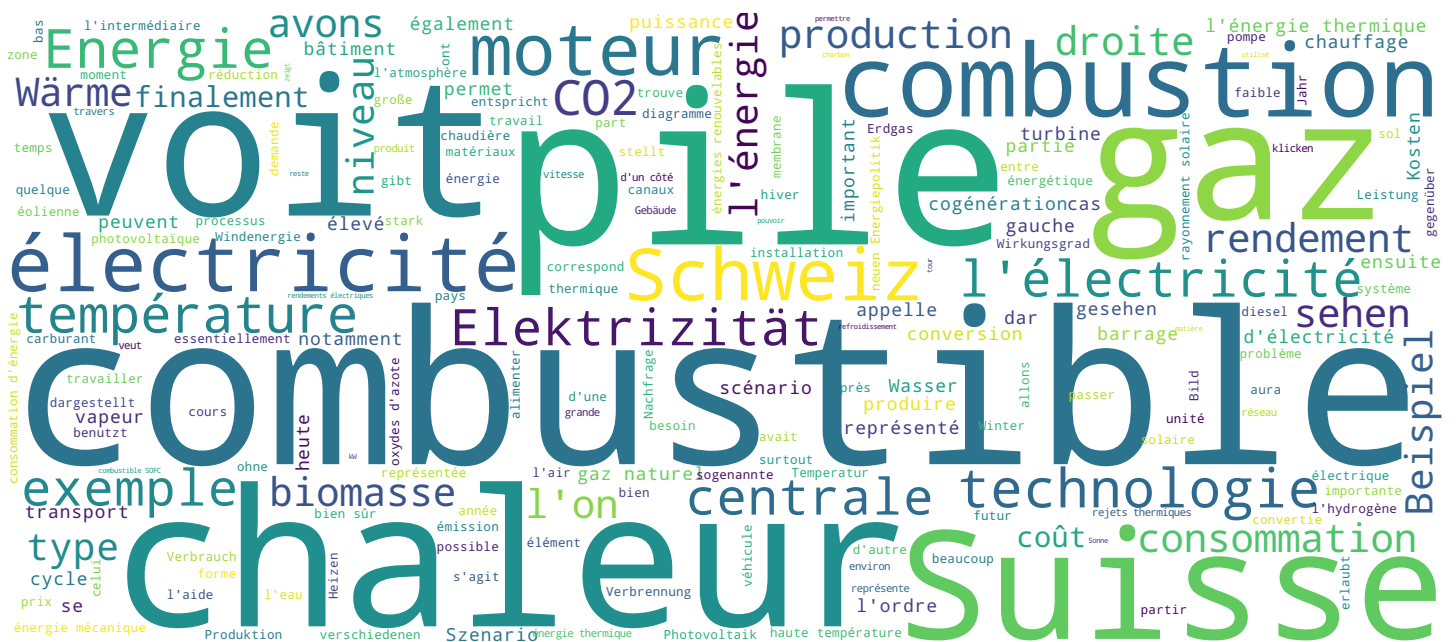




L20: Electricité et chaleur à partir de combustible/carburant

Transition énergétique suisse comprendre pour choisir

Prof D. Favrat, P.-A Haldi



Search MOOC



Video





- Combustible / carburant (énergie chimique)
- Types de conversion en électricité
- Conversion par combustion
- Conversion électrochimique directe (piles à combustible)
- Chaleur et cogénération
- Conclusions

La transition énergétique suisse

L20 : Electricité et chaleur à partir de combustible/carburant Chers participants, au cours de cette leçon, nous allons nous concentrer sur les technologies de conversion en électricité et/ou en chaleur de l'énergie chimique contenue dans les combustibles qu'ils soient d'origine fossile, de type biomasse comme le bois ou des combustibles synthétiques produits en recourant à des énergies renouvelables. Pour rappel, les combustibles représentent plus des 3/4 de la consommation d'énergie finale en Suisse. Nous définirons la notion de combustible et de carburant, passerons en revue les types de conversion en électricité et détaillerons les filières concurrentes que sont : la combustion ou la conversion électro-chimique directe par pile à combustible, et puis nous dirons deux mots de la fourniture simultanée de chaleur et d'électricité Et nous concluons.

Notes

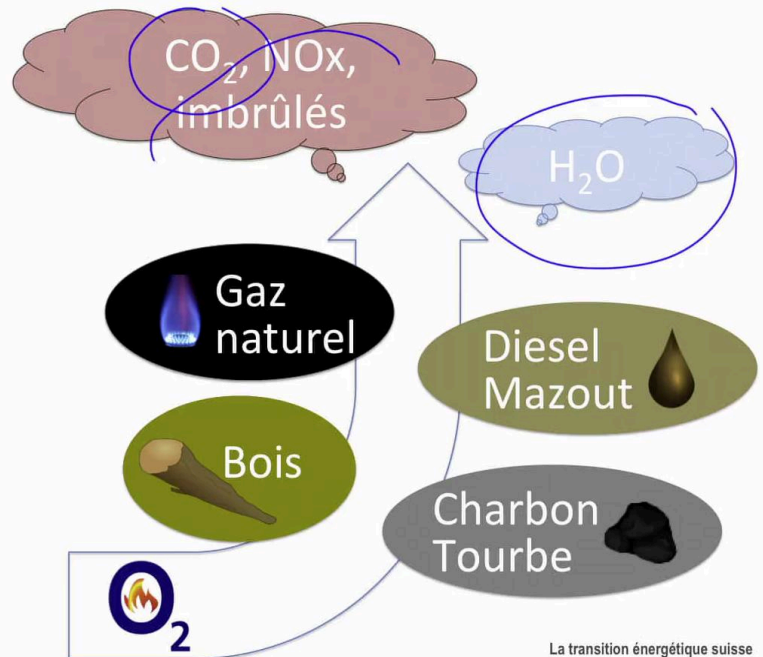
Summary



0m 03s

Qu'est-ce qu'un combustible ou carburant?

- Toute substance qui peut se combiner avec l'oxygène de l'air par exemple pour être convertie en chaleur et/ou électricité
- Traditionnellement on distingue entre:
 - *carburant* pour le transport
 - *combustible* pour les applications stationnaires
- Par la suite, on parlera seulement de *combustibles* pour toutes ces substances



On appelle combustible ou carburant toute substance chimique qui peut se combiner avec un oxydant comme l'oxygène de l'air pour être convertie en énergie thermique ou électrique. Par oxydation, les atomes de carbone des combustibles forment du gaz carbonique CO_2 et les atomes d'hydrogène de la vapeur d'eau H_2O . Ce sont les deux éléments mentionnés ici. En fonction des technologies de conversion, mais essentiellement pour les techniques s'appuyant sur la combustion les émissions comprennent des polluants comme les hydrocarbures imbrûlés, les oxydes d'azote et les particules de différentes tailles qui sont des particules d'imbrûlés.

