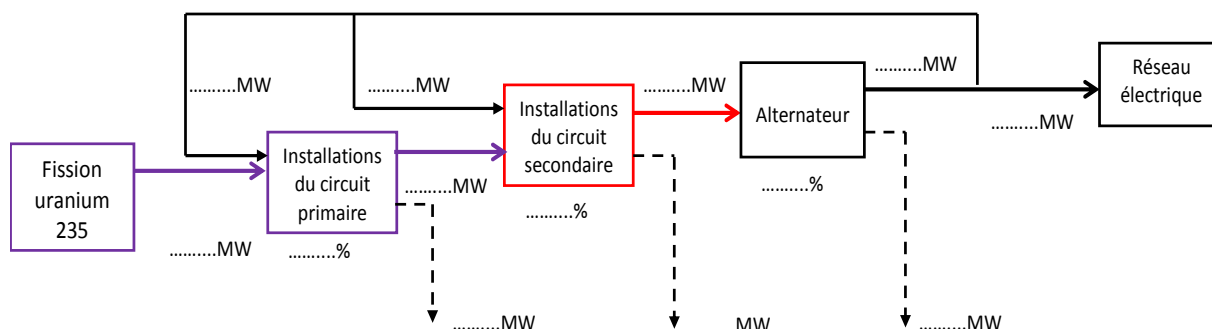


Figure 1.2. Schéma-bloc représentant le bilan de puissance de la centrale nucléaire

1.2. Production d'énergie

Le facteur de charge de la centrale nucléaire est de 75,7%.

- Calculer l'énergie directement produite par les réactions nucléaires.
- Sachant que 1 g d'uranium 235 libère environ 82 GJ lors de la fission des noyaux, calculer la masse d'uranium 235 nécessaire pour un an de fonctionnement de la centrale.
- Calculer l'énergie électrique fournie sur une année (en J et en Wh).
- Combien de réacteurs nucléaires de ce type faudrait-il pour produire 531,3 TWh d'énergie électrique (production d'électricité en France en 2016) ?
- Calculer le pourcentage de l'électricité nucléaire dans le mix énergétique français. Comment peut-on expliquer la différence avec la valeur indiquée dans le texte introductif ? Avec quel type de centrale est fait le complément ?
- Les quantités émises de gaz à effet de serre sont données dans le tableau 1.2. Calculer la masse de CO_2 émise sur une année par la centrale nucléaire. Comparer avec la masse de CO_2 qui aurait été émise par une centrale thermique fonctionnant au fioul.

Tableau 1.2. Émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité
(www.rte-france.com et www.iea.com).

Source d'énergie	Émission de CO ₂ (g/kWh)	Source d'énergie	Émission de CO ₂ (g/kWh)
Nucléaire	6	Hydraulique	4
Gaz naturel	460	Éolien	3 à 22
Pétrole	670	Solaire	60 à 150
Charbon	960		

2. Étude de cas : dimensionnement d'une petite centrale hydro-électrique** (d'après une étude de faisabilité réalisée par le cabinet MHyLab)

Le lac artificiel d'irrigation de la commune d'Icogne en Suisse, situé à 1416 m d'altitude, présente un trop-plein déversé dans le torrent du Pontec. Ce torrent se jette dans le bassin de compensation (situé à 919 m d'altitude) de la centrale hydro-électrique de Croix raccordée électriquement au réseau en 16 kV. L'objectif est de turbiner le trop-plein, en utilisant la chute entre le lac d'Icogne et le bassin de compensation et de déverser toute l'eau turbinée dans ce même bassin (cf. figure 1.3).

Pour cela, une conduite forcée sera posée entre le lac et le bassin. Le local de turbinage sera construit à 920 m d'altitude, à proximité de la centrale de Croix. Le débit Q d'équipement de l'installation sera de 250 l/s. Il s'agit du débit maximum disponible pendant 15 jours sur la période de turbinage s'étendant entre le 15 mars et le 15 octobre de chaque année.

Embauché(e) dans un cabinet d'ingénieurs, vous êtes chargé(e) de dimensionner la conduite forcée et la turbine ainsi que d'évaluer la production électrique de cette petite centrale hydro-électrique.



Figure 1.3. (En haut) Le lac d'Icogne, situé à 1416 m d'altitude, est maintenu à niveau par un trop-plein équipé d'une grille et se déversant dans le torrent du Pontec.

(En bas, à gauche) Bassin de compensation, situé à 919 m d'altitude, de la centrale hydro-électrique de Croix.

(En bas, à droite) Plan de situation. Le local de turbinage sera situé à proximité du bassin, à 920 m d'altitude.

Source : MHyLab, *Petite centrale hydro-électrique sur le réseau d'irrigation de la commune d'Icogne : étude de faisabilité*, Rapport final (Janvier 2007). www.mhyllab.com

Données :

- ✓ Accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- ✓ Température moyenne de l'eau : $T_{\text{eau}} = 10^\circ\text{C}$;
- ✓ Masse volumique de l'eau à 10°C : $\rho = 999,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- ✓ Viscosité dynamique de l'eau à 10°C : $\eta = 1,308 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Expressions utiles (les variables sont définies dans le texte) :

- ✓ Nombre de Reynolds (sans dimension) : $Re = v_c D_c \rho / \eta$;
- ✓ Perte de charge (en mCE, mètre de colonne d'eau) : $\Delta H_p = \lambda L_c v_c^2 / D_c 2g$;
- ✓ Vitesse spécifique (paramètre constructeur) : $N_s = n \sqrt{P} / H_n^{5/4}$ (avec n en tr/min, P en KW et H_n en m).

Mise en route

Dessiner un schéma général de l'installation hydro-électrique qui est ici envisagée et décrire le rôle de chacun des éléments constitutifs.

2.1. Dimensionnement de la conduite forcée

La conduite forcée d'une longueur $L_c = 1850 \text{ m}$ entre la prise d'eau et la centrale sera fabriquée en fonte ductile revêtue. Son diamètre D_c est déterminé afin de limiter les pertes de charge et d'assurer un rendement de conduite d'au moins 90% au débit d'équipement. Deux diamètres de conduite sont envisagés : $D_{c1} = 300 \text{ mm}$ et $D_{c2} = 350 \text{ mm}$.

- a. Calculer les valeurs de vitesse v_c de l'eau dans la conduite pour les deux diamètres.
- b. En utilisant l'abaque de Moody (cf. Annexe, figure A.1.1), déterminer le coefficient de perte de charge linéaire λ (lié au frottement de l'eau contre la paroi de la conduite et à la viscosité de l'eau).
- c. En déduire les pertes de charge ΔH_p et les chutes nettes H_n pour les deux diamètres. Conclure sur le choix du diamètre de la conduite forcée.
- d. Calculer la puissance hydraulique P_{hyd} .

2.2. Dimensionnement de la turbine

- a. Déterminer le type de turbine à choisir en s'aidant du diagramme de la figure A.1.2 (Annexe). Quelle puissance peut-on alors escompter avec ce type de turbine ?

Une étude préliminaire a montré que le choix d'une turbine à 1 injecteur était peu pertinent en raison de la variabilité des débits. On considère donc ici une turbine à 2 injecteurs identiques.

- b. Calculer la vitesse c_j du jet d'eau à la sortie d'un injecteur de rendement $\eta_i = 97\%$.
- c. Calculer le diamètre d_j du jet d'eau à la sortie d'un injecteur.
- d. La puissance mécanique $P_{\text{méca}}$ fournie à l'arbre de la turbine est donnée par l'expression suivante :

$$P_{\text{méca}} = \rho Q u (c_j - u) (1 - \phi_A \cos \beta),$$

- ✓ u (en m/s) est la vitesse périphérique de la roue ;
- ✓ ϕ_A (sans unité) est un coefficient lié au frottement de l'eau sur l'auget ;
- ✓ β est l'angle d'inclinaison du jet après avoir frappé l'auget (cf. figure 1.4).

Pour quelle vitesse u de la roue $P_{\text{méca}}$ est-elle maximale ? Calculer la valeur maximale de $P_{\text{méca}}$ avec $\phi_A = 0,95$ et $\beta = 165^\circ$. Calculer le rendement η_T de la turbine.

- e. La vitesse spécifique N_s de la turbine est d'environ 15. En déduire la valeur théorique de la vitesse de rotation n_{th} (en tr/min) de la roue. Dans la pratique, la fréquence f de l'alternateur couplé de façon synchrone à la turbine est directement proportionnelle à la vitesse de rotation n . En déduire la valeur réelle de la vitesse de rotation de la roue : n (en tr/min) puis ω (en rad/s).
- f. Calculer le diamètre D de la roue ainsi que le couple C qui s'exerce sur cette roue.

2.3. Production d'énergie électrique

- Calculer le nombre de pôles de l'alternateur.
- L'alternateur présente un rendement $\eta_A = 92,7\%$. Calculer la puissance électrique $P_{\text{élec}}$ fournie.
- À partir de la figure A.1.3, évaluer la production d'énergie électrique annuelle de la centrale.

2.4 Les centrales hydro-électriques en général : Même s'il y a peu d'émission de CO_2 par les centrales hydro-électriques (cf. tableau 1.2), discuter l'impact négatif sur l'environnement que peuvent avoir des centrales avec de larges retenues.

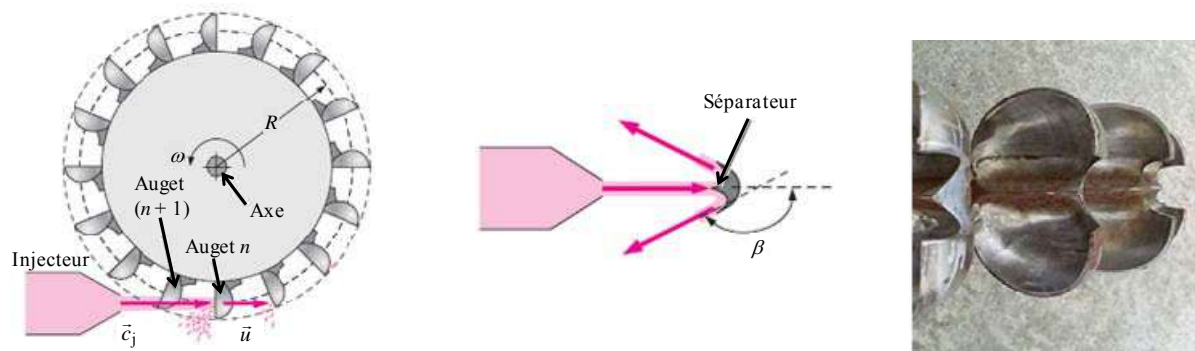


Figure 1.4. Principe d'une turbine à action (cf. Questions 2.2) et photographie du détail des augets.

Sources : Schémas d'après Y.A. Çengel and J.M. Cimbala, *Fluids mechanics: fundamentals and applications*, 1st Ed., McGraw-Hill (2006). Photographie : Wikipedia.

RÉDACTION : A. DÉGARDIN

2. ÉNERGIE SOLAIRE ET SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

Le Soleil est une source d'énergie essentielle à la vie sur Terre et inépuisable à notre échelle de temps : en effet, l'énergie solaire qui baigne la Terre est 10000 fois supérieure à la demande énergétique globale de la population pour encore cinq autres milliards d'années !

Nous allons d'abord quantifier le potentiel énergétique solaire à la surface de la Terre en évaluant l'influence de l'effet de serre. Puis nous déterminerons l'éclairement de panneaux en fonction de leur inclinaison. Nous modéliserons ensuite d'un point de vue électrique une cellule photovoltaïque. Nous terminerons avec une étude d'ingénierie relative à la problématique de l'habitat durable qui est pertinente à notre époque où le secteur du logement absorbe 42% de la consommation énergétique du pays : nous dimensionnerons l'installation photovoltaïque d'un bâtiment innovant à énergie positive.

1. Bilan radiatif à la surface de la Terre

1.1. Le Soleil et la Terre : contexte énergétique*

Le Soleil émet un rayonnement thermique (figure A.2.1, fournie en annexe) qui peut être modélisé par celui d'un corps noir à la température absolue T_S .

- Évaluer la valeur de T_S .
- Évaluer l'existance M_S à la surface du Soleil. En déduire la puissance totale rayonnée P_S (en YW) puis l'énergie totale rayonnée W_S pendant 1 h (en YWh).
- En s'aidant de la figure 2.1, exprimer puis estimer la constante solaire E_0 . En déduire la puissance totale P_{tot} (en PW) reçue par la Terre puis l'énergie totale W_{tot} reçue pendant 1 h (en EWh).
- En réalité, la Terre présente vis-à-vis du rayonnement solaire un albédo moyen $\alpha \approx 0,31$. De plus, pour effectuer un bilan radiatif, on considère que l'irradiance E_0 reçue par la Terre se répartit sur toute sa surface. Exprimer puis calculer l'irradiance moyenne E_{moy} à la surface de la Terre.
- On assimile la Terre à un corps noir en équilibre radiatif avec le Soleil. Calculer la température moyenne d'équilibre T_{moy} de la surface de la Terre. Commenter le résultat.

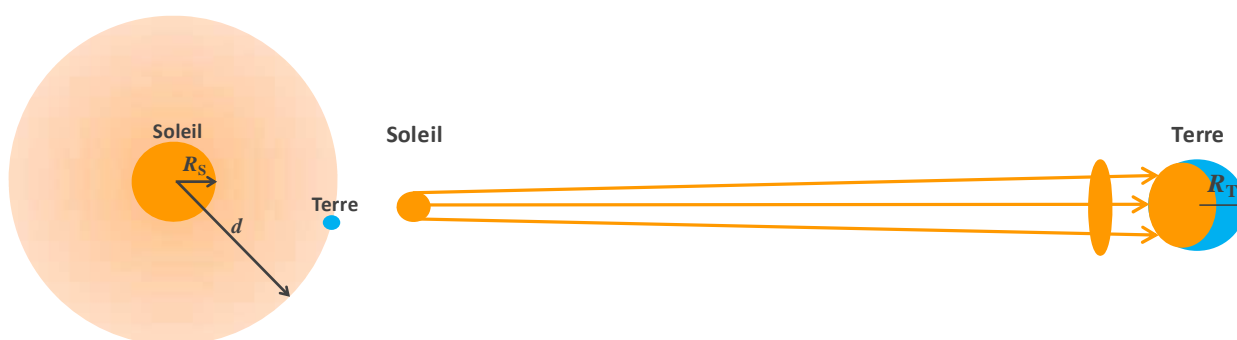


Figure 2.1. Représentations du système Terre-Soleil.

Données et expression utiles :

- ✓ Rayon du Soleil : $R_S = 696000 \text{ km}$;
- ✓ Rayon de la Terre : $R_T = 6370 \text{ km}$.
- ✓ Distance Terre-Soleil : $d = 1 \text{ UA} = 149,6 \times 10^9 \text{ m}$;
- ✓ Constante de Stefan : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$;
- ✓ Loi du déplacement de Wien : $\lambda_{\max} (\text{m}) = 2,898 \times 10^{-3} / T (\text{K})$

1.2. Équilibre radiatif de la Terre – Effet de serre**

Nous considérons désormais l'influence de l'atmosphère sur le bilan radiatif à la surface de la Terre. Pour cela, nous utilisons un modèle simplifié du système Terre / atmosphère (figure 2.2) en formulant les hypothèses suivantes :

- ✓ Les interactions entre le rayonnement solaire et l'atmosphère relèvent essentiellement des courtes longueurs d'onde (visible et proche infrarouge – $\lambda < 2 \mu\text{m}$), alors que celles entre l'atmosphère et le rayonnement émis par la surface de la Terre relèvent essentiellement des grandes longueurs d'onde (infrarouge moyen et infrarouge lointain).
 - ✓ L'atmosphère est partiellement transparente pour le rayonnement solaire : le coefficient de transmission vaut $\beta = 0,7$. L'albédo moyen de la Terre avec son atmosphère vaut $\alpha \approx 0,31$.
 - ✓ L'atmosphère est partiellement opaque au rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre : le coefficient de transmission vaut $\gamma = 0,1$.
 - ✓ L'atmosphère absorbant ainsi du rayonnement s'échauffe et sa température est T_{atm} . Elle rayonne comme un corps noir, à la fois vers la Terre et vers le haut.
 - ✓ Pour simplifier les notations, on appelle « F » toutes les puissances émises ou reçues par unité de surface. Ainsi, $F_i = E_0 / 4$.
- a. On suppose que le système Terre + atmosphère est à l'équilibre thermique. Écrire le bilan radiatif correspondant.
 - b. On suppose que l'atmosphère est à l'équilibre thermique. Écrire le bilan radiatif correspondant. Exprimer F_T en fonction de E_0 , α , β et γ . Effectuer l'application numérique.
 - c. En déduire l'expression de la température moyenne de la surface de la Terre T_T . Effectuer l'application numérique et commenter.

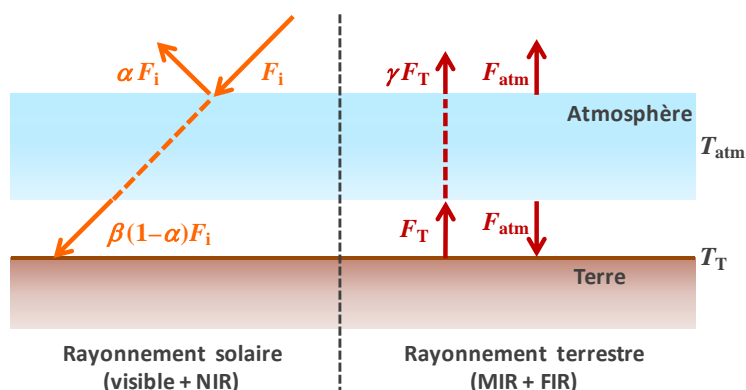


Figure 2.2. Modèle simplifié d'équilibre radiatif de la Terre avec son atmosphère.

2. Éclairement optimal de panneaux solaires inclinés**

On souhaite installer des panneaux solaires à Paris ($\Phi \approx 48,85^\circ \text{ N}$; $L = 2,35^\circ \text{ E}$). Les expressions utiles sont rappelées dans l'annexe A.2.2.

- 2.1. Calculer la position du Soleil à 15h (heure solaire) le jour de l'équinoxe d'automne. Retrouver cette position à partir de l'abaque fourni en annexe (figure A.2.3).
- 2.2. Calculer la hauteur du Soleil au point de culmination (midi solaire = zénith local) pour les jours suivants : équinoxe de printemps, solstice d'été, équinoxe d'automne et solstice d'hiver.
- 2.3. Déterminer l'angle d'inclinaison β_p des panneaux lors de chacun de ces quatre jours pour avoir le maximum d'éclairement. Quelle inclinaison choisir finalement dans le cas de panneaux fixes ?
- 2.4. Pour l'angle d'inclinaison précédemment choisi (avec une orientation plein Sud), évaluer l'irradiance solaire au midi solaire le jour de l'équinoxe d'automne de la présente année.

3. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque*

- 3.1. Représenter le schéma du circuit électrique équivalent à une cellule réelle. Préciser le rôle des différents éléments du circuit.
- 3.2. En utilisant les lois de Kirchhoff, déterminer une relation entre le courant d'intensité I délivré par la cellule et la tension V aux bornes de celle-ci. Le critère d'idéalité n est supposé égal à 1.
- 3.3. Que devient la relation précédente lorsque la cellule est en circuit ouvert ? court-circuitée ?
- 3.4. Que deviennent ces relations dans le cas idéal où les pertes résistives sont négligées ?

4. Ingénierie de systèmes photovoltaïques innovants : bâtiment à énergie positive

Solar Decathlon Europe est une compétition universitaire, biennale et internationale, organisée pour développer la recherche dans le domaine de l'énergie solaire. Le défi est de concevoir et réaliser un prototype d'habitat de 70 m² à énergie positive.

Le prototype CANOPEA®, lauréat 2012, porté par une équipe française, préfigure ce que pourrait être un étage d'habitation individuelle et un dernier étage de communs d'un collectif de petits immeubles baptisés *home-towers* (figure 2.3). La toiture du dernier étage est recouverte de panneaux photovoltaïques permettant de fournir une partie de l'énergie électrique nécessaire au bâtiment. Cette installation est complétée par un ensemble de batteries réalisées en technologie LiFePO₄ (lithium fer phosphate), le tout étant relié au réseau de distribution électrique (figure 2.4).

Embauché(e) dans un cabinet d'ingénieurs, vous êtes chargé(e) du dimensionnement de l'installation photovoltaïque.



Figure 2.3. Dans le cadre du *Solar Decathlon Europe* 2012, le projet CANOPEA® a proposé un concept de *home-towers* (à gauche), inspiré de la canopée (partie supérieure de la forêt) qui capte 95% de l'énergie solaire. Le prototype réalisé (à droite) est un étage d'habitation individuelle et un dernier étage de communs.

Photos : © Maxime Bonnevie (architecte, *Project Manager* de l'équipe lauréate *Rhône-Alpes*).

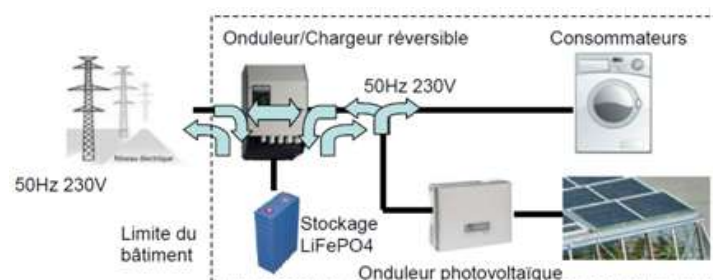


Figure 2.4. Synoptique général de l'installation électrique du bâtiment à énergie positive. Les flèches indiquent les sens possibles de transfert de l'énergie.

Mise en route

Décrire le rôle de chacun des éléments constitutifs de la figure 2.4.

4.1. Évaluation des capacités de production*

- a. La zone utile du toit permettant la pose de modules photovoltaïques est de $9 \times 9 \text{ m}^2$. Évaluer le potentiel photovoltaïque en kWh par an pour une réalisation en technologie monocristalline d'un rendement de 14% sachant que l'irradiation solaire sur un plan horizontal est de $3,67 \text{ kWh/m}^2$ par jour en moyenne. On néglige ici l'inclinaison de 5° du toit et l'orientation de celui-ci.
- b. L'installation est constituée de 36 modules SW 250 mono dont les caractéristiques sont données sur la figure A.2.4 en annexe. Calculer la puissance crête susceptible d'être fournie par cette installation.
- c. Placer les grandeurs U_{co} , I_{cc} , U_{mpp} , I_{mpp} sur la caractéristique courant-tension (figure A.2.5) d'un module sous conditions de test standard. Représenter sur la figure A.2.5 la caractéristique puissance-tension d'un module. Calculer le facteur de forme FF .
- e. Représenter sur la figure A.2.6 les évolutions de la caractéristique courant-tension lorsque :
 - ✓ l'éclairement diminue de 50% à température constante de 25°C (courbe a) ;
 - ✓ la température augmente de 25°C à 70°C à éclairement constant de 1000 W/m^2 (courbe b).
- f. Représenter sur la figure A.2.7 les évolutions de la caractéristique puissance-tension lorsque :
 - ✓ l'éclairement diminue de 50% à température constante de 25°C (courbe c) ;
 - ✓ la température augmente de 25°C à 70°C à éclairement constant de 1000 W/m^2 (courbe d).

4.2. Choix de connexions**

Les modules sont connectés à deux onduleurs SunEnzy 600 E dont la documentation est donnée en annexe (figure A.2.8). Ce modèle d'onduleur possède 3 entrées MPPT indépendantes. L'onduleur peut fonctionner avec au moins une de ses entrées MPPT utilisée.

- a. Quel est l'intérêt de disposer de plusieurs entrées MPPT ?
- b. Proposer différentes connexions possibles des 36 modules aux deux onduleurs. Sélectionner la meilleure configuration en justifiant ce choix.

4.3. Influence des ombrages**

Chaque module est constitué de 60 cellules dont les caractéristiques courant-tension sont données pour plusieurs éclairements sur la figure 2.5.

- a. Pourquoi placer une diode Schottky en antiparallèle toutes les 20 cellules ?

Une cellule peut être masquée partiellement ou totalement par des salissures ou des ombrages. Considérons le cas de la figure 2.6 pour lequel la cellule grisée ne laisse passer que 400 W/m^2 alors que le reste du module reçoit 1000 W/m^2 .

- b. Représenter sur la figure A.2.9 l'évolution de la caractéristique courant-tension lorsque cette cellule est ombrée (courbe e).

Étudions le fonctionnement particulier des cellules placées dans la branche présentant un ombrage lorsque celles-ci sont court-circuitées par la diode Schottky. On suppose que la tension aux bornes de cette diode est nulle. On suppose aussi que les cellules sont idéales (pas de pertes résistives).

- c. Calculer le courant de saturation I_0 (sous éclairement de 1000 W/m^2 et pour une température de 25°C).

- d. Rechercher le point de fonctionnement (tension $V_{\text{cell-o}}$, courant $I_{\text{cell-o}}$) de la cellule ombrée à 60% dans la branche court-circuitée. Calculer la puissance $P_{\text{cell-o}}$ associée à la cellule ombrée.

Données utiles :

- ✓ Constante de Boltzmann : $k_B = 1,381 \times 10^{-23}$ J/K.
- ✓ Charge élémentaire : $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C.

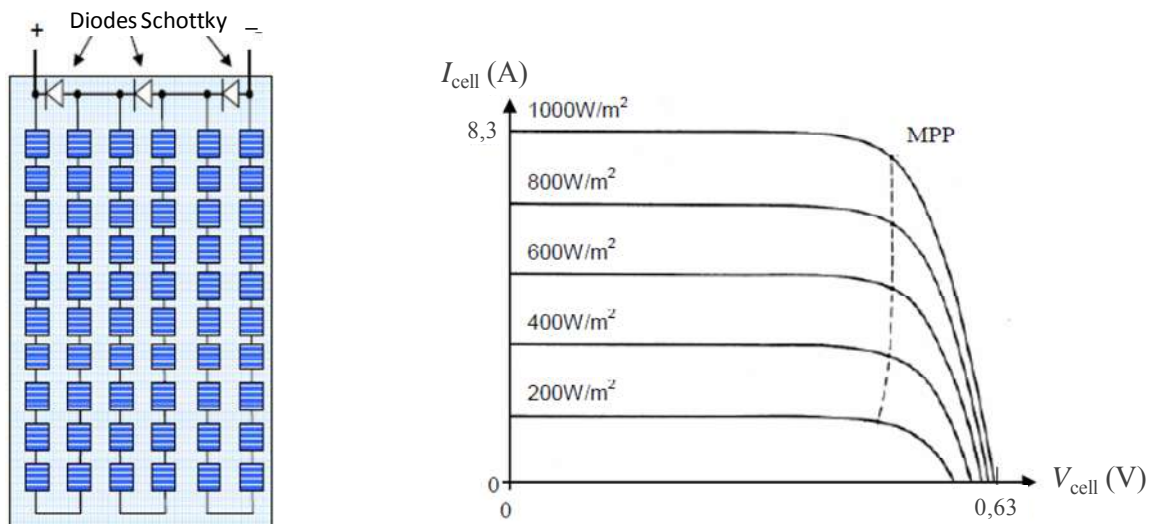


Figure 2.5. (À gauche) Schéma de connexion d'un module de 60 cellules photovoltaïques.
(À droite) Caractéristiques courant-tension d'une cellule pour différents éclaircements.

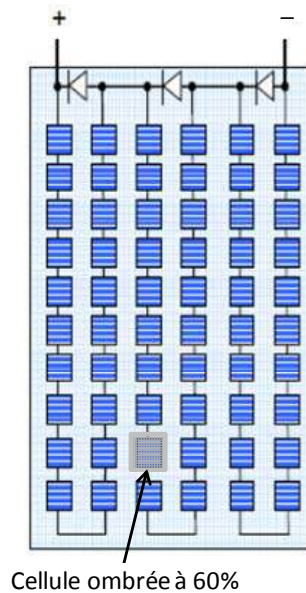


Figure 2.6. Module de 60 cellules dont une est ombrée (ici à 60%).

3. CONVERSION D'ÉNERGIE (1) – ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ↔ ÉNERGIE THERMIQUE : EFFETS THERMOÉLECTRIQUES

L'effet Peltier est un effet thermoélectrique, connu depuis le XIX^{ème} siècle, se manifestant par la conversion d'un courant électrique en production ou absorption de chaleur. Les applications sont essentiellement situées dans le domaine du refroidissement : après l'étude du principe physique, nous en étudierons ici un exemple via la sélection d'un module Peltier pour une valise réfrigérée. L'effet inverse (appelé effet Seebeck) à savoir la conversion de chaleur en électricité est aussi possible : les rendements sont très bas, néanmoins suffisants pour par exemple, recharger une montre électronique avec la chaleur corporelle.

1. Qu'est-ce-que l'effet Peltier ?

Introduction : L'effet Peltier est un **effet thermoélectrique**, qui apparaît lorsqu'un courant électrique d'intensité I traverse une jonction métal / semi-conducteur dopé, formant un contact ohmique. On observe, au niveau de la jonction et selon le sens du courant, l'absorption de chaleur (mode refroidissement) ou la production de chaleur (mode chauffage) autre que par effet Joule. Les quantités de chaleur échangées sont très petites : elles sont proportionnelles à I et dépendent de la nature des deux matériaux ainsi que de la température T . La quantité de chaleur produite ou absorbée par unité de temps (soit la puissance thermique) est $Q_p = \Pi I$, où Π est le coefficient de Peltier du matériau semi-conducteur. L'essentiel des applications des modules Peltier se trouvent dans le domaine du refroidissement (cf. Exercice 2) :

- ✓ Refroidissement des puces d'ordinateurs
- ✓ Valises médicales (couplage avec le photovoltaïque pour la production du courant)
- ✓ Valises pique-nique refroidies par le courant continu des batteries des véhicules
- ✓ Climatisation des cabines des conducteurs de train
- ✓ Petits réfrigérateurs-bars (silencieux)
- ✓ Etc.

Ces modules peuvent être aussi utilisés comme générateurs de puissance DC avec un rendement qui reste néanmoins encore limité (cf. Exercice 3).

1.1. Principe**

Soit un barreau semi-conducteur dopé N (longueur L , section S , conductivité électrique σ et conductivité thermique κ) présentant un contact ohmique à chacune de ses deux extrémités et parcouru par un courant d'intensité I (figure 3.1). La différence de température entre les deux jonctions vaut ΔT . La chaleur est **dégagée** quand le courant traverse la jonction dans le sens métal → semi-conducteur dopé N (**jonction chaude**). La chaleur est **absorbée** quand le courant traverse la jonction dans le sens semi-conducteur dopé N → métal (**jonction froide**). Les phénomènes seraient inversés dans le cas d'un semi-conducteur dopé P.

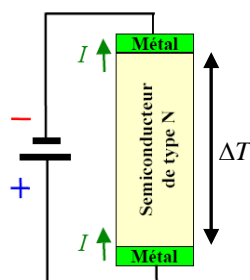


Figure 3.1. Principe de l'effet Peltier.

- Déterminer l'expression de la puissance thermique absorbée Q_A au niveau de la jonction froide. On supposera que la puissance thermique créée par effet Joule Q_J se répartit pour moitié entre l'extrémité froide et l'extrémité chaude.
- Déterminer l'expression de l'intensité I_{\max} du courant permettant d'obtenir une puissance thermique absorbée maximale $Q_{A\max}$ au niveau de la jonction froide. En déduire $Q_{A\max}$.
- Sous des conditions d'équilibre, la différence de température ΔT atteint une valeur d'équilibre ΔT_{\max} au-delà de laquelle le refroidissement ne se fait plus ($Q_{A\max} = 0$). Déterminer l'expression de ΔT_{\max} .

1.2. Sélection de matériaux*

L'efficacité d'un matériau (semi-conducteur, métal) en conversion d'énergie par effet thermoélectrique est caractérisée par une grandeur Z_T , appelée **facteur de mérite** du matériau : $Z_T = II^2\sigma/\kappa T \equiv S_T^2 T \sigma / \kappa$, où S_T est le **pouvoir thermoélectrique** du matériau ($S_T > 0$ pour un semi-conducteur de type P et $S_T < 0$ pour un semi-conducteur de type N).

- Quelle est la dimension de Z_T ?
- Exprimer S_T en fonction de II . Préciser l'unité usuelle de S_T .
- Pour les matériaux semi-conducteurs et métalliques indiqués dans le tableau 3.1, déterminer les valeurs de Z_T et de S_T à 300 K. Conclure.

Tableau 3.1.

Matériau	II (USI)	σ (USI)	κ (USI)
Bi_2Te_3 dopé N	6×10^{-2}	10^5	1,7
Bi_2Te_3 dopé P	7×10^{-2}	10^5	1,45
Cu	$5,5 \times 10^{-4}$	$5,9 \times 10^7$	390
W	$3,3 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^7$	167

2. Sélection d'un module Peltier pour refroidissement

Dans un module Peltier commercial, les éléments semi-conducteurs thermoélectriques sont à la fois de types N et P, montés en alternance et reliés électriquement en série (figure 3.2, gauche). Sur ce schéma, la face supérieure est la face froide par laquelle la chaleur sera absorbée et donc sur laquelle l'élément à refroidir sera mis en contact. La face inférieure est la face chaude reliée à un réservoir thermique ou puits de chaleur de faible résistance thermique afin que le module soit capable d'évacuer la chaleur (figure 3.2, droite).

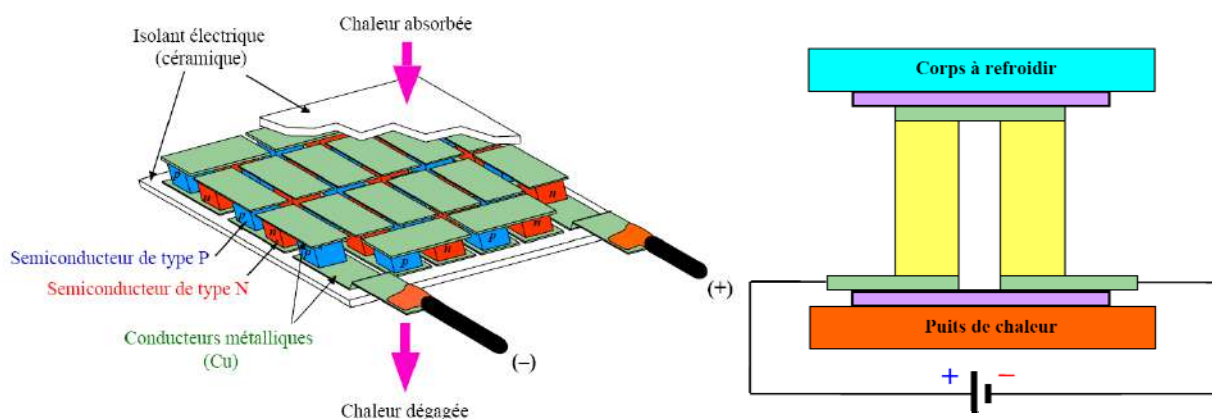


Figure 3.2. À gauche : Structure typique d'un module Peltier du commerce. À droite : Détail.

2.1. Mise en route

Compléter le schéma de la figure 3.2-droite : préciser la nature des matériaux semi-conducteurs, le sens du courant ainsi que le sens des porteurs de charge dans chaque élément semi-conducteur.

2.2. Diagramme fonctionnel de performance*

Sur la figure A.3.1 en annexe est représenté le diagramme fonctionnel de performance d'un module Peltier du commerce (CP60440, www.cui.com) permettant d'établir la relation entre la tension V appliquée, l'intensité I du courant fourni, la différence de température $\Delta T = T_h - T_c$ (où T_h est la température de la face chaude et T_c celle de la face froide) ainsi que la puissance thermique absorbée Q_A .

Déterminer les valeurs de I et Q_A pour $T_c = 20^\circ\text{C}$ et sous $V = 10\text{ V}$.

2.3. Sélection d'un module Peltier**

Soit une valise médicale dont les spécifications sont données dans le tableau 3.2. On propose trois modules Peltier sur les figures A.3.2 à A.3.4 en annexe. Il s'agit de sélectionner le modèle adéquat de refroidisseur (un module ou plusieurs modules identiques) sachant que l'intensité du courant à fournir ne doit pas dépasser 2 A.

- Calculer l'aire S de la surface de la valise au centre de l'isolant thermique.
- Calculer la conductance thermique surfacique totale G_{tot} .
- Calculer la puissance thermique entrant dans la valise par conduction thermique. On considère qu'il s'agit de la seule puissance thermique à absorber (pas d'autre source de chaleur), soit Q_A .
- En considérant une marge de sécurité de 25%, sélectionner le ou les modules adéquats. Discuter.

Tableau 3.2. Spécifications de la valise réfrigérée.

Dimensions externes	$560 \times 260 \times 160\text{ mm}^3$
Dimensions internes	$500 \times 200 \times 100\text{ mm}^3$ (10 l)
Conductance thermique surfacique de la surface externe G_{se}	$20\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Conductance thermique surfacique de la surface interne G_{si}	$10\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Épaisseur de l'isolant thermique (polyuréthane) entre les deux surfaces e	30 mm
Conductivité thermique du polyuréthane κ	0,025 W/m·K
Température intérieure à maintenir	5°C
Température ambiante	30°C

3. Générateur thermoélectrique*

Une équipe de chercheurs du *Korean Advanced Institute of Science and Technology* a développé un générateur d'électricité qui fonctionne avec la chaleur corporelle (figure 3.3). Très fin (environ $500\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur), léger (environ $0,13\text{ g/cm}^2$) et particulièrement flexible, il peut simplement se coller sur la peau pour alimenter un petit appareil, comme une montre connectée. Ce générateur est composé de matériaux thermoélectriques de type N (Bi_2Te_3) et de type P (Sb_2Te_3) qui sont déposés sur un verre spécifique. Le pouvoir thermoélectrique de la jonction utilisée vaut $S = 140\text{ }\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$.

La production énergétique de ce nouveau générateur, pour une surface de $10 \times 10\text{ cm}^2$, est estimée à environ 35 mW avec une différence de température $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ entre la peau et l'air ambiant. La batterie lithium-ion d'une montre connectée comme l'*Apple Watch* a une capacité de 200 mA h sous 3,5 V.



Figure 3.3. Générateur thermoélectrique fondé sur la chaleur corporelle.

Source : Sun Jin Kim et al., *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7, p. 1959

- 3.1.** Sur quel mécanisme de conversion s'appuie ce générateur ? Décrire succinctement son principe de fonctionnement.
- 3.2.** Quelle est la différence de potentiel engendrée par une seule jonction ? Combien de jonctions doit-on associer pour obtenir une tension de 3,5V ? L'association est-elle série ou parallèle ? Cet ensemble de jonctions constitue le bracelet des photographies ci-dessus.
- 3.3.** Pour charger la batterie de la montre connectée, on associe 10 bracelets tels que décrits ci-dessus afin d'obtenir une surface active de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Comment doit-on les associer (série, parallèle, autre) ? Quel courant pourra-t-il être produit ? Combien de temps faudra-t-il pour charger complètement la batterie de la montre connectée si son état de charge est à 60 % ?

RÉDACTION : A. DÉGARDIN (EXERCICES N°1 ET N°2) ET A. MIGAN (EXERCICE N°3)

4. CONVERSION D'ÉNERGIE (2) – ÉNERGIE MÉCANIQUE → ÉNERGIE ÉLECTRIQUE : ÉNERGIE ÉOLIENNE

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. En effet, l'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent lié à l'échauffement et à l'évaporation de l'eau, tous deux engendrés par le Soleil, la rotation de la Terre et l'effet Coriolis. 1 à 2 % de l'énergie solaire reçue par la Terre est ainsi convertie en vent, soit 50 à 100 fois plus que l'énergie convertie en biomasse par photosynthèse. Après des rappels sur le principe de fonctionnement d'une éolienne et l'extraction de ses paramètres pertinents, nous estimerons la production d'énergie électrique d'un parc éolien réel.

Les expressions utiles pour ce TD sont rappelées dans l'annexe A.4.1.

1. Quelle est la puissance du vent ?*

On considère une masse d'air de masse volumique ρ , animée d'une vitesse \vec{v} , traversant une section S , représentée schématiquement sur la figure 4.1. La masse volumique de l'air sec dans les conditions standard (température $T = 15^\circ\text{C}$ et pression $p = 1 \text{ atm}$) est $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

- 1.1. **Puissance disponible.** Exprimer la puissance disponible P_d de la masse d'air. Commenter.
- 1.2. **Énergie disponible.** Calculer l'énergie disponible W_d (en kWh) contenue dans une masse d'air traversant une section $S = 1 \text{ m}^2$ pendant une durée $\Delta t = 100 \text{ h}$ qui se décompose selon les régimes suivants : 50 h à $v_1 = 4 \text{ m/s}$ + 50 h à $v_2 = 8 \text{ m/s}$.
- 1.3. **Contrainte sur le rotor.** Considérons la figure 4.2, où le moyeu est situé à une hauteur $H = 55 \text{ m}$ au-dessus du sol constitué de champs dégagés doucement vallonnés. Le diamètre du rotor vaut $D = 70 \text{ m}$. En utilisant les données de l'annexe A.4.2, estimer le rapport entre la puissance spécifique au point le plus haut $P_{S\text{max}}$ (en W/m^2) et celle au point le plus bas $P_{S\text{min}}$ (en W/m^2) que l'extrémité d'une pale peut atteindre. On suppose négligeable la variation avec l'altitude de la masse volumique de l'air ($\rho_{\text{air}} = 1,225 \text{ kg/m}^3$). Commenter.

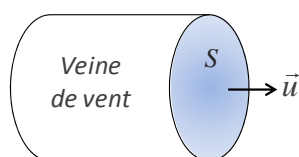


Figure 4.1. Veine de vent.

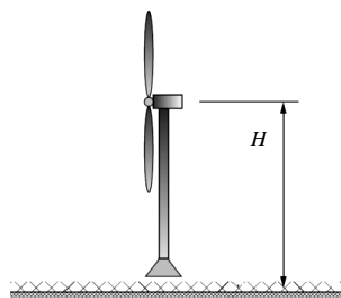


Figure 4.2. Éolienne placée dans un champ.

2. Rendement maximum d'un rotor : limite de Betz*

La puissance disponible P_d calculée précédemment est une puissance théorique, qu'il n'est pas possible de récupérer intégralement. En pratique, le vent est freiné par le rotor et la vitesse du vent en amont du rotor (v_1) est donc plus grande que celle en aval (v_2). Mais la masse d'air qui traverse la surface S balayée par le rotor reste identique. Il en résulte un élargissement de la veine du vent (tube de courant) à l'arrière du rotor (figure 4.3).

3.1. Coefficient de performance du rotor

- À quelle vitesse n_R (en tr/min) le rotor tourne-t-il quand son fonctionnement s'effectue pour une valeur de *TSR* (*tip-speed ratio*) égale à 4 et que la vitesse du vent vaut $u = 10$ m/s ?
- Calculer le coefficient de performance du rotor sous ces conditions. Comparer avec la valeur fournie par le constructeur (figure A.4.4).
- Si la génératrice tourne à 1500 tr/min, quel est le rapport de vitesse nécessaire pour accorder la vitesse du rotor à celle de la génératrice ? Calculer le nombre de pôles de la génératrice.

3.2. Énergie totale annuelle produite par le parc éolien

- Estimer la durée pendant laquelle une éolienne ne produit pas d'énergie.
- Estimer la durée pendant laquelle une éolienne fonctionne à sa puissance nominale. En déduire l'énergie produite.
- Compléter les cases vides du tableau 4.1, pour l'estimation de la production d'énergie par une éolienne pour des vitesses de vent comprises dans les intervalles allant de 3,5 à 14,5 m/s.
- Calculer la production annuelle totale d'énergie produite par le parc éolien. Comparer avec la valeur annoncée par le fournisseur d'énergie.

Tableau 4.1.

Intervalle des vitesses (m/s)	Puissance P_r (kW)	Vitesse u (m/s)	$f(u)$	Nbre heures par an	Energie (MWh)
3.5-4.5	56		0.1117	978.55	54.80
4.5-5.5	127				
5.5-6.5	240		0.1181	1034.26	248.22
6.5-7.5	400		0.1084	949.49	379.80
7.5-8.5	626		0.0934	818.03	512.09
8.5-9.5	892		0.0759	664.61	592.84
9.5-10.5	1223				
10.5-11.5	1590		0.0425	372.28	591.92
11.5-12.5	1900		0.0294	257.65	489.53
12.5-13.5	2080		0.0194	169.53	352.63
13.5-14.5	2230		0.0121	106.15	236.72
Totaux				6910.64	4216.54

RÉDACTION : O. MEYER (EXERCICES N°1 ET N°2) ET A. DÉGARDIN (EXERCICES N°1 ET N°3)

5. UTILISATION DOMESTIQUE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Après quelques rappels sur les diverses formes de puissance en régime sinusoïdal permanent (régime harmonique), nous illustrons ces concepts en les appliquant à une installation électrique domestique.

1. Rappels de cours*

Un dipôle linéaire soumis à une tension sinusoïdale $u(t) = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \theta)$, où U est la tension efficace, est parcouru par un courant sinusoïdal d'intensité $i(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \theta')$, où I est l'intensité efficace.

- 1.1. Exprimer la puissance instantanée $p(t)$ dissipée dans le dipôle. Commenter chacun des deux termes apparaissant dans l'expression finale.
- 1.2. On pose : $\varphi = \theta - \theta'$. Que représente φ ? Ecrire l'expression de la puissance active P , en faisant apparaître la puissance apparente S . Préciser les unités.
- 1.3. On appelle \tilde{U} et \tilde{I} les amplitudes complexes de la tension et de l'intensité, respectivement. Exprimer P en fonction de ces grandeurs complexes.
- 1.4. À partir de l'expression de la puissance apparente complexe \tilde{S} , rappeler l'expression de la puissance réactive Q . Préciser son unité.
- 1.5. Exprimer les puissances actives et réactives pour :
 - a. un dipôle résistif,
 - b. un dipôle inductif,
 - c. un dipôle capacitif.

2. Étude d'une installation électrique**

L'installation électrique dans les habitations doit être effectuée selon la norme actuellement en vigueur NFC 15-100, dont les points clés sont données sur la figure A.5.1, en annexe. Le tableau électrique d'un petit appartement (figure 5.1) est composé :

- ✓ d'un **compteur électrique** ;
- ✓ d'un **disjoncteur de branchement** qui permet la coupure générale d'électricité dans l'appartement et qui alimente en monophasé sous une tension sinusoïdale de valeur efficace $U = 230$ V et de fréquence $f = 50$ Hz avec un courant nominal d'intensité efficace $I = 30$ A. Il présente un pouvoir de coupure d'intensité efficace $I_{cu} = 2$ kA pour un facteur de puissance $\cos\varphi = 0,7$;
- ✓ de deux **interrupteurs différentiels** pour la protection des personnes : placé en début de rail, ce type d'interrupteur permet la détection des fuites de courant avec un seuil de déclenchement de 30 mA ;
- ✓ une série de **disjoncteurs divisionnaires** (huit au maximum par interrupteur différentiel) pour la protection des appareils électriques : placés en aval d'un interrupteur différentiel, ils permettent la détection des surcharges d'intensité.

2.1. Disjoncteur de branchement. Calculer la puissance maximale souscrite auprès du fournisseur ainsi que la puissance maximale supportée par l'installation en cas de court-circuit.

2.2. Interrupteurs différentiels. En s'aidant de l'annexe A.5.1, justifier les valeurs des seuils de déclenchement indiquées sur la figure 5.1 pour les deux interrupteurs différentiels.

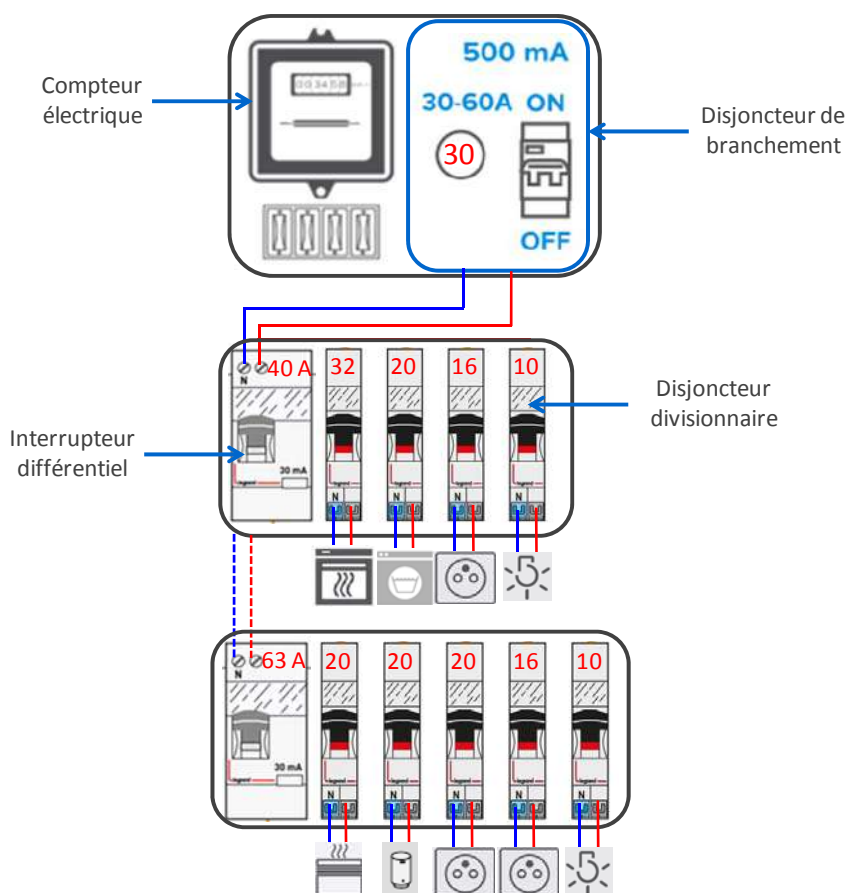


Figure 5.1. Installation électrique domestique. Les nombres en rouge correspondent aux intensités (en A) de déclenchement des interrupteurs et disjoncteurs. Le circuit de mise à la terre n'est pas représenté.

2.3. Branchement des dispositifs de cuisson

Les dispositifs de cuisson (quatre plaques + un four) se comportent comme des résistances. La puissance d'une plaque est $P_p = 1 \text{ kW}$ et celle du four est $P_F = 2,5 \text{ kW}$. Calculer l'intensité efficace I_1 du courant en sortie du disjoncteur spécifique si tous les dispositifs de cuisson sont en fonctionnement.

2.4. Branchement du lave-linge

Le lave-linge se comporte comme une résistance R en parallèle avec une bobine d'inductance L . Sa puissance est $P_2 = 2 \text{ kW}$ pour un facteur de puissance $\cos \varphi_2 = 0,8$.

- Calculer la puissance apparente S_2 , l'intensité efficace I_2 du courant et la puissance réactive Q_2 du lave-linge.
- Déterminer les expressions de R et L . Effectuer l'application numérique.

2.5. Branchement du lave-linge avec un radiateur électrique d'appoint

En raison du dysfonctionnement de la prise « 20 A » du lave-linge et d'un convecteur, le propriétaire décide de brancher en parallèle le lave-linge et un radiateur d'appoint sur une même prise reliée à l'autre disjoncteur 20 A. La puissance du radiateur est $P_3 = 2,5 \text{ kW}$.

- Calculer l'intensité efficace I_3 du courant qui alimente le radiateur ainsi que la résistance R_3 du radiateur.
- Calculer la puissance maximale que la prise reliée au disjoncteur 20 A peut supporter. Calculer la puissance associée à la mise en parallèle des deux équipements électriques sur cette prise. Commenter la validité du résultat obtenu.

6. COMMENT CHOISIR UN CAPTEUR ?

L'objectif du TD est de montrer, à l'aide de divers exemples, comment choisir un capteur en tenant compte de critères tels l'étendue de mesure, la rapidité, la sensibilité, la consommation, etc.

1. Sécurité d'une alimentation au gaz

On souhaite mesurer la température d'une flamme rouge (supposée égale à environ 1020°C dans tout l'exercice).

1.1. Pourquoi utiliser un thermocouple (TC, annexe A.6.3) plutôt qu'une thermistance à coefficient de température négatif (sonde CTN, annexe A.6.1) ou une sonde Pt100 (annexe A.6.2) ? Quel type de TC privilégier parmi ceux présentés dans l'annexe A.6.3 ?

1.2. Quelle est la tension aux bornes du TC si ses deux extrémités ne sont reliées à rien, dans le cas où :

✓ la jonction est à 20°C et les extrémités du TC à 20°C ?

✓ la jonction est à 1020°C et les extrémités du TC à 20°C ?

Quelle est l'incertitude sur la température de la flamme si le voltmètre a une précision de $\pm 1\%$?

Afin d'éviter dans une plaque de cuisson un débit de gaz sans flamme (suite à un courant d'air par exemple), on peut utiliser le dispositif décrit sur la figure 6.1.

1.3. Les fils reliant le TC à la bobine magnétique ont une résistance totale équivalente $R_{\text{fils}} = 39 \text{ m}\Omega$. La bobine magnétique présente une résistance interne $R_{\text{bob}} = 39 \text{ m}\Omega$. Justifier cette faible valeur de résistance de bobine.

1.4. Préciser la tension aux bornes du TC et l'état du dispositif (arrivée de gaz fermée / ouverte) quand :

✓ il n'y a ni flamme ni gaz ;

✓ il y a une flamme et du gaz ;

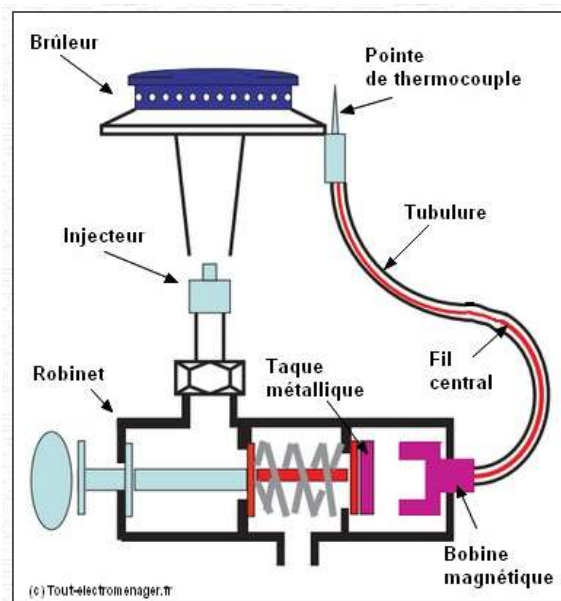
✓ il y a du gaz mais pas de flamme.

Le dispositif de sécurité joue-t-il bien son rôle ?

1.5. Que se passe-t-il si le TC ou les fils de liaison sont défectueux ? Quels sont les avantages de ce TC pour cette application et de manière plus générale ?

Figure 6.1 – Sécurité par thermocouple d'une alimentation au gaz.

D'après le théorème d'Ampère, un électroaimant (enroulement d'un fil électrique autour d'un matériau magnétique) permet de convertir de l'énergie électrique (un courant I) en énergie magnétique (un champ magnétique H). Un courant d'au minimum 100 mA crée ici un champ magnétique suffisamment élevé pour « coller » la taque métallique (et magnétique) mobile à l'électroaimant.

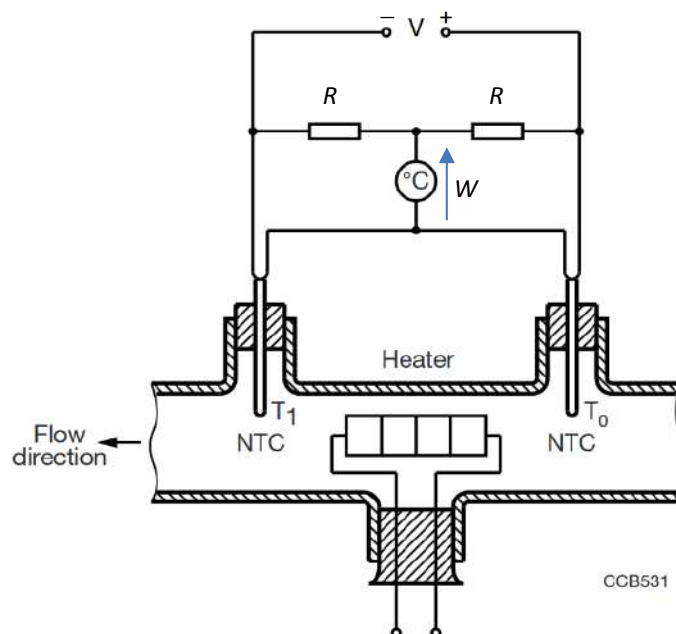


2. Reflux dans les soupapes

Le schéma de principe d'un débitmètre (*flow meter*) est présenté sur la figure 6.2. Il est composé entre autres d'une résistance utilisée comme chauffe-rette (*heater*) et de deux sondes CTN (annexe A.6.1, ligne encadrée). La chauffe-rette fournit la puissance thermique permettant l'augmentation locale de la température du fluide. Le fluide est ici de l'air dont la température est comprise entre 20 et 30°C, même quand la chauffe-rette fonctionne. Ce type de capteur est par exemple largement utilisé pour détecter le reflux de l'air lors de l'ouverture et de la fermeture des soupapes d'un moteur de voiture : la tension (analogique) de sortie (appelée par la suite W) est alors une entrée du calculateur commandant le moteur.

Figure 6.2 – *Flow measurement of fluids* (schéma tiré de la note d'application « NTC Thermistors » du fabricant de composants Vishay).

NB : V est un générateur de tension et « °C » représente un voltmètre mesurant la tension de sortie W du capteur. NTC (ang.) = CTN (fr.).



2.1. Exprimez la tension W en fonction des résistances R_0 et R_1 des deux sondes CTN, des deux résistances de même valeur R du pont de Wheatstone et de V .

On pose : $R_0 = R + r_0$ et $R_1 = R + r_1$, où r_0 et r_1 dépendent de la température et valent 0 quand la température de la CTN est de 25°C (voir le choix de R en conséquence, question 2.2).

On suppose de plus que les variations de température sont faibles (ce qui est réaliste, car la chauffe-rette ne peut faire varier la température à ses alentours que de quelques degrés au plus), d'où : $r_0/R \ll 1$ et $r_1/R \ll 1$.

2.2. Que doit valoir R ? Que doit valoir V pour que la puissance dans chaque sonde CTN soit de 10 μW à 25°C ? Pourquoi se limiter à cette valeur de puissance ?

2.3. Exprimez W en fonction de V , R , r_0 et r_1 ? AN : que vaut W pour $T_1 = 26^\circ\text{C}$ et $T_0 = 24^\circ\text{C}$?

2.4. Quel est le sens de l'écoulement en fonction du signe de W ?

2.5. Pourquoi utiliser des sondes CTN plutôt que des sondes de platine (Pt100 ou autres) ?

NB : La différence de température entre les deux sondes CTN dépend aussi de la vitesse du flux : ce paramètre est donc calculable à partir de la mesure de la tension W . Néanmoins, du fait de la complexité du problème thermique (géométrie des résistances et du conduit, turbulence...), il devient nécessaire d'utiliser des logiciels de simulations et d'effectuer des mesures d'étalonnage.

3. Quel capteur de température pour une centrale nucléaire? (à faire par vous-même)

Dans une centrale nucléaire (et plus généralement dans une centrale thermique), l'eau et la vapeur engendrée par la source d'énergie ont des rôles majeurs (cf. TD1). Afin d'assurer la bonne marche de la centrale et le respect des normes, il est indispensable de contrôler la température dans les différents circuits d'eau. Pour le circuit primaire, il existe deux types de circuit :

- circuit ouvert : l'eau froide est pompée par exemple dans la mer, puis rejetée tiède dans celle-ci. L'eau pompée doit être suffisamment froide pour le bon fonctionnement de la centrale et ne doit pas être trop chaude une fois rejetée dans la mer pour ne pas trop perturber l'écosystème ;
- circuit fermé : l'eau plus ou moins froide pompée par exemple dans un fleuve est refroidie à la sortie du condenseur par une tour aéro-réfrigérante. Une partie de l'eau est évacuée sous forme de vapeur, l'autre partie (alors froide) est réinjectée dans le circuit primaire.

Afin de contrôler ces différentes températures dont les écarts sont très importants (de l'eau froide à la vapeur dans la turbine), un ingénieur souhaite utiliser un même type de capteur de température de contact, résistif ou thermocouple (en prenant soin d'isoler les fils de liaison conducteurs), fonctionnant entre 0°C et 1000°C. Après recherche documentaire, il hésite entre trois capteurs : une sonde CTN (annexe A.6.1, le modèle à étudier est encadré en rouge), une sonde Pt100 (annexe A.6.2, elle sera considérée comme un capteur linéaire) et des thermocouples (annexes A.6.3 et A.6.4).

- 3.1. Que vaut la sensibilité $S = dR/dT$ et le coefficient thermique de résistance (TCR) des capteurs résistifs autour de 50°C ? En déduire le meilleur capteur du point de vue de la sensibilité et du TCR. Quelle est l'incertitude sur la température due à l'ohmmètre dont la précision est de 1% ?
- 3.2. Plutôt que d'utiliser un ohmmètre, on préfère mesurer une tension variant avec la température, car une tension est traitée plus facilement qu'une résistance (e.g. pour des opérations d'amplification, de filtrage ou de conversion analogique-numérique). L'ingénieur place alors le capteur de résistance R_C dans un simple pont diviseur (R_C en série avec une résistance $R_A = R_C(T = 50^\circ\text{C})$; 2 V est appliquée aux bornes des deux résistances), la tension de sortie étant celle mesurée aux bornes de R_C . Comparer avec la tension de sortie des thermocouples.
- 3.3. Pourquoi choisir $R_A = R_C (T = 50^\circ\text{C})$? Pourquoi choisir une tension de 2 V alors qu'une plus grande valeur améliorerait la sensibilité ? Quelle est la différence de tension engendrée par une température passant de 50°C à 49°C pour ce circuit ? Comparer avec le plus sensible des thermocouples opérant sur la gamme 0°C – 1000°C (avec une mesure directement au voltmètre). Commenter. NB : nous verrons par la suite des circuits de conditionnement plus efficace (pont de Wheatstone, amplification, ...), il s'agit juste ici d'avoir un ordre de grandeur.
- 3.4. L'ingénieur souhaite aussi que le capteur soit linéaire sur toute la gamme de températures. Rappeler les avantages d'avoir un capteur linéaire. Quel capteur va-t-il finalement choisir ?
- 3.5. L'ingénieur mesure une tension de 27 mV avec un thermocouple de type K (borne « + » du voltmètre sur le fil en chromel), la jonction de référence étant à $T_{\text{ref}} = 0^\circ\text{C}$. En déduire la valeur de la température mesurée si on considère le capteur linéaire (on prendra donc pour le coefficient Seebeck une valeur moyenne). Même question si $T_{\text{ref}} = 25^\circ\text{C}$.
- 3.6. *Question facultative* : on prend en compte désormais le fait que le thermocouple choisi n'est pas parfaitement linéaire : la sensibilité est égale à la sensibilité moyenne trouvée précédemment plus ou moins une valeur à déterminer. Quelle est l'incertitude sur la mesure de la température qui en résulte ? Calculer la température mesurée avec $T_{\text{ref}} = 0^\circ\text{C}$ puis $T_{\text{ref}} = 25^\circ\text{C}$. Comment faut-il procéder pour ne pas subir cette incertitude (indice : utiliser l'annexe A.6.4) ?
- 3.6. Comment peut-on déterminer la température de référence ?
- 3.7. Conclure en répondant au titre de la séance « Comment choisir un capteur de température ? ».

4. Une boussole électronique

On se propose d'étudier un système de boussole électronique pour une application embarquée. Deux capteurs sont agencés de façon que les axes sensibles à l'induction magnétique B soient perpendiculaires (l'un mesure la composante parallèle et l'autre la composante perpendiculaire de B , figure 6.4). Deux technologies sont comparées : capteur magnétorésistif et capteur à effet Hall.

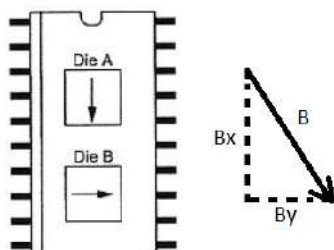


Figure 6.4. Circuit intégré pour la mesure de B . La composante B_x est mesurée par la *die* A, et la composante B_y par la *die* B.

4.1. Capteur magnétorésistif

Soit un capteur magnétorésistif intégré dans un pont de Wheatstone complet alimenté sous 5 V. Les caractéristiques du capteur sont fournies en annexe A.6.5.

- Quelle est sa plage de mesure ?
- Quelle est sa sensibilité ?
- Quelle est l'intensité du courant consommé ?

4.2. Capteur à effet Hall

Soit un capteur à effet Hall, alimenté sous 5 V et dont les caractéristiques sont fournies en annexe A.6.6.

- Quelle est sa plage de mesure ?
- Quelle est sa sensibilité ?
- Quelle est l'intensité du courant consommé ?

4.3. Dispositif complet

Le dispositif complet fonctionne sous 5 V. En plus de deux capteurs, le dispositif comprend un microcontrôleur, un afficheur et des circuits annexes qui consomment au total 5 mW. L'alimentation est fournie par une batterie d'une capacité de 500 mAh.

- Quelle est l'intensité du courant consommé par les circuits hors capteurs ?
- Pour un système comprenant deux capteurs magnétorésistifs, quelle est l'intensité du courant total consommé ? En déduire la durée d'utilisation en fonction de la capacité de la batterie.
- Pour un système comprenant deux capteurs à effet Hall, quelle est l'intensité du courant total consommé ? En déduire la durée d'utilisation en fonction de la capacité de la batterie.
- En ne tenant pas compte de la faible différence de consommation entre les deux types de capteur et sachant que l'induction magnétique terrestre est de l'ordre de 0,5 G, expliquer en quelques mots le type de capteur à retenir pour l'application envisagée.

7. COOL & QUIET

Les circuits électroniques s'échauffent, par exemple par effet Joule ou par une exposition au soleil. Pour ne pas dépasser une température risquant de modifier son comportement voire d'endommager le circuit, un ventilateur peut être placé près de celui-ci (« cool »). Plutôt que de tourner en permanence, il est préférable que le ventilateur se déclenche automatiquement quand une certaine température est atteinte. Quand la température est redevenue acceptable, le ventilateur doit s'arrêter. C'est pourquoi le système est dit aussi « quiet ». Ce TD prépare au TP4.

Préambule : principe de la régulation de température

De manière générale, réguler consiste à maintenir une grandeur physique dans un domaine souhaité : il s'agit ici de maintenir la température de l'environnement dans lequel est placé un circuit électronique inférieure à 40°C. Pour cela, le système est dit « bouclé » : **la température** est mesurée avec un capteur dont la variation de résistance est prise en compte dans le circuit de détection qui commande un ventilateur qui va lui-même agir sur **la température** (figure 7.1).

Un amplificateur de courant commandé par V_S est inséré entre le circuit de détection et le ventilateur, celui-ci fonctionnant avec un courant d'intensité ~ 50 mA, plus élevée que l'intensité du courant délivré par le circuit de détection à base d'AOP. Le ventilateur fonctionne en « tout ou rien » : il est en marche quand $V_S > 6$ V et arrêté sinon. Dans ce qui suit, nous nous concentrons sur l'étude détaillée de la sonde CTN et du circuit de détection.

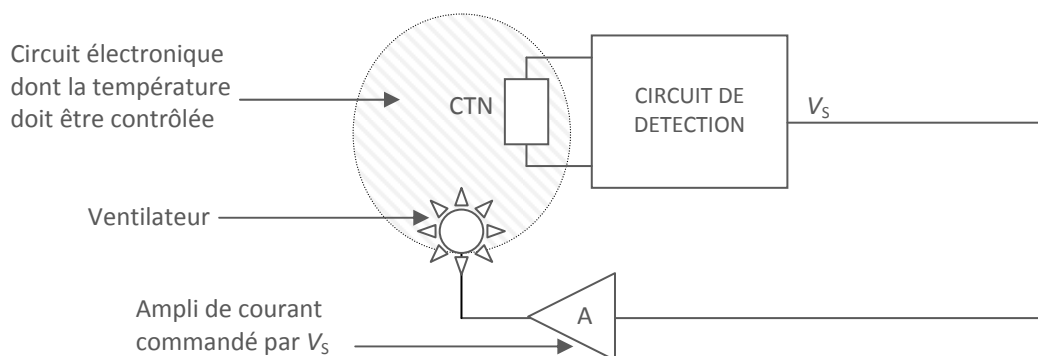


Figure 7.1. Synoptique du système de régulation de température.

1. La thermistance CTN

Pour déterminer la température de l'environnement à refroidir, on utilise une sonde CTN, dont la loi de variation de sa résistance R_C avec la température T est donnée par :

$$R_C(T) = R_0 \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (\text{éq. 7.1})$$

Pour le modèle utilisé lors du TP4 : $R_0 = 5 \text{ k}\Omega$ à $T_0 = 298 \text{ K}$ et $\beta = 3700 \text{ K}$ entre -40°C et $+125^\circ\text{C}$. La courbe $R_C(T)$ est fournie en annexe A.7.1.

- Que vaut R_C à 35°C ? à 40°C ?
- Rappeler pourquoi ce type de capteur est appelé sonde CTN.

2. Circuit de détection de base : pont diviseur et amplificateur

Pour commander le ventilateur, il est nécessaire d'obtenir une tension dépendant aussi de la température. C'est pourquoi la sonde CTN est placée dans un pont diviseur avec potentiomètre, délivrant ainsi une tension $V_{KM}(T)$ (figure 7.2). Les variations de V_{KM} étant très faibles, la tension est amplifiée avec un montage amplificateur non inverseur (l'AOP est alimenté entre $\pm E = \pm 12$ V). On appelle R_p la résistance totale du potentiomètre et R_C la résistance de la sonde CTN. La température ambiante T_{amb} est supposée égale à 25°C.

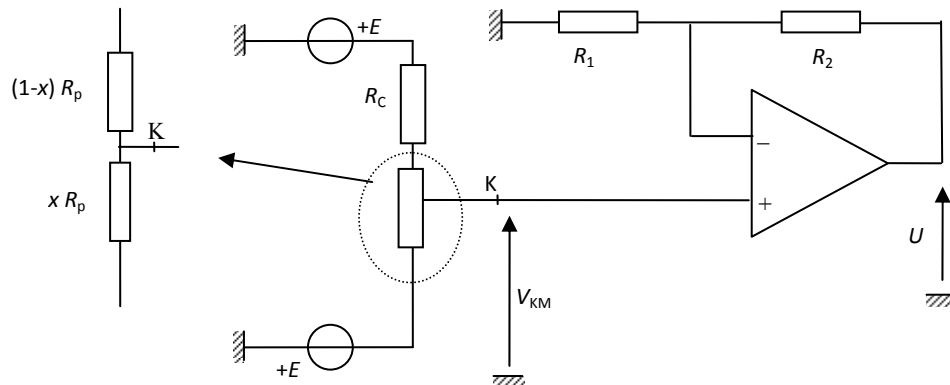


Figure 7.2. Circuit de détection de base.

2.1. Obtention d'une tension V_{KM} dépendant de la température

- Calculer la puissance dissipée dans la sonde CTN à 25°C pour $R_p = 100$ k Ω puis pour $R_p = 10$ k Ω . Conclure sur la meilleure valeur de R_p à choisir pour avoir une bonne finesse du capteur.
- Déterminer le générateur équivalent de Thévenin de l'ensemble $[R_C, (1-x)R_p, xR_p, \text{générateurs } E]$ entre K et la masse.
- V_{KM} dépend de T et de x . Pour pouvoir calculer $V_{KM}(T)$, on impose arbitrairement $V_{KM} = 0$ V à la température ambiante. En déduire la valeur de x . (NB : en TP, cette condition sera réalisée en réglant le potentiomètre à l'aide de sa vis). La tension V_{KM} dépend-elle de l'amplificateur non inverseur ? Pourquoi ?

2.2. Amplification de la tension V_{KM}

- Déterminer R_2/R_1 pour que le gain G de l'amplificateur non inverseur soit de 26.
- Tracer la tension de sortie U de l'amplificateur en fonction de T entre 290 et 340 K.
- Donnée : $V_{SAT+} = 11$ V. Quelle température ne doit-on pas dépasser pour rester en régime linéaire ?
- La tension U est appliquée directement à l'entrée de l'amplificateur de courant (figure 7.1 avec ici $V_s = U$) : à quelle température le ventilateur se met-il en marche ?
- Quel est l'inconvénient majeur du circuit de détection de la figure 7.2 ?

3. Amélioration du circuit : ajout d'un trigger

Pour pallier cet inconvénient, un trigger non inverseur (figure 7.3) est inséré entre le circuit de détection de base (figure 7.2) et l'amplificateur de courant. C'est donc désormais V_s , la tension de sortie du trigger, qui commande l'amplificateur de courant (figure 7.1).

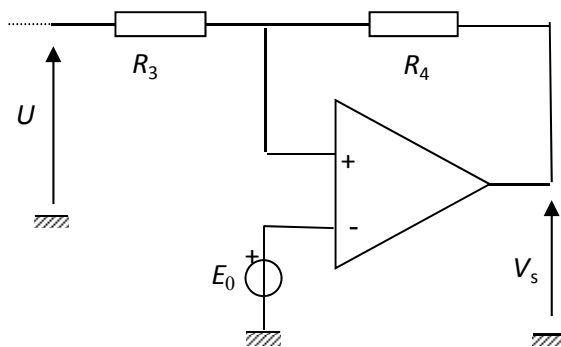


Figure 7.3. Trigger non inverseur.

- Quel est l'intérêt du trigger dans ce circuit de détection ?
- La tension U est-elle modifiée par l'ajout du trigger ? Pourquoi ?
- Exprimer les seuils de basculement haut et bas du trigger en fonction des éléments du montage, de V_{SAT+} et V_{SAT-} . Tracer l'allure de $V_S = f(U)$.
- Déterminer les seuils haut V_H et bas V_B du trigger pour que le ventilateur se mette en marche quand la température atteint $T_M = 40^\circ\text{C}$ et s'arrête quand elle est redescendue à $T_S = 35^\circ\text{C}$. Justifier l'ajout entre le pont diviseur et le trigger d'un montage amplificateur.
- AN : $E = \pm 12\text{ V}$, $V_{SAT+} = 11\text{ V}$, $V_{SAT-} = -10,5\text{ V}$. Compléter le tableau ci-dessous (tableau 7.1). [NB : En TP, E_0 sera réalisé à partir d'un potentiomètre (R_{pot2}) et de l'alimentation $E = +12\text{ V}$. La température ambiante peut être différente de 25°C : il faudra alors rectifier E_0].
- Les températures de basculement T_S et T_M seront-elles changées si la température ambiante change au cours du TP ?
- Malgré nos efforts, le client, un militaire, n'est pas tout à fait satisfait : il prétend que le système est trop bruyant et pas assez fiable. Quelle solution alternative pouvez-vous lui proposer ?

Tableau 7.1. Valeurs numériques (le potentiomètre de résistance R_p est réglé de façon que $V_S(T_{amb}) = 0\text{ V}$).

T_{amb} [°C]	x	R_p [kΩ]	G	R_2 [kΩ]	R_1 [kΩ]	T_S [°C]	T_M [°C]	$R_C(T_S)$ [kΩ]	$R_C(T_M)$ [kΩ]	V_B [V]	V_H [V]	R_4 [kΩ]	R_3 [kΩ]	E_0 [V]
25	21/40 = 0,525	100	26	100		35	40					10		

8. UN OPACIMÈTRE POUR BEER & LAMBERT – APPLICATION : DÉTECTION DE GAZ

Le montage étudié ici vise à vérifier expérimentalement une partie de la loi de Beer-Lambert (encore appelée loi de Bouguer), loi caractérisant l'absorption d'un signal lumineux suivant le milieu traversé. Des notions telles que modulation, filtrage et amplification et des composants tels que LED (sources de lumière) et photodiodes (capteurs optiques) seront utilisés. Ce TD prépare au TP5.

Capteur optique

Une chaîne de mesure optique se présente souvent selon le schéma de la figure 8.1. Un émetteur émet un flux optique ϕ_g (en W) qui est atténué lors de la traversée d'un milieu semi-transparent suivant la loi de Beer-Lambert. Le flux ϕ_r (en W) qui arrive sur le détecteur dépend de cette atténuation. Ainsi la mesure de ϕ_r permet d'obtenir des informations sur le milieu qui a modifié le flux lors de la propagation.

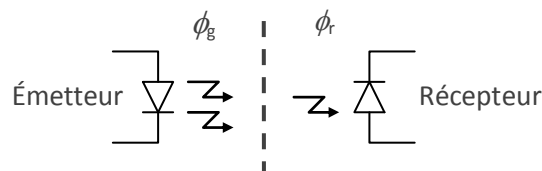


Figure 8.1. Modification du flux lors de la propagation.

1. Émission d'un flux optique

Une diode électroluminescente (DEL ou LED en anglais) polarisée en direct est souvent utilisée pour produire de la lumière dans le visible ou le proche infrarouge. Le flux créé ϕ_g est proportionnel au courant direct I_d traversant la diode : $\phi_g = K I_d$. Soit le schéma de la figure 8.2, où l'équation caractéristique de la LED est donnée par :

$$I_d = I_{ds} \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right], \quad (\text{éq. 8.1})$$

avec $I_{ds} = 1 \text{ nA}$ et $V_T = 125 \text{ mV}$.

La tension V_e présente une composante continue $V_e(0)$ pour polariser la LED et éventuellement une composante alternative $V_e(\omega) \cos(\omega t)$ pour moduler le flux créé.

- a. Calculer la valeur de la résistance R (Figure 8.2) pour polariser la LED à $I_d = 2 \text{ mA}$ quand $V_e = 6 \text{ V}$.

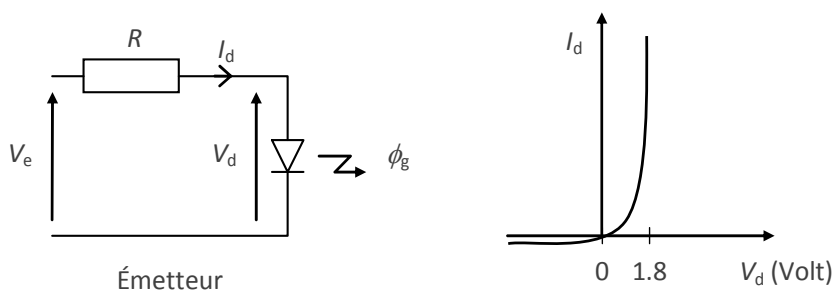
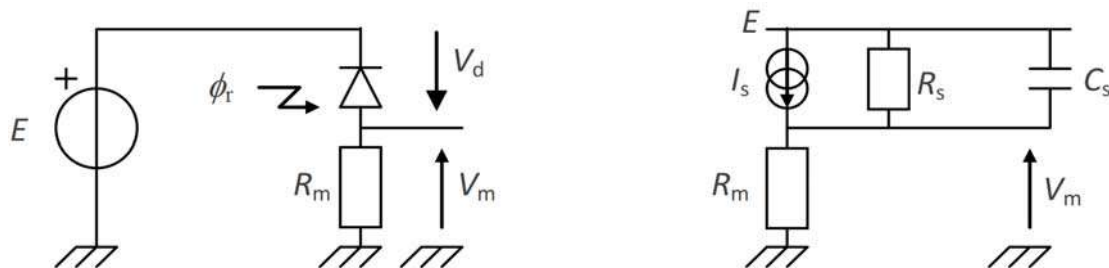


Figure 8.2. Circuit d'émission du flux lumineux et caractéristique d'une LED.

- On choisit $R = 2,2 \text{ k}\Omega$. Déterminer graphiquement à l'aide de la caractéristique $I_d(V_d)$ donnée en annexe A.8.1, le point de fonctionnement statique, i.e. en continu, (I_{d0}, V_{d0}) pour $V_e = 6 \text{ V}$.
- Déterminer l'expression de la résistance différentielle de la diode $r_d = dV_d/dI_d$ en supposant que $I_d \gg I_{ds}$.
- Donner le schéma électrique équivalent en alternatif petit signal du montage, la diode étant alors représentée uniquement par sa résistance différentielle r_d .
- Pour de faibles variations autour de (I_{d0}, V_{d0}) , exprimer $\Delta V_e/\Delta I_d$ en fonction de I_{d0} . En déduire $\Delta \phi_g/\Delta V_e$ en fonction de I_{d0} . Quelle relation doit exister entre I_{d0} et R pour que $\Delta \phi_g/\Delta V_e$ soit égal à une constante ?

2. Mesure de la lumière

Une photodiode polarisée en inverse est généralement utilisée pour mesurer un flux optique. La photodiode est modélisée par une source de courant réelle dont le courant de Norton $I_s = K' \phi_r$ est proportionnel au flux reçu. Son admittance de Norton est constituée d'une résistance R_s très grande en parallèle avec une capacité C_s . Pour déterminer le flux ϕ_r , on mesure la tension aux bornes d'une résistance R_m parcourue par le courant délivré par la photodiode selon le montage de la figure 8.3.



Pour s'affranchir de l'influence de la lumière ambiante, le flux est modulé : le courant I_s présente alors une composante continue $I_s(0)$ et une composante alternative $I_s(\omega) \cos(\omega t)$.

- Tracer sur la figure A.8.2.b fournie en annexe la droite de charge pour $E = 15 \text{ V}$ et $R_m = 100 \text{ k}\Omega$. Justifier le schéma équivalent de la photodiode polarisée en inverse. Estimer la valeur de K' .
- Déterminer le schéma équivalent en continu du récepteur. En déduire la tension continue mesurée $V_m(0)$. Sous quelle condition $V_m(0)$ est proportionnelle à $\phi_r(0)$?
- Déterminer le schéma équivalent en alternatif petits signaux du récepteur. En déduire l'amplitude complexe de la tension alternative mesurée $V_m(\omega)$ ainsi que la sensibilité $S(\omega) = V_m(\omega)/\phi_r(\omega)$.
- Montrer que la sensibilité $S(\omega)$ chute à haute fréquence et déterminer sa fréquence de coupure f_c à -3 dB . Calculer f_c pour $R_m = 100 \text{ k}\Omega$, $R_s = 50 \text{ M}\Omega$ et $C_s = 40 \text{ pF}$. Comment modifier R_m pour augmenter la sensibilité dans la bande passante ? Quelle est la conséquence sur f_c ? En pratique, on préférera utiliser une valeur moyenne de R_m et amplifier ensuite la tension.

En réalité, le flux reçu comporte des parasites lumineux divers, en particulier :

- la lumière naturelle due au flux solaire (très variable selon l'exposition, l'heure et la nébulosité) : comparée aux autres signaux, c'est un flux parasite quasi-continu ($DC \rightarrow f = 0 \text{ Hz}$).
- la lumière artificielle associée aux sources électriques à 50 Hz qui produit un flux parasite à la fréquence $f_p = 100 \text{ Hz}$.

Pour éliminer ces parasites basse fréquence, on utilisera donc un filtre passe-haut, dont la fréquence de coupure f_1 doit être située à plus d'une décade de f_p c'est-à-dire à plusieurs kHz. La fréquence f_0 du

signal utile (qui a servi à moduler le flux émis) devra, elle, se situer bien au-delà de f_1 . Finalement, on devra vérifier que $f_p \ll f_1 \ll f_0$.

On insère ainsi un filtre passe-haut à la place de la résistance R_m dans le circuit de charge de la photodiode (figure 8.4). Mais, à cause de la capacité C_s , la photodiode elle-même se comporte comme un passe-bas (voir 2.c) : il s'agit donc de choisir $f_p \ll f_1 \ll f_0 \ll f_c$.

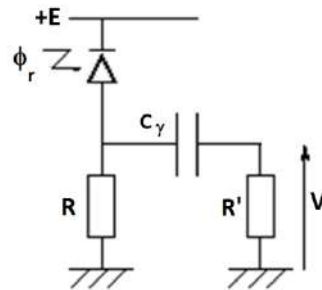


Figure 8.4. Circuit de réception : ajout du filtre.

- e. Quel est le rôle de la résistance R ? Quelle est la composante continue de V ?
- f. Donner le schéma équivalent petits signaux de ce circuit. En déduire la trans-impédance $V(\omega)/I_s(\omega)$ en fonction de la fréquence. La mettre sous la forme $\frac{\rho}{1+j(\frac{f}{f_b} - \frac{f_a}{f})}$. Déterminer les expressions de ρ , f_a et f_b .
- g. Donner les expressions asymptotiques à très basse et très haute fréquences de $V(\omega)/I_s(\omega)$. De quel type de filtre s'agit-il ? À quelle fréquence f_0 le courant dans la photodiode et la tension V sont-ils en phase ? On choisit $R = 100 \text{ k}\Omega$, $R' = 100 \text{ k}\Omega$ et $C_\gamma = 330 \text{ pF}$. Calculer f_a , f_b et f_0 et tracer l'allure du module de $|V(\omega)/I_s(\omega)|$ sur la figure A.8.3 en annexe. Quel est le taux de réjection des parasites du secteur ?

Pour améliorer la sensibilité, on complète le montage avec un amplificateur non-inverseur (figure 8.5) :

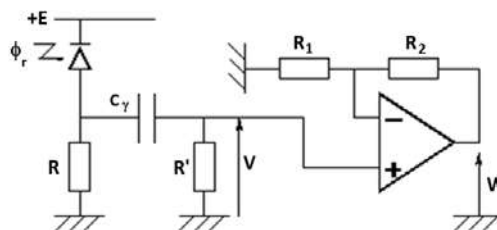


Figure 8.5. Circuit de réception : ajout de l'amplificateur non inverseur.

- h. Exprimer W/V en considérant que l'amplificateur opérationnel est parfait.

[Parenthèse sur le produit gain-bande : à cause d'imperfections de l'AOP, en particulier son temps de réponse, le gain du montage chute au-delà d'une certaine fréquence appelée fréquence de coupure, à la manière d'un filtre passe-bas. Le produit gain-bande est le gain dans la bande-passante, c'est-à-dire pour des fréquences inférieures à la fréquence de coupure (c'est le gain maximum ; par exemple, pour l'amplificateur non inverseur, $G_{\max} = 1 + R_2/R_1$), multiplié par la fréquence de coupure. Pour un modèle d'AOP et des valeurs de résistances données, ce produit est une constante].

- i. Le produit gain-bande de l'AO est de 3 MHz. On souhaite que la fréquence de coupure f_3 du montage amplificateur ne vienne pas limiter la bande-passante du récepteur : on impose donc que $f_3 > 10 f_0$. Quel gain maximum peut-on atteindre ?

- j. Rappeler la loi de Beer-Lambert, en particulier étendue aux matériaux homogènes et isotropes. Comment varie le pourcentage $T_{\%}$ du flux lumineux transmis à travers un milieu d'épaisseur e avec cette épaisseur e ? ($T_{\%} = 100 \times \text{flux transmis} / \text{flux incident}$; T est la transmittance ou le facteur de transmission). À suivre en TP...

3. Application de ce système émission-réception : détection de gaz dans un gazoduc

Les gazoducs peuvent faire des centaines de kilomètres. Pour des raisons de sécurité et de gestion il est indispensable de contrôler à distance le débit du gaz dans les différents tronçons (gestion du débit, localisation d'une fuite dans un tronçon). Les débitmètres classiques ne permettent généralement pas de localiser précisément la fuite. Ainsi on propose d'utiliser le système émetteur/récepteur vu précédemment en détecteur de gaz : ces capteurs seraient alors placés à des endroits stratégiques (par exemple à la transition entre deux tuyaux), sur la partie externe du gazoduc.

- a. Comment un tel capteur peut-il fonctionner ?
- b. Imaginer un schéma bloc électrique d'un tel capteur.

RÉDACTION : S. HOLÉ ET J. LEFRÈRE

9. CIRCUITS DE CONDITIONNEMENT POUR CAPTEURS DE DÉFORMATION

On s'intéresse ici aux circuits de conditionnement pour des jauges de déformation. Plusieurs types de circuits électroniques sont évalués en tenant compte de différents critères comme la sensibilité, la linéarité... L'objectif est de montrer l'importance du circuit de conditionnement afin d'optimiser les performances du capteur.

On souhaite mesurer la déformation d'une poutre soumise à une contrainte de type flexion (figure 9.1). On utilise des jauges de déformation (ou encore d'extensométrie) de longueur ℓ et de résistance R au repos. Sous contrainte, la jauge collée sur la face supérieure de la poutre s'allonge de $+\delta\ell$ et celle collée sur la face inférieure de la poutre se comprime de $-\delta\ell$. Les résistances des jauges varient donc de $R \pm \delta R = R \pm r$.

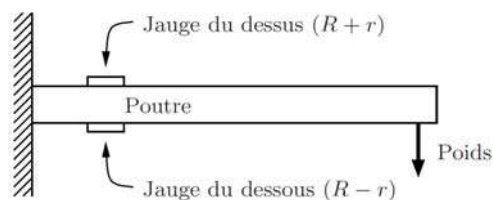


Figure 9.1 – Poutre et jauges de déformation.

D'après la loi de comportement d'une jauge, $\frac{\delta R}{R} = \frac{r}{R} = K \frac{\delta\ell}{\ell}$, où $\delta\ell/\ell$ est l'allongement relatif de la jauge (mesurande M) et K le facteur de jauge. Afin de mesurer les variations de résistance $r = \delta R$, on compare différents circuits de conditionnement électronique (pont diviseur et ponts de Wheatstone).

1. Montage potentiométrique ou pont diviseur

On considère d'abord une seule jauge, par exemple la jauge de résistance $(R + r)$. Celle-ci est placée dans un pont diviseur (i.e. en série avec une résistance R_p et aux bornes de ces deux résistances on applique la tension continue E). On appelle V_{m1} la tension mesurée aux bornes de la jauge.

- Exprimer V_{m1} .
- Exprimer la sensibilité $S_1 = dV_{m1} / dr$. Déterminer l'expression de R_p pour que S_1 soit maximale autour du point de repos ($r \ll R$). En déduire l'expression de $S_{1\max}$.
- Exprimer la sensibilité $S'_1 = dV_{m1} / dM$. Conclure sur la linéarité de la chaîne de mesure. Exprimer S'_1 autour du point de repos.
- La source de tension continue E peut fluctuer. Soit ΔE l'amplitude des fluctuations de cette source. La tension mesurée aux bornes de la jauge devient alors $V_{m1} + \Delta V_{m1}$. Exprimer ΔV_{m1} . En déduire son expression autour du point de repos.

2. Pont à une seule jauge (quart de pont)

La jauge de résistance $(R + r)$ est désormais placée dans un pont de Wheatstone (figure 9.2).

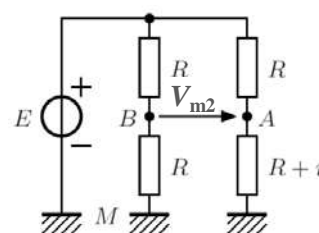


Figure 9.2 – Quart de pont.

- Exprimer la tension $V_{m2} = V_A - V_B$.
- Exprimer la sensibilité $S_2 = dV_{m2} / dr$.
- Exprimer la sensibilité $S'_2 = dV_{m2} / dM$. Conclure sur la linéarité de la chaîne de mesure. Exprimer S'_2 autour du point de repos.
- Exprimer l'amplitude des fluctuations ΔV_{m2} de la tension mesurée sous l'influence des fluctuations de la source de tension E . En déduire son expression autour du point de repos. Comparer avec le cas précédent (question 1).

3. Pont à deux jauges (demi-pont)

On utilise maintenant deux jauges de résistances $(R + r)$ et $(R - r)$ placées dans un pont de Wheatstone (figure 9.3).

- Exprimer la tension $V_{m3} = V_A - V_B$.
- Exprimer la sensibilité $S_3 = dV_{m3} / dr$.
- Exprimer la sensibilité $S'_3 = dV_{m3} / dM$. Conclure sur la linéarité de la chaîne de mesure et sur sa valeur par rapport à celle de la question 2.
- Exprimer l'amplitude des fluctuations ΔV_{m3} de la tension mesurée sous l'influence des fluctuations de la source de tension E . En déduire son expression autour du point de repos. Comparer avec les cas précédents (questions 1 et 2).

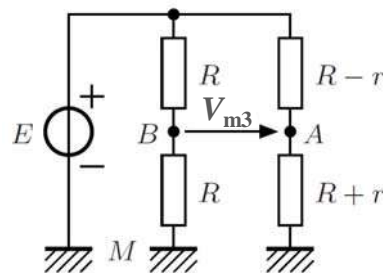


Figure 9.3. Demi-pont.

4. Pont à deux jauges et amplification

Le montage demi-pont fournit un niveau de signal trop faible. Aussi ajoute-t-on un amplificateur opérationnel monté en contre-réaction et supposé idéal (figure 9.4).

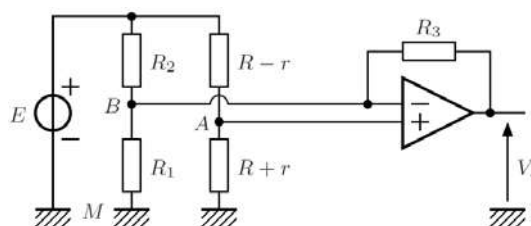


Figure 9.4. Montage demi-pont et amplificateur.

- Exprimer les tensions V_{AM} et V_{BM} .
- En déduire l'expression de la tension V_s .
- On impose $V_s = 0$ pour $r = 0$. Déterminer l'expression de la résistance R_2 en fonction de R_1 et R_3 .
- Pour l'expression de R_2 déterminée à la question précédente, on définit alors le gain G selon : $V_s = G E r / R$. Exprimer G uniquement en fonction de R_1 et R_3 . Comment la sensibilité de la chaîne de mesure a-t-elle été améliorée ? Qu'en est-il de l'influence des fluctuations de la source de tension E ?

5. Aspects pratiques

Le modèle de jauge proposé est la jauge KFG 20-120-C1-11 (cf. Figure A.9.1, en annexe). L'AOP est alimenté entre ± 10 V avec des tensions de saturation de ± 10 V.

- Comment choisir le gain du montage de la figure 9.4 pour utiliser les jauges jusqu'à leur limite d'élongation ? Application numérique : $E = 5$ V.
- Dans le but d'améliorer la sensibilité, pourquoi ne pas augmenter la tension continue E ?
- Dans le but d'améliorer la sensibilité, pourquoi est-il peu intéressant de placer un amplificateur non-inverseur pour le montage potentiométrique ?