

2. Notions fondamentales

2.3 – Énergie électrique

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Thomas Lamalle, étudiant à la maîtrise

Département de génie électrique

Questions

- Quelle sont les différents types et systèmes de tensions ?
 - Monophasé alternatif
 - Monophasé continu
 - Triphasé alternatif
 - Triphasé continu
 - Biphassé continu



ENR2020

Questions

- Quelle sont les différents types et systèmes de tensions ?
 - Monophasé alternatif
 - Monophasé continu
 - Triphasé alternatif



ENR2020

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types et systèmes de tensions
- Les puissances
- Transport et conversion
- Piste d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse
- Systèmes de stockage
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Types et systèmes de tensions
- Les puissances
- Transport et conversion
- Piste d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse
- Systèmes de stockage
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Outre les considérations générales sur l'énergie discutées antérieurement, il faut ajouter quelques notions d'électricité aux notions fondamentales puisque nombre de technologies renouvelables font appel à du génie électrique.
- Cette présentation ne prétend pas remplacer un cours sur l'électricité mais elle se concentre sur les principaux éléments que l'on doit connaître pour, par la suite, aborder les énergies renouvelables.

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Comprendre les différents types et systèmes de tensions, leurs inconvénients et leurs avantages.
 - Savoir distinguer les différentes puissances et leurs origines.
 - Comprendre comment Hydro-Québec facture la puissance.
 - Connaître les ordres de grandeur des puissances transportées.

Introduction

- La tension U :

Caractérise la force qui est doit être imposée pour faire circuler les électrons dans un matériau conducteur. Son travail W est donné par :

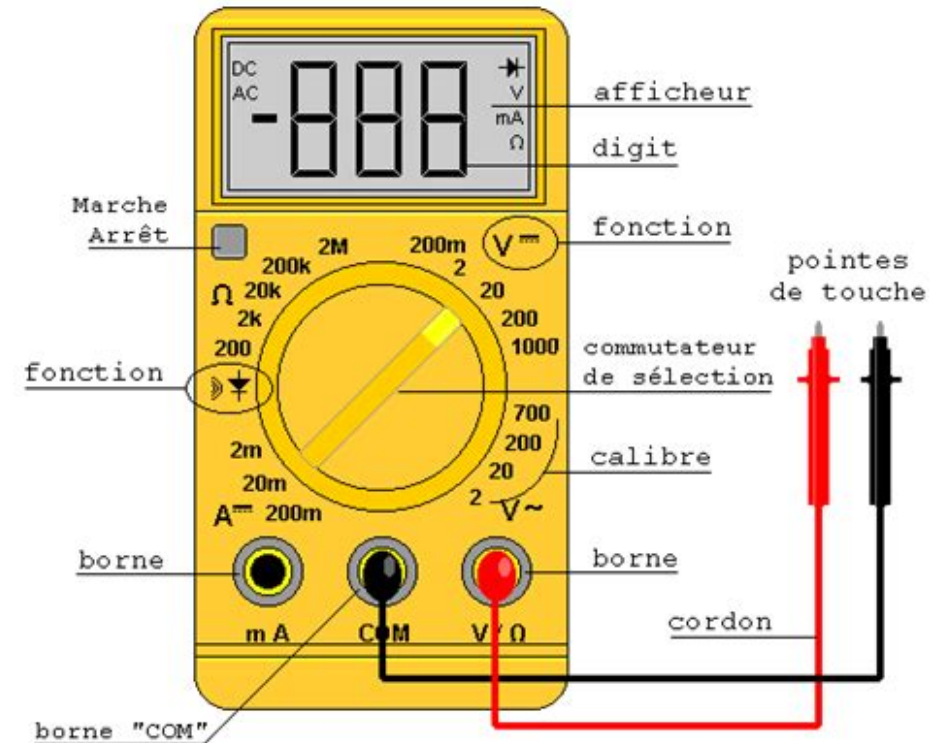
$$W = U \cdot e \quad U : \text{la tension}$$

e : la charge d'un électron

Il s'agit aussi d'une différence entre deux potentiels électriques :

$$U = V_A - V_B$$

$$\Rightarrow [U] = \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}} = \text{Volt}$$



Exemple de multimètre : mesure de tension, courant et résistance. Notez que certains appareils munis de deux bornes seulement sont vendus tels des multimètres. Mais ils ne permettent pas de mesurer le courant! Un multimètre comporte au minimum 3 bornes.

Introduction

- Le courant I :

C'est le mouvement des porteurs de charges (électrons). L'intensité du courant est le **débit de charge électrique**, à travers une surface donnée :

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \Rightarrow [I] = \frac{\text{coulomb}}{\text{seconde}} = \text{Ampère}$$

$q(t)$: charge en fonction du temps

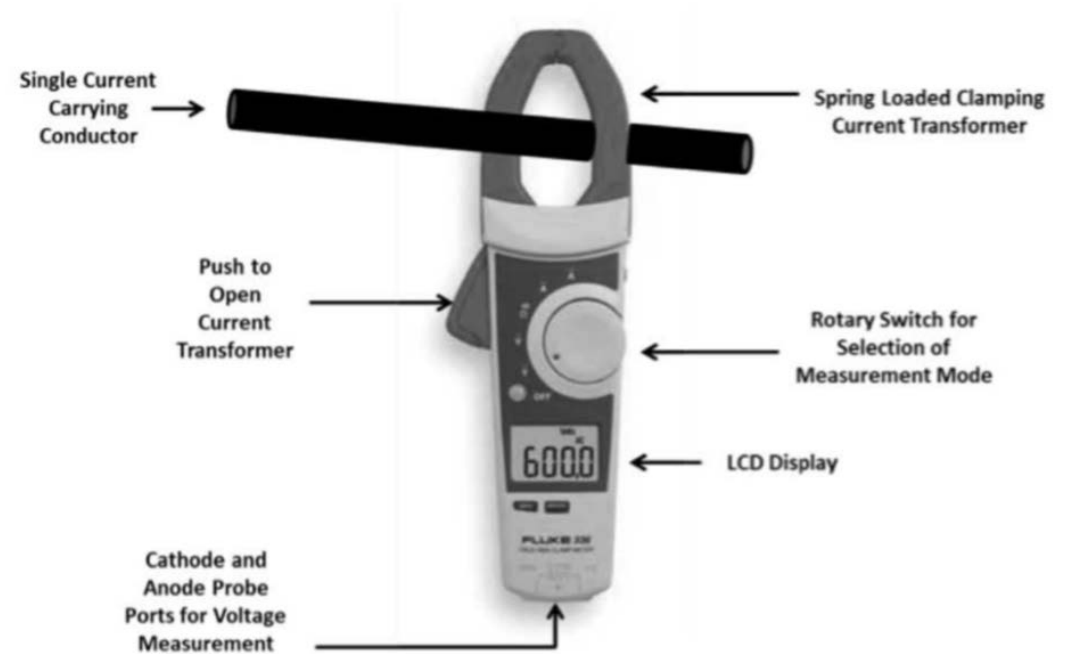


Figure 1.27: Fluke® Digital Clamp-on Ammeter

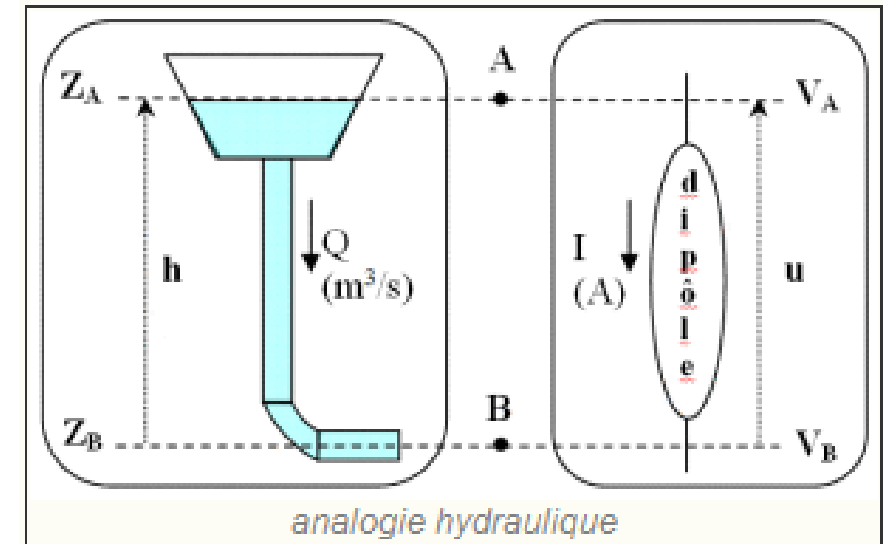
Pince ampèremétrique dédiée à la mesure de l'intensité. Pratique car ne nécessite pas d'ouvrir le circuit et permet plus de sécurité.

Introduction

- Analogie Hydraulique

On peut assimiler un circuit électrique à une chute d'eau :

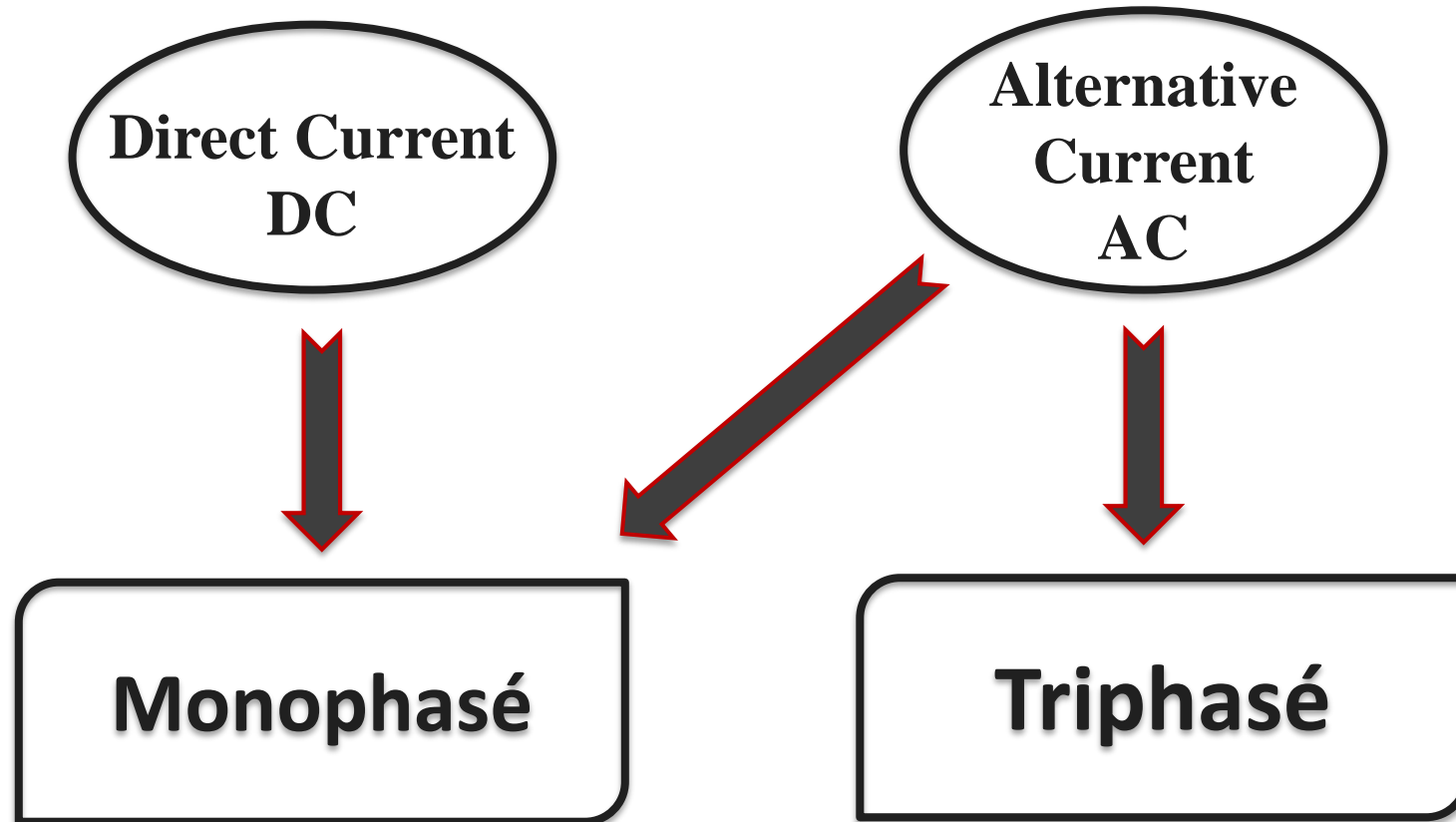
- Les altitudes Z_A, Z_B représentent les potentiels électriques V_A, V_B . La tension $U = V_A - V_B$ représente donc la hauteur ou différence d'altitude h .
- Le débit d'eau Q correspond au débit d'électrons, c.-à-d. le courant I .



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Types et systèmes de tensions***
- Les puissances
- Transport et conversion
- Piste d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse
- Systèmes de stockage
- Conclusion

AC et systèmes de tensions



Types et systèmes de tensions

Direct Current
DC

Le courant et la tension ont des valeurs constantes en régime permanent.



- Réglage facile couple/vitesse des moteurs à courant continu
- Permet de recharger des batteries
- Pour une même isolation, la tension peut être 3 à 4 fois plus élevée \Rightarrow transport sous-marin
- Pas de transformateurs \Rightarrow obtenir différents niveaux de tension est très compliqué
- Coupure plus difficile

Types et systèmes de tensions

Alternative
Current
AC

Le courant et la tension sont des sinusoides

Pourquoi le triphasé ? : <https://www.youtube.com/watch?v=JwOTA5a2mK0>



- Moteurs/Génératrices triphasées moins encombrantes
- 2 niveaux de tensions accessibles (simples ou composées)
- Les transformateurs permettent d'élever la tension pour le transport puis la rabaisser pour la distribution
- Jusqu'à 5 conducteurs nécessaires (3 phases, neutre et terre)
- Les machines triphasées ne fonctionnent qu'à une vitesse fixe ou à son voisinage

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types et systèmes de tensions
- ***Les puissances***
- Transport et conversion
- Piste d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse
- Systèmes de stockage
- Conclusion

Questions

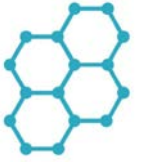
- Quelles sont les différents types de puissances ?
 - La puissance réactive
 - La puissance rotorique
 - La puissance apparente
 - La puissance active
 - La puissance résistive



ENR2020

Questions

- Quelles sont les différents types de puissances ?
 - La puissance réactive
 - La puissance apparente
 - La puissance active



ENR2020

Les Puissances

En DC : Puissance active/réelle P

- Puissance électrique

– $P = U \cdot I$ U : Tension (V), I : Courant (A)

$$[P] = \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}} \cdot \frac{\text{coulomb}}{\text{seconde}} = \frac{J}{s} = W$$

⇒ Pertes par effet Joule :

Pour une charge résistive, $U = R \cdot I \Rightarrow P = U \cdot I = RI^2 = \frac{U^2}{R}$



Exemple de wattmètre : mesure des puissances, courant, tension et fréquence.

Les Puissances

En AC : Les composants réactifs (inductances et capacités) créent un champ magnétique ou électrique. Cela consomme ou produit un autre type de puissance. On parle de puissance réactive Q , exprimée en voltampère réactif (VAR).



Condensateurs : « produit » $Q \Rightarrow Q_C < 0$



Bobine (moteurs électrique, lampes fluorescentes) :
« consomme » $Q \Rightarrow Q_L > 0$

$\Rightarrow Q$ n'est pas perdue et ne fournit pas de travail mais intervient dans le dimensionnement et la qualité de la distribution. Si Q augmente, le courant augmente donc les équipements doivent être adaptés.

Les Puissances

- En AC, Puissance apparente (ou complexe) S :

$$S = P + jQ \quad \text{et} \quad |S| = |U| \cdot |I|$$

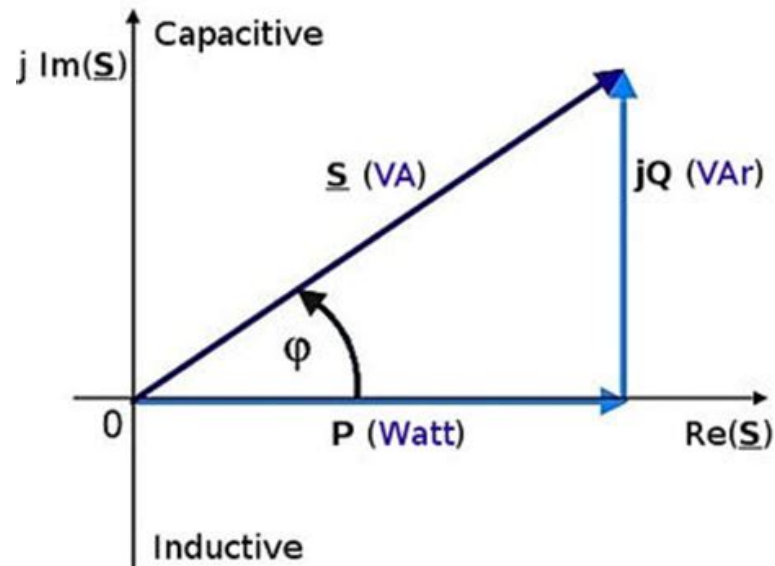
$$\Rightarrow |S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Active

Réactive

Cette puissance permet de prendre compte les puissances actives et réactives, S exprimée en Voltampère (VA).

Les Puissances



$$\Rightarrow P = |\underline{S}| \cdot \cos\varphi = |\underline{U}| \cdot |\underline{I}| \cdot \cos\varphi$$

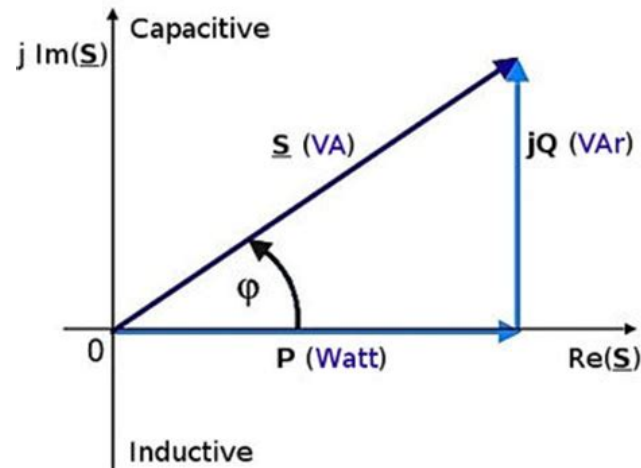
$$\Rightarrow Q = |\underline{S}| \cdot \sin\varphi = |\underline{U}| \cdot |\underline{I}| \cdot \sin\varphi$$

Le terme $\cos\varphi$ est appelé facteur de puissance

L'angle φ caractérise le rapport entre P et Q . Plus φ **proche de 0**, c.-à-d. $\cos\varphi$ est **proche de 1**, plus la puissance apparente est proche de la puissance réelle qui fournit effectivement un travail \Rightarrow **Good !**

\Rightarrow L'ajout de moteurs va diminuer le facteur de puissance tandis que l'ajout de condensateurs va l'augmenter.

Les Puissances



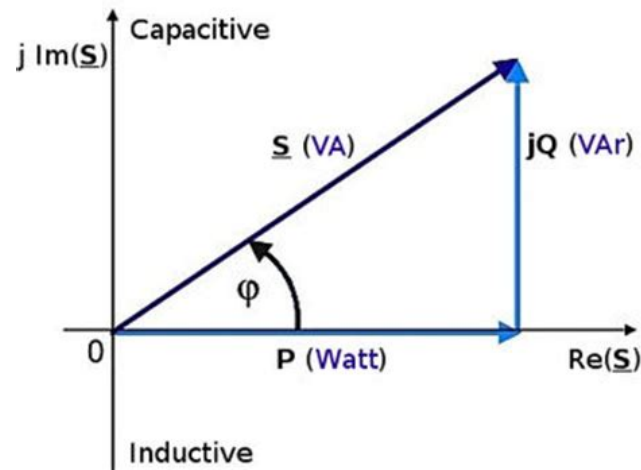
$$P = U |I| \cos \varphi$$

$$Q = U |I| \sin \varphi$$

Par exemple : si $\cos \varphi < 0.9$, Hydro-Québec facture à la puissance apparente (90% de S) et non plus à la puissance réelle P .

Pour les particuliers et les commerces, le facteur de puissance est de l'ordre de 0,9 ou plus, tant dit qu'on peut trouver des valeurs inférieures à 0,5 dans des usines comme des fourneaux, où le chauffage à induction est utilisé.

Les Puissances



$$P = U |I| \cos \varphi$$
$$Q = U |I| \sin \varphi$$

Puissance apparente:

https://www.youtube.com/watch?v=Y_EV9ea1w4&feature=youtu.be

Facturation Hydro-Québec:

<https://www.youtube.com/watch?v=pH2L86rhV6A&feature=youtu.be>

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types et systèmes de tensions
- Les puissances
- ***Transport et conversion***
- Piste d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse
- Systèmes de stockage
- Conclusion

Questions

- En terme de puissance électrique, combien de ligne à haute tension (735 kV) sont équivalentes à un oléoduc qui débite 5000 t/h ?
 - 100 lignes
 - 500 lignes
 - 10 lignes
 - 2 Lignes
 - 1 ligne



ENR2020

Questions

- En terme de puissance électrique, combien de ligne à haute tension (735 kV) sont équivalentes à un oléoduc qui débite 5000 t/h ?
 - 10 lignes, une ligne triphasée à 735kV a une puissance de 2 GW. Un oléoduc qui peut débiter 5000 t/h de pétrole a une puissance de 60 GW bruts, soit 20 GW électriques.



ENR2020

Transport et conversion

Aguet, M., & Morf, J.-J. (1990). Énergie électrique (2e éd.) :

« Parmi toutes les formes d'énergie utilisées par l'homme, l'énergie électrique présentent deux particularités : elle n'est pratiquement pas disponible dans la nature et elle ne peut être stockée. En conséquence, chaque seconde, la totalité de l'énergie électrique utilisée par les consommateurs doit avoir été produite, transportée, distribuée et comptabilisée dans le même temps. [...] *L'électricité n'est qu'un vecteur d'énergie* ».

Électricité : **vecteur** d'énergie artificiel



Transport d'énergie



Conversion en différentes formes d'énergie

Transport et conversion

- Les réseaux de courant sont aujourd'hui majoritairement alternatifs. Ils ont comme propriétés d'être :
 - Triphasé
 - Puissance instantanée cumulée constante (avantage pour moteurs et alternateurs de grandes puissances pour obtenir un couple mécanique constant)
 - Très haute tension pour limiter les pertes
 - Le signal électrique circule à environ $2/3$ de la vitesse de la lumière
 - On approxime cela en considérant que la transmission est instantanée.

Plus de détails sont fournis dans la présentation [8.1 Réseau électrique](#)

Transport et conversion

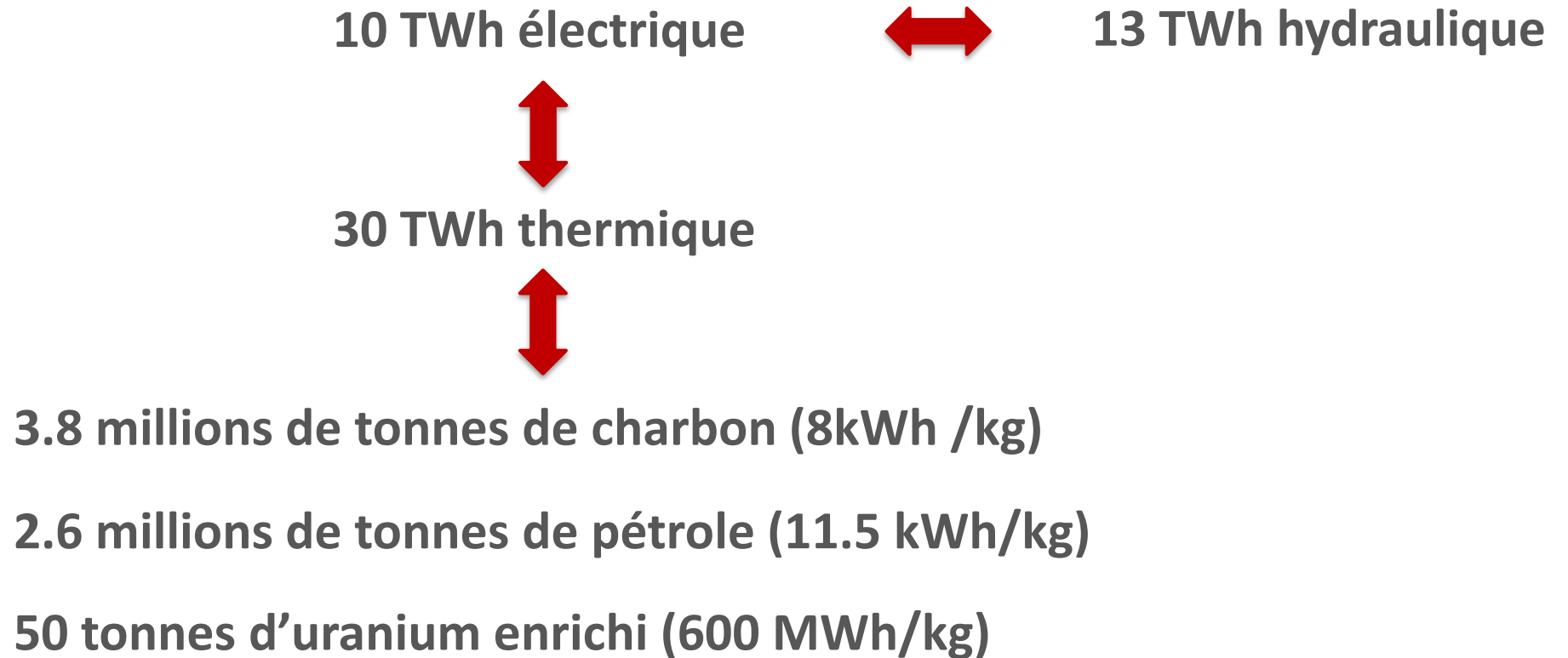
- Transport d'énergie

- Exemples : (Aguet & Morf, 1990)

- Une ligne triphasée à 735kV de 36m de large => **2 GW**
 - Un oléoduc de 0,9 m de diamètre peut débiter 5000 t/h de pétrole soit 60 GW bruts => **20 GW électriques**
 - Un gazoduc de 0,9 m de diamètre, sous 6,5 MPa de pression, peut débiter 600 t/h de gaz naturel => **7 GW électriques**

Transport et conversion

- Conversion d'énergie



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types et systèmes de tensions
- Les puissances
- Transport et conversion
- ***Piste d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse***
- Systèmes de stockage
- Conclusion

Exemple d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse

- Situation

- Aux É.-U., **60 % de l'énergie électrique** alimente des moteurs, dont **75%** sont des pompes, ventilateurs et compresseur.
- Dans la plupart des applications, le moteur tourne à **vitesse constante** et la gestion du fluide est faite a posteriori (à l'aide d'amortisseurs ou de goulots d'étranglement variables).

Exemple d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse

| Moteurs dans le monde en 2009 | | | |
|--|---------------|------------------|--------------------|
| Taille | Petite taille | Taille moyenne | Grande taille |
| Puissance | 10 W - 750 W | 0,75 kW - 375 kW | 375 kW - 10 000 kW |
| Nombre total | 2 milliards | 230 millions | 0,6 million |
| Pourcentage de l'énergie totale consommée | 9 % | 68 % | 23 % |

Source : (*Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems, 2011*)

⇒ Beaucoup de pertes, le fonctionnement du moteur n'est pas du tout optimisé.

Exemple d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse

Solution : Variateur de vitesse électronique

- Fais varier la fréquence et la tension qui alimente le moteur, à l'aide de semi-conducteurs (diodes et transistors).
 - ⇒ Adapte le **couple** du moteur en fonction de l'application
 - ⇒ Adapte la **vitesse** du moteur en fonction de l'application
 - ⇒ Diminue de la **consommation électrique** (jusqu'à 30%)
 - ⇒ Démarre **progressivement**
 - ⇒ Limite le **courant de démarrage**
 - ⇒ Prolonge la **durée de vie** des équipements



Exemple d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse

Solution : Variateur de vitesse électronique

- Fais varier la fréquence et la tension qui alimente le moteur, à l'aide de semi-conducteurs (diodes et transistors).

Mais :

- Surcoût jusqu'à 20% du coût du système (mais PRI < 2 ans)
- Qualité de la fréquence et de la tension dégradée



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types et systèmes de tensions
- Les puissances
- Transport et conversion
- Piste d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse
- ***Systemes de stockage***
- Conclusion

Systemes de stockage

Une description plus détaillée des différents systèmes de stockage est présentée dans le **Module 17**

- Densité en énergie et en puissance

Pour un système de stockage électrique, 2 critères sont à prendre en compte :

- La quantité d'énergie emmagasinée
- La puissance instantanée disponible

Les supercondensateurs offrent un compromis entre les deux

*Densité en
puissance*



*Densité en
énergie*

Systemes de stockage

Batteries vs Supercondensateurs

| Caractéristique | Batterie Li-ion | Supercondensateur |
|----------------------------|-----------------|-------------------|
| Énergie massique (Wh/kg) | 100 – 150 | 5 |
| Puissance massique (kW/kg) | < 1 | > 10 |
| Efficacité | 75% – 95% | > 95% |
| Nb de recharges | < 5 000 | > 1 000 000 |
| Coût du kWh | 800 – 1500 € | 8 000 – 15 000 € |

Source : Leridon, H. (2009). Chaire Développement durable – environnement, énergie et société

Les supercondensateurs et batteries sont complémentaires : l'un fournit une grande puissance, l'autre une grande énergie.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Types et systèmes de tensions
- Les puissances
- Transport et conversion
- Piste d'économie d'énergie : les variateurs de vitesse
- Systèmes de stockage
- ***Conclusion***

Conclusion

- L'électricité est un **vecteur** d'énergie
- Il existe **deux** types et **deux** systèmes de tension comportant chacun des avantages et des inconvénients
- Les avancées en électronique de puissance ont ouvert des pistes d'économies d'énergie
- En régime alternatif, on considère trois types de puissances différentes : S, P et Q. Sachez les distinguer!

Questions

- Avec quel régime (alternatif ou continu) fonctionne un moteur triphasé ?
- Pourquoi tient-on compte de la puissance réactive si elle ne fournit pas de travail ?
- À quoi correspond φ ?
- Quand utilisera-t-on des supercondensateurs plutôt que des batteries ? Et inversement ?

Bibliographie

- Livres :
 - Rauf, S. B. (2016). Electrical engineering for non-electrical engineers (Second edition). Lilburn, GA : The Fairmont Press, Inc., CRC Press, Taylor & Francis Group.
 - Aguet, M., & Morf, J.-J. (1990). Énergie électrique (2e éd.). Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes.

Bibliographie

- Références :

- Allard, B. (2016). *Électronique de puissance – Bases, perspectives, guide de lecture*, 14.
- Leridon, H. (2009). Chaire Développement durable – environnement, énergie et société: Année académique 2008-2009. *La lettre du Collège de France*, (25), 9. <https://doi.org/10.4000/lettre-cdf.501>
- Bose, B. K. (2009). The past, present, and future of power electronics [Guest Introduction]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 3(2), 7-11, 14. <https://doi.org/10.1109/MIE.2009.932709>
- Brunet, Y. (2009). *Problématiques du stockage d'énergie*. Paris : Hermès science : Lavoisier.
- Electrocinétique - Tension électrique. (s.d.). Repéré à http://physique-enligne.univ-lille1.fr/electrocinetique/co/chapitre1_2.html
- *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems* (Rapport No. 2011/07). (2011). <https://doi.org/10.1787/5kgg52gb9gjd-en>
- large, M. S., editor at. (s.d.). Drive up energy efficiency. *Chemical Processing*. Repéré à <https://www.chemicalprocessing.com/articles/2005/489/>



Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