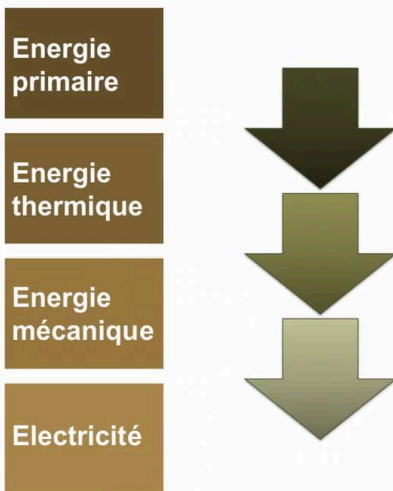
Notes

Summary



1m 05s

Voies de conversion d'énergies primaires en électricité



La conversion d'énergie primaire en électricité peut passer par différentes formes d'énergie comme représenté ici à gauche. Suivant la technologie mise en jeu, l'énergie primaire ou l'énergie finale, peut être convertie en chaleur puis en énergie mécanique par l'intermédiaire de cycles thermodynamiques mettant en jeu des turbines ou des moteurs, qui à l'aide de générateurs électriques convertissent finalement cette énergie mécanique en électricité ou en travail dans le cas des véhicules, par exemple.

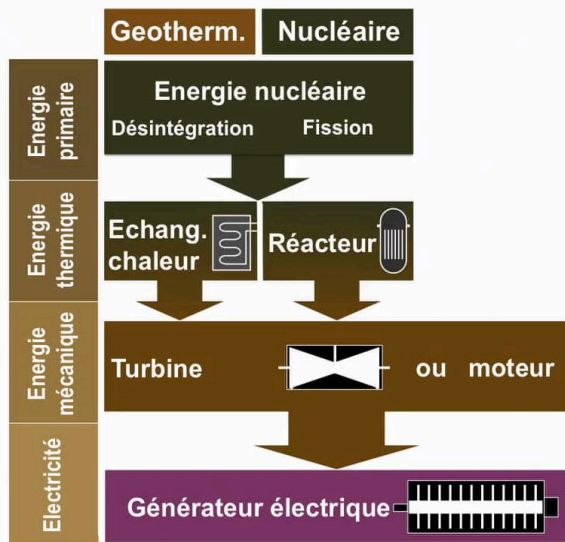
Notes

Summary



1m 54s

Voies de conversion d'énergies primaires en électricité



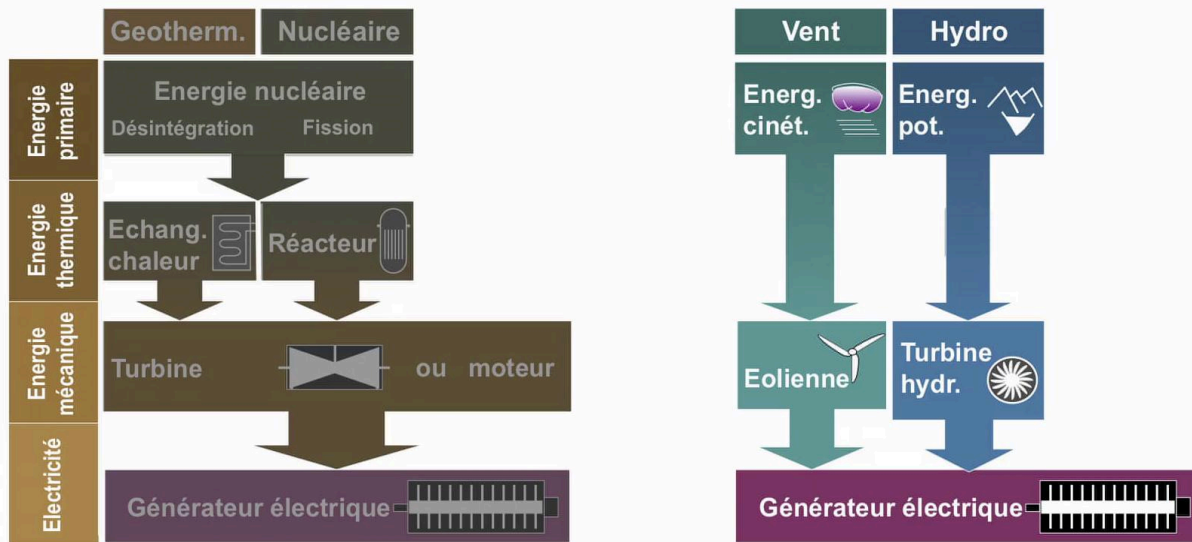
Nous avons déjà vu, dans les cours précédents, deux exemples d'énergies primaires qui passent par toutes ces différentes formes. Il s'agit de l'énergie géothermique qui pour plus de 60 % provient de l'énergie nucléaire de désintégration de substances radioactives dans le sol déjà transformée sous terre en énergie thermique puis par l'intermédiaire de cycles thermodynamiques en énergie mécanique et enfin en électricité. Le processus de conversion est similaire pour l'énergie du combustible nucléaire contenue dans des barreaux de combustible. au sein du cœur d'un réacteur, dans lequel l'énergie des réactions de fissions est transformée en énergie thermique puis en énergie mécanique et finalement en électricité.

Notes

Summary



Voies de conversion d'énergies primaires en électricité



La transition énergétique suisse

D'un autre côté, comme représenté ici à droite, nous avons vu que l'énergie du vent se présente sous forme cinétique, c'est-à-dire la vitesse et peut être convertie en énergie mécanique de rotation par une éolienne puis en électricité par l'intermédiaire d'un générateur. On saute par conséquent une étape en ne passant pas par l'intermédiaire de l'énergie thermique et ses contraintes sur lesquelles nous reviendrons plus loin. Il en va de même de l'énergie hydraulique qui est une forme d'énergie potentielle transformée en énergie cinétique ou de pression pour entraîner les turbines hydrauliques qui elles-mêmes entraînent un générateur en échappant également à l'étape d'énergie thermique.

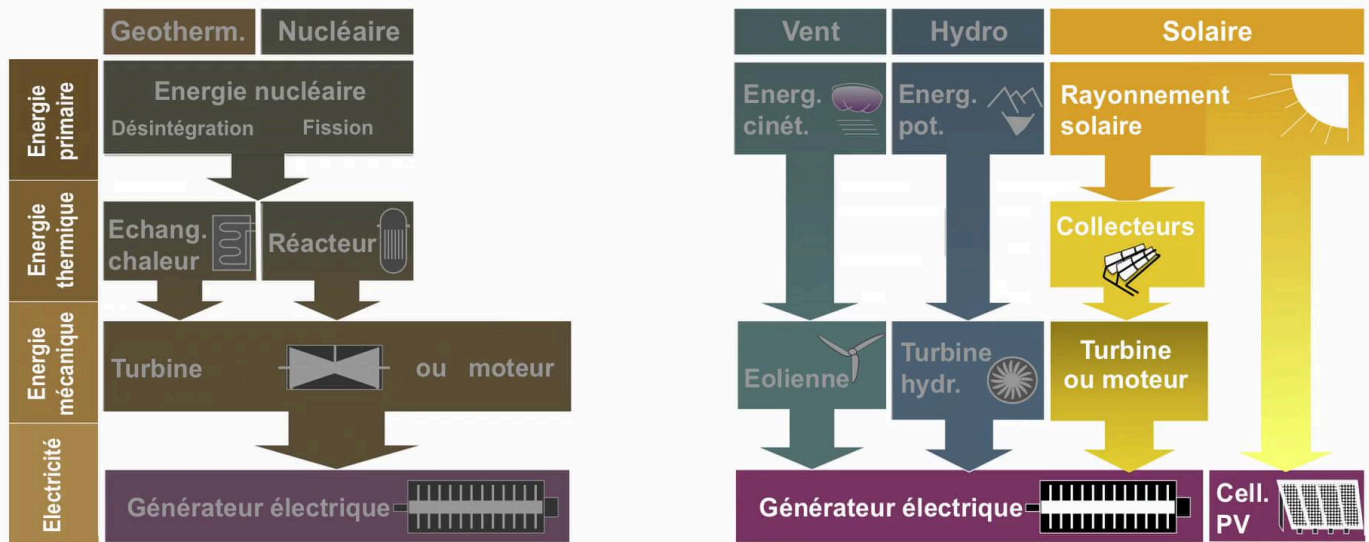
Notes

Summary



3m 29s

Voies de conversion d'énergies primaires en électricité



La transition énergétique suisse

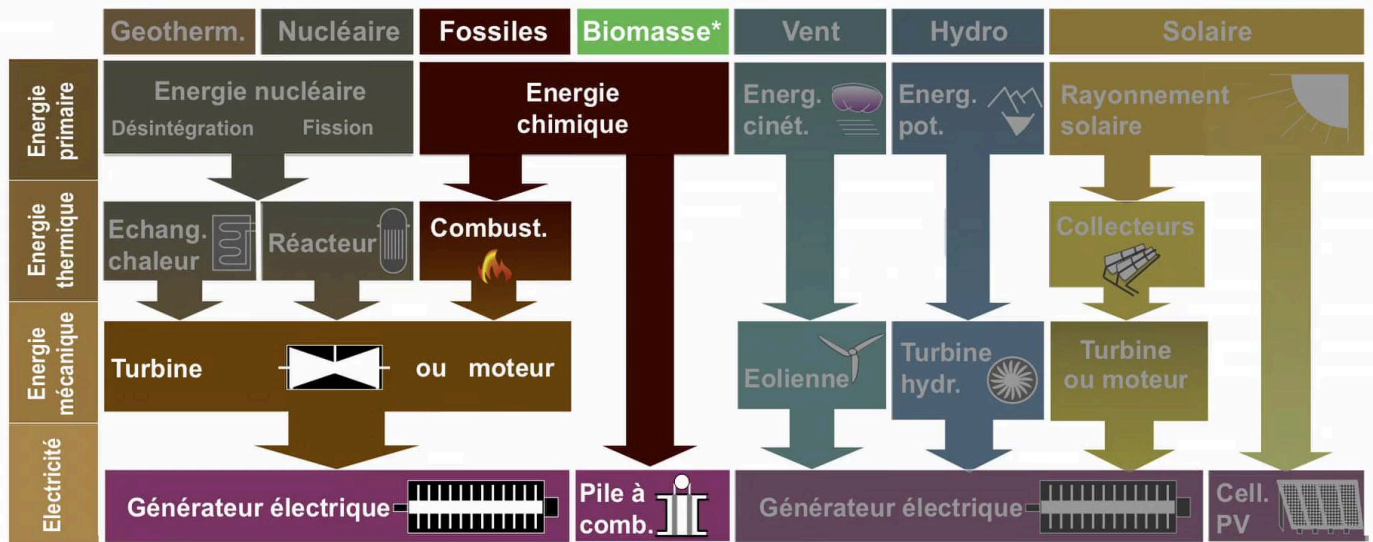
Pour l'énergie solaire, il existe deux voies distinctes : une voie qualifiée de thermique qui consiste à convertir le rayonnement solaire en chaleur souvent à l'aide de concentrateur de rayonnement solaire pour alimenter des sites thermodynamiques à vapeur ou à gaz; et une voie dite photovoltaïque dans laquelle le rayonnement solaire est converti directement en électricité sans passer ni par l'énergie mécanique, ni par la machine tournante qui est un générateur électrique.

Notes

Summary



Voies de conversion de combustibles en électricité



* y.c. ordures ménagères

La transition énergétique suisse

Les combustibles comprennent toutes sortes de substances chimiques qui vont du charbon au pétrole, au gaz naturel, à la biomasse, jusqu'aux ordures ménagères qui sont souvent considérées pour moitié comme des énergies renouvelables. Pour les combustibles fossiles ou tirés de la biomasse, deux voies sont alors possibles : La combustion dans des chaudières, des chambres de combustion ou des moteurs, qui impliquent le passage par l'énergie thermique et ses contraintes de température. La voie électrochimique par transfert d'ions à travers des membranes qui ne passent pas par l'énergie thermique et qui permet de faire de l'électricité directement dans ce qu'on appelle des piles à combustible.

Notes

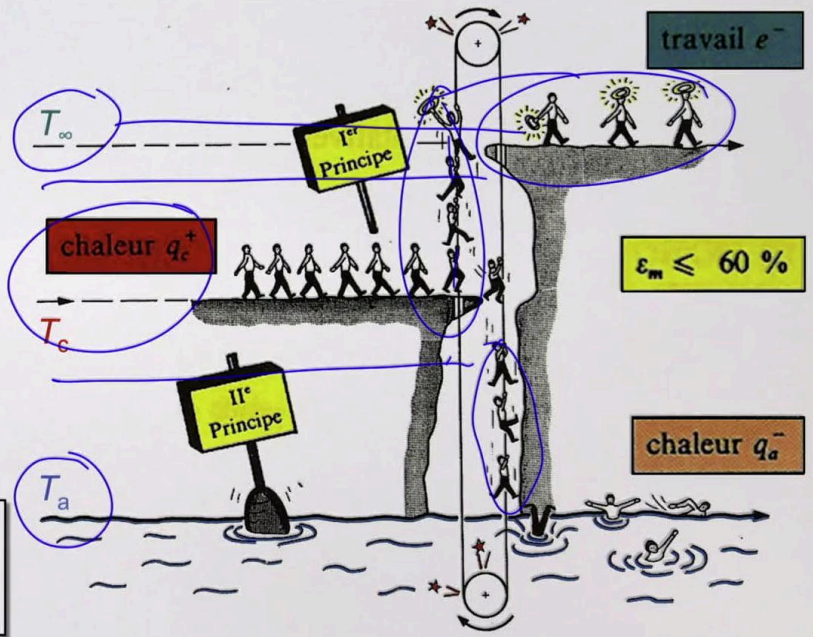
Summary



Energie thermique et travail (ou électricité)

- Carnot a montré au XIX^{ème} siècle qu'on ne pouvait convertir qu'une fraction de l'énergie thermique en travail et que:
- cette fraction est d'autant plus élevée que la température de la source est élevée,
- d'où son fameux rendement:

$$\epsilon_m = \frac{\text{travail}}{\text{chaleur}} = \frac{T_c - T_a}{T_c} = 1 - \frac{T_a}{T_c}$$



T: "température absolue" = θ °C + 273 °C

La transition énergétique suisse

À partir du moment où l'on passe par l'énergie thermique, nous avons une contrainte liée à la température. Carnot a montré au XIX^{ème} siècle qu'on ne pouvait convertir qu'une fraction de l'énergie thermique, de l'énergie chaleur en travail. Cette fraction est d'autant plus élevée que la température de la source thermique, par exemple celle des gaz de combustion est élevée. Carnot a exprimé son rendement, c'est-à-dire le rapport de travail et la chaleur comme étant le rapport entre la différence de températures entre la source chaude et l'environnement divisée par la température de la source chaude. Ici, on voit les trois niveaux de température on a le niveau de température de l'atmosphère qui est représenté ici par cette eau. Ensuite, on a un niveau intermédiaire qui est le niveau auquel on donne la chaleur. Finalement, un niveau supérieur qui est le maximum et qui correspond au niveau de qualité d'énergie de l'électricité qui permet de faire n'importe quoi en matière de service énergétique. Plus ce niveau intermédiaire est bas, plus il faut de bonshommes ici pour tirer sur la corde pour faire élever des bonshommes qui vont atteindre le stade de l'électricité. Donc on a tout intérêt à travailler à des températures les plus élevées possibles en vertu de ce rendement de Carnot.

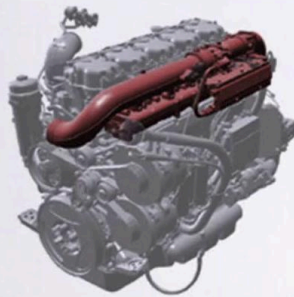
Notes

Summary

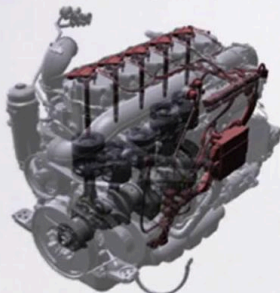


Unités moteurs et centrales à cycle combinés

Moteur à gaz

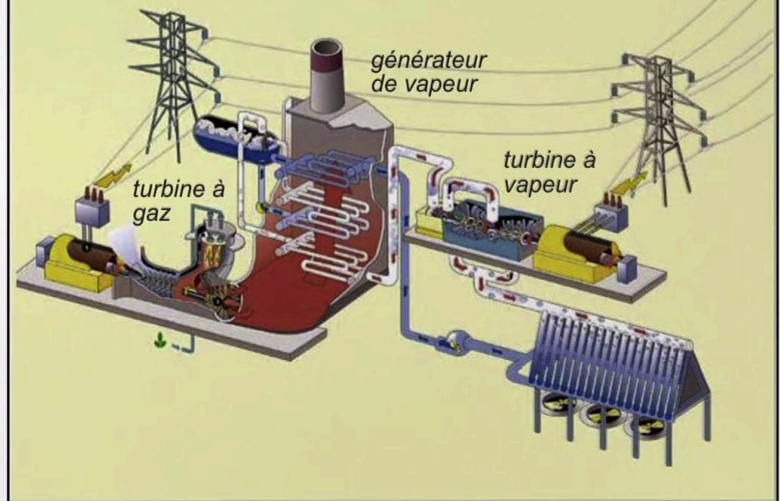


Alimentation en gaz et prise d'air



Gestion moteur et allumage

Centrale à cycle combiné



<http://www.truckeditions.com/Scania-a-presente-son-nouveau.html#VqNvX09A3is>
http://www.enerenvi.lu/images/llu_ref_ener_tgv_big_04.jpg

La transition énergétique suisse

Qui dit hautes températures, dit problèmes de matériaux en premier lieu, De ce point de vue, deux approches principales ont permis d'accroître les rendements ou les efficacités électriques. Dans les moteurs à combustion interne, comme le moteur à gaz ici à gauche on peut monter des températures supérieures à 2 000°C mais seulement pendant une fraction de seconde par tour pour éviter la fusion des matériaux. C'est l'approche principale utilisée dans les moteurs à essence ou les moteurs diesel. Dans le cas, des turbines, les progrès faits en métallurgie et dans les systèmes de refroidissement des eaux, permettent grâce en particulier à un refroidissement interne de turbiner en continu des flux de gaz à des températures supérieures à la température de fusion des matériaux des aubes. Appliqué aux turbines à gaz, similaires aux turboréacteurs utilisés en aviation, avec des températures qui peuvent aller à plus de 1 400°C il est possible de monter les températures maximales du cycle à gaz et de la combiner avec un cycle à vapeur pour atteindre des rendements électriques, des efficacités électriques globaux de l'ordre de 60 % qui est proche du maximum théorique.

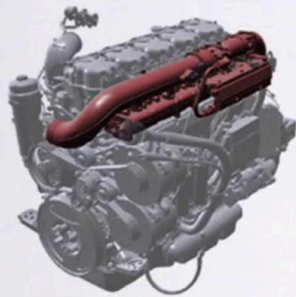
Notes

Summary

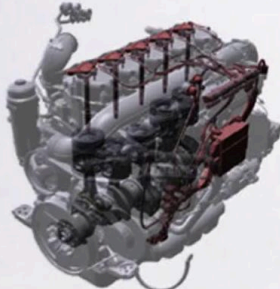


Unités moteurs et centrales à cycle combinés

Moteur à gaz

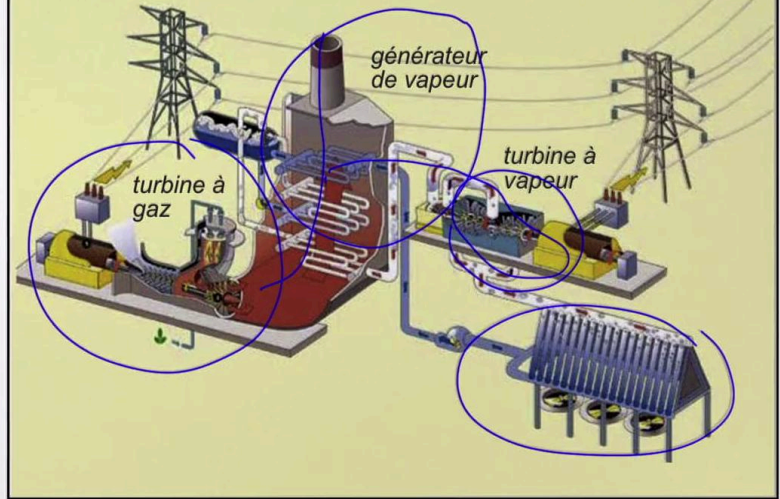


Alimentation en gaz et prise d'air



Gestion moteur et allumage

Centrale à cycle combiné



<http://www.truckeditions.com/Scania-a-presente-son-nouveau.html#VqNvX09A3is>
http://www.enerenvi.lu/images/illu_ref_ener_tgv_big_04.jpg

La transition énergétique suisse

Une installation de ce type, dite à cycle combiné, est représentée dans la figure de droite. Ici, la turbine à gaz est à gauche. On a un générateur de vapeur intermédiaire, qui transforme la chaleur résiduelle des gaz de combustion en vapeur et cette vapeur va ensuite aller travailler dans un cycle de turbines à vapeur qui est représenté ici à droite et finalement si on ne fait pas de la cogénération, on va dissiper après cette chaleur dans des tours de refroidissement. Un des problèmes des très hautes températures est que l'azote de l'air ne reste pas inerte, mais a tendance à former des oxydes d'azote dont l'élimination constitue un des défis les plus importants pour les fabricants de centrales de ce type.

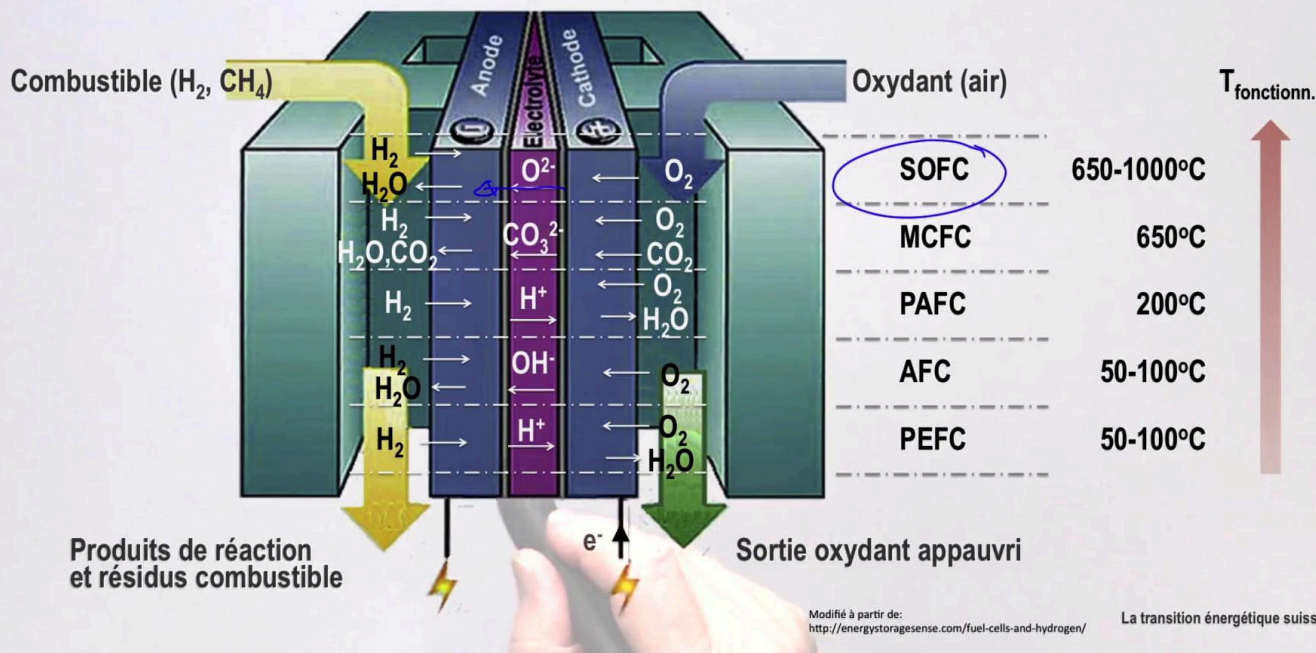
Notes

Summary



8m 41s

Conversion électrochimique (piles à combustible)



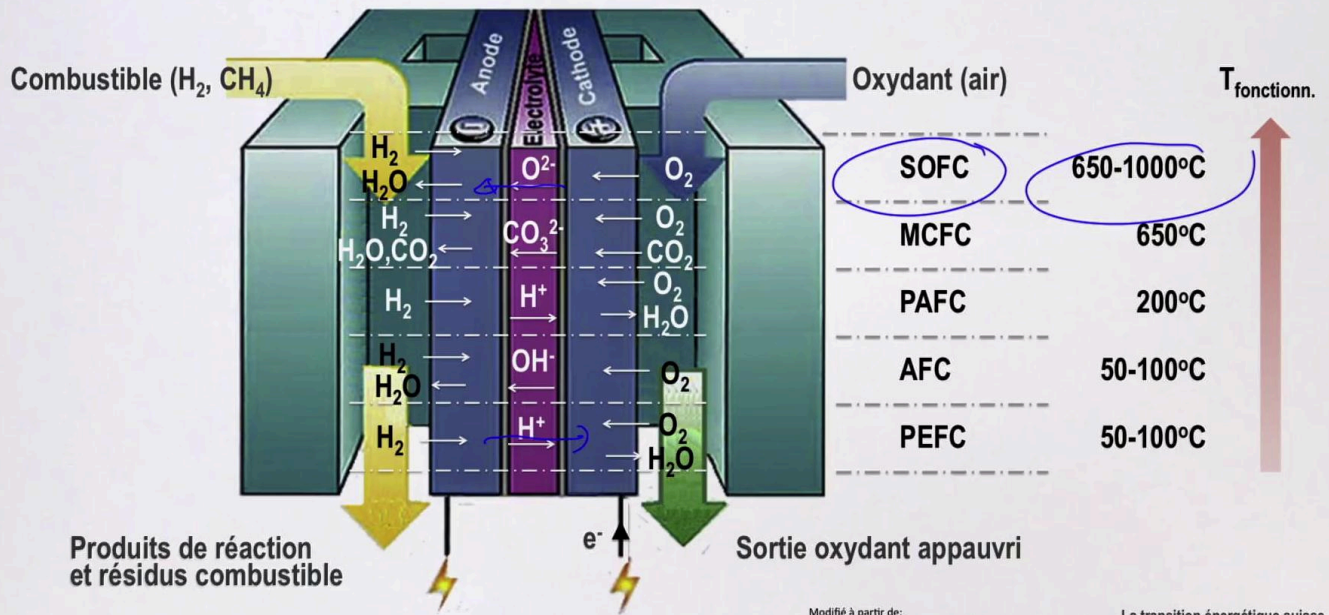
Comme nous l'avons vu, on peut s'affranchir de passer par l'étape de l'énergie thermique en utilisant le transport d'atomes ou de molécules électriquement chargées, qu'on appelle des ions à travers des membranes appelées électrolytes représentées sur ce diagramme en rose. C'est ce qu'on a ici au centre. L'air ou l'oxygène pur passe du côté cathode et le combustible, tout ou partiellement réformé, comme on dit, ou transformé c'est-à-dire modifié en molécules simples comme l'hydrogène H_2 passe du côté de l'anode. Ces membranes électrolytes sont fonctionnelles à des niveaux de températures très différents selon le matériau utilisé ce qui donne différentes familles de piles à combustible. Ces piles à combustible à membranes polymères qui sont des films plastiques modifiés fonctionnent entre 50 et 100°C et sont plus considérées pour le transport, mais malheureusement elles nécessitent des couches catalytiques qui peuvent être extrêmement coûteuses à base de platine notamment. À l'autre extrémité de l'échelle de température, on trouve les piles à oxydes solides « SOFC » dans lesquelles ce sont des ions d'oxygène qui traversent.

Notes

Summary



Conversion électrochimique (piles à combustible)



Modifié à partir de:
<http://energystoragesense.com/fuel-cells-and-hydrogen/>

La transition énergétique suisse

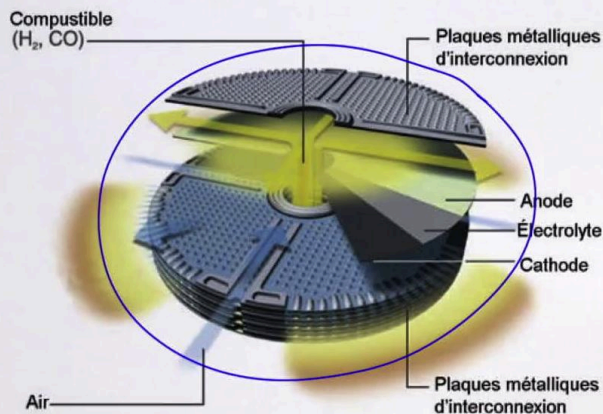
Dans les PEM, on avait des ions d'hydrogène qui traversaient de gauche à droite et puis dans les SOFC se sont plutôt les ions d'oxygène qui vont traverser des membranes qui sont de types céramiques à haute température qui travaillent entre 650 et 1000 °C. Les piles à combustible SOFC à haute température sont celles qui sont le plus considérées pour faire de la cogénération c'est-à-dire de la production de chaleur et d'électricité.

Notes

Summary



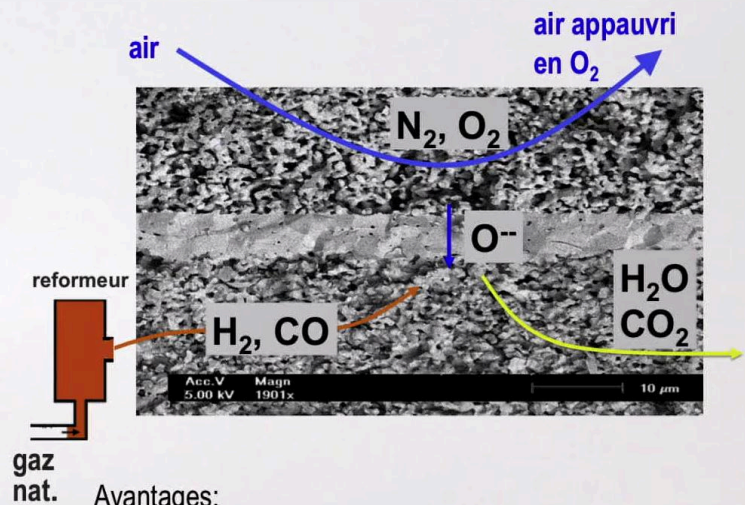
Exemple: pile à combustible à oxyde solide (SOFC)



Élément de pile à combustible à oxyde solide (SOFC)

Régime de fonctionnement:
700 – 800 °C
1 à 5 bar

<https://www.empa.ch/web/s604/hexis>



Avantages:

- Sépare l'oxygène de l'air → facilite la séparation de CO₂
- N'a pas besoin de catalyseur cher comme le platine
- Peut potentiellement être inversé (électrolyse à haute température pour stockage)

La transition énergétique suisse

Regardons plus en détail une pile SOFC dont on voit ici une coupe avec l'électronique ici qui représente un dixième de l'épaisseur d'un cheveu dans cette technologie avec d'un côté, une structure poreuse constituée pour laisser passer l'air et atteindre ainsi l'électrolyte et on a donc de l'air qui entre d'un côté et qui ressort appauvri en oxygène. Le combustible ici sous forme de gaz naturel passe tout d'abord par un réformeur qui va transformer le combustible, par exemple du CH₄ ou même des chaînes plus longues en H₂ et en CO. Ces éléments vont être transformés grâce à l'apport d'oxygène qui traverse la membrane à haute température. L'avantage de ces technologies : ça permet de séparer l'oxygène de l'azote de l'air puisque intrinsèquement c'est un séparateur d'oxygène, ce qui facilite la séparation de CO₂ parce qu'en sortie ici, on pourra condenser l'eau et récupérer le CO₂. Potentiellement, on peut inverser chacune de ces flèches et former ce qu'on appelle de l'électrolyse à haute température c'est-à-dire pouvoir former de l'hydrogène à partir d'électricité quand on en a trop et c'est une perspective intéressante pour ce type de technologie. On voit ici à gauche un empilement de piles qui va permettre de produire une quantité substantielle d'électricité avec une tension suffisante.

Notes

Summary



Exemple: pile à combustible à oxyde solide (SOFC)



Alors, si on représente physiquement en exagéré, en épaisseur exagérée on voit ici une des piles comme on a représenté ici à droite Ça veut dire que cette pile comprend à la fois une cathode, une anode et puis à l'intérieur encore un électronique qui va représenter un dixième d'épaisseur de cheveu. Et puis on va alimenter de part et d'autre par une plaque qui aura des canaux comme ici. Cette plaque avec des canaux va permettre d'alimenter en oxygène, en air d'un côté et de l'autre côté, on aura une contre-plaque qui aura aussi des canaux et qui va alimenter en combustible, et ainsi de suite; on peut rajouter des membranes les unes après les autres. Finalement, on obtient un empilement qu'on va serrer ici et qui va constituer ce qu'on appelle une pile à combustible au sens large qui comprend jusqu'à 50 à 100 piles à combustible elles-mêmes.

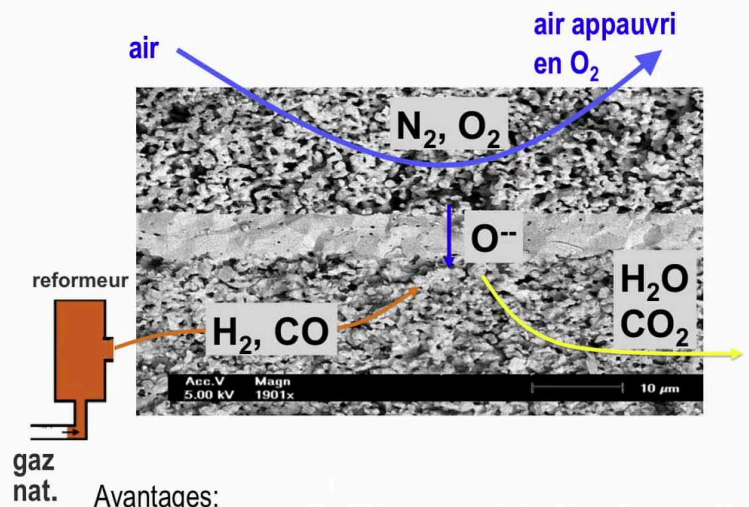
Notes

Summary



13m 30s

Exemple: pile à combustible à oxyde solide (SOFC)



Avantages:

- Sépare l'oxygène de l'air → facilite la séparation de CO_2
- N'a pas besoin de catalyseur cher comme le platine
- Peut potentiellement être inversé (électrolyse à haute température pour stockage)

La transition énergétique suisse

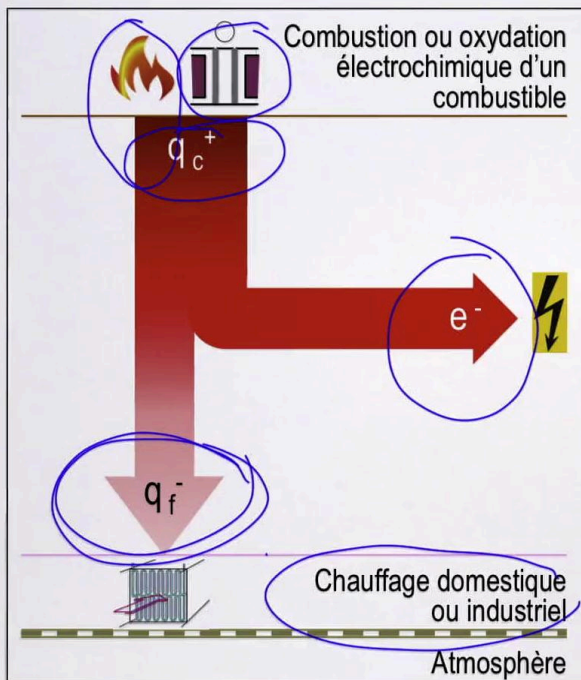
Les avantages sont aussi que ce type de pile ne nécessite pas de catalyseur cher et rare comme le platine ni de réseau d'hydrogène puisqu'elles peuvent fonctionner au gaz naturel. À l'EPFL, on a mesuré des rendements électriques allant jusqu'à 70 % pour de petits assemblages de piles et une compagnie garantie actuellement 50 % sur 10 ans de rendement mais les coûts spécifiques restent encore élevés, même si un prix de l'ordre de 5 000 €/kW est un des objectifs pour ces prochaines années sur le marché européen. L'autre avantage futur est qu'on pourra inverser le processus et ainsi produire de l'hydrogène avec des excédents d'électricité en produisant localement de l'hydrogène et puis ensuite en l'utilisant lorsqu'on a besoin d'électricité.

Notes

Summary



Centrales chaleur-force (cogénération)



- Étant donné que l'énergie chimique des combustibles ne peut être entièrement convertie en travail ou électricité, il y a donc nécessairement des rejets thermiques (conservation de l'énergie, Premier Principe de la thermodynamique)
- Une grande partie des rejets thermiques peut être valorisée à des fins de chauffage; on parle alors de *centrales chaleur-force* ou *centrales de cogénération d'électricité et de chaleur*
- Même si la conversion en électricité ne passe pas par l'énergie thermique dans les piles à combustible, il y a néanmoins des pertes internes qui conduisent également à des rejets thermiques

La transition énergétique suisse

Étant donné que l'énergie chimique des combustibles ne peut être convertie complètement en travail ou en électricité il y a donc nécessairement des rejets thermiques il s'agit du principe de conservation de l'énergie ou ce qu'on appelle le Premier Principe de la thermodynamique. Une grande partie des rejets thermiques peut être valorisée à des fins de chauffage. On parle alors de centrale chaleur-force ou de centrale de cogénération. Si on a de la combustion d'un combustible qui donne une chaleur Q_c , on peut générer de l'électricité et en même temps on peut fournir de la chaleur à un réseau de chauffage domestique ou industriel qui est à un niveau de température supérieur à celui de l'atmosphère. Même si la conversion en électricité des piles à combustible ici ne passe pas par l'énergie thermique, il y a néanmoins des pertes à l'intérieur de ces piles à combustible et ces pertes internes doivent également être éliminées par l'intermédiaire de rejet thermique. Elles peuvent aussi constituer des unités de cogénération.

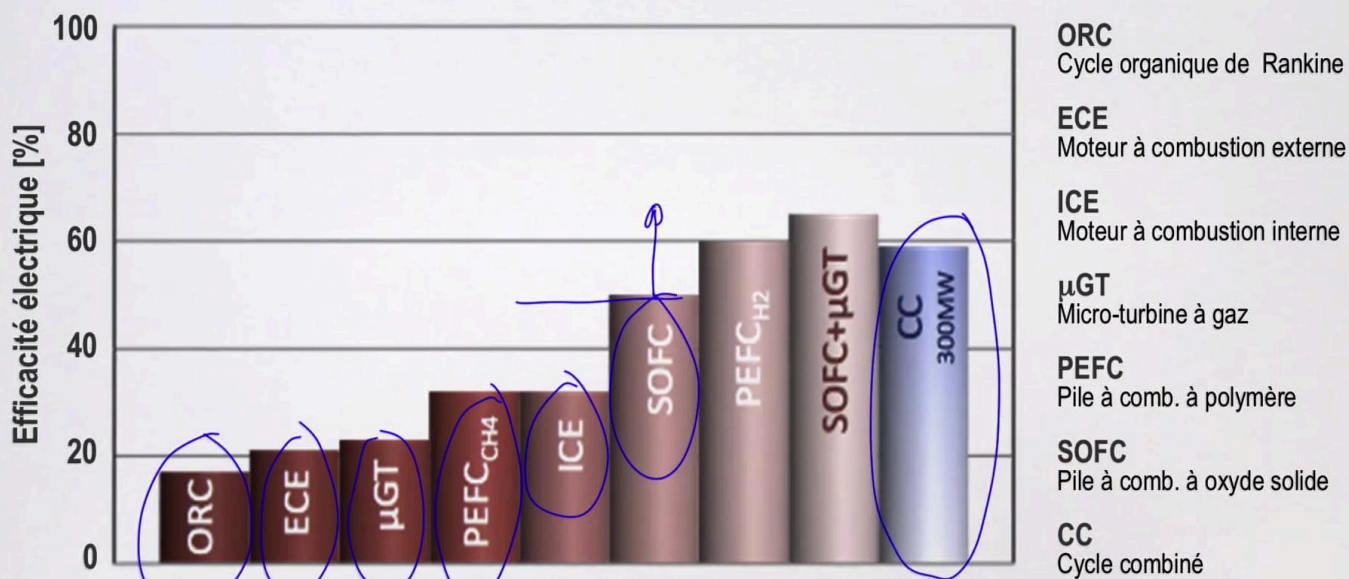
Notes

Summary



15m 27s

Efficacités électriques comparées



La transition énergétique suisse

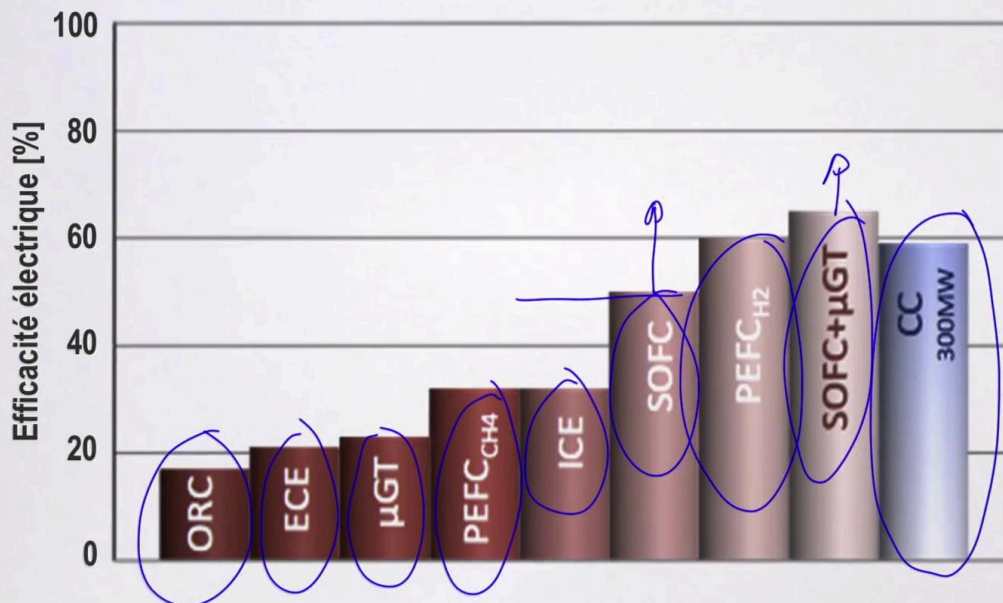
Ce graphique résume les rendements électriques que l'on peut obtenir avec différentes technologies de petite à moyenne puissance, de type nécessaire, par exemple, applicable dans les bâtiments en comparaison avec les grandes centrales à gaz qui sont représentées à droite en bleu où on atteint péniblement les 60 % de rendement ou d'efficacité électrique. Par conséquent, on voit ici sur ce diagramme des cycles qui sont surtout utilisés en récupération d'énergie thermique ou de géothermie que l'on appelle les cycles à fluides organiques de Rankin. On a les moteurs à combustion externe que sont le Sterling, par exemple. On trouve des petits moteurs Sterling domestiques. On a des micro-turbines à gaz qui sont plutôt dans la gamme des 50 à 100 kW. On a les piles à combustible à polymères mais alimentées en méthane on perd dans le processus de conversion. On a des moteurs à combustion interne comme les diesel ou les moteurs à gaz. On a aussi les piles à combustible SOFC à l'heure actuelle, on arrive à garantir des rendements supérieurs à 50 % mais les perspectives dans le futur sont très intéressantes vers le haut.

Notes

Summary



Efficacités électriques comparées



ORC
Cycle organique de Rankine

ECE
Moteur à combustion externe

ICE
Moteur à combustion interne

μGT
Micro-turbine à gaz

PEFC
Pile à comb. à polymère

SOFC
Pile à comb. à oxyde solide

CC
Cycle combiné

La transition énergétique suisse

On a les piles à combustible polymères qui sont alimentées directement en H₂ pur et finalement on peut avoir des combinaisons de piles à combustible SOFC et de microturbines à gaz qui nous permettent d'atteindre déjà potentiellement des 65 % mais qui pourraient encore voir des rendements plus élevés dans le futur.

Notes

Summary



18m 02s

Conversion des combustibles: tableau résumé

Combustion

- Technologies matures sur une très large gamme de puissances
- Coûts bas à grande puissance
- Nécessité d'installations de dépollution des gaz
- Rendements tendant à plafonner
- Moteurs et turbines induisent vibrations et bruits

Piles à combustible

- Technologies très performantes surtout à petite puissance
- Coûts encore élevés
- Pratiquement pas de polluants émis
- Rendements potentiels très élevés
- Pas de vibration ou bruit

La transition énergétique suisse

Résumons maintenant ce que nous avons dit. Nous avons, d'une part, des filières de combustion et des filières électrochimiques basées sur des piles à combustible. Les technologies de combustion sont matures et permettent de travailler sur une très grande gamme de puissance. Les technologies de piles à combustible sont très performantes, mais elles sont surtout avantageuses à petite puissance pour l'instant et si on veut travailler avec des grandes puissances il faudra mettre un certain nombre de ces piles côte à côte pour produire de grandes quantités d'électricité. Les coûts sont bas à grande puissance pour la combustion alors que les coûts sont encore très élevés dans les piles à combustible. La nécessité d'installation de dépollution des gaz est pénalisante pour la combustion et là on avait vu que notamment les oxydes d'azote nécessitent des installations de dépollution ou les particules. Pratiquement, à droite on voit que pour les piles à combustible, on n'a pas de pollution en dehors du CO₂ qui est inévitable. Les rendements tendent à plafonner pour les moteurs alors que les rendements potentiels des piles à combustible sont très très élevés.

Notes

Summary



18m 25s

Conversion des combustibles: tableau résumé

Combustion

- Technologies matures sur une très large gamme de puissances
- Coûts bas à grande puissance
- Nécessité d'installations de dépollution des gaz
- Rendements tendant à plafonner
- Moteurs et turbines induisent vibrations et bruits
- Domaine ayant bénéficié d'efforts de recherche et développement considérables

Piles à combustible

- Technologies très performantes surtout à petite puissance
- Coûts encore élevés
- Pratiquement pas de polluants émis
- Rendements potentiels très élevés
- Pas de vibration ou bruit
- Nécessité d'un prétraitement des combustible pour rendre ceux-ci compatibles
- Efforts de recherche restés faibles en comparaison avec la combustion

La transition énergétique suisse

Les moteurs et les turbines induisent des vibrations et des bruits qui sont particulièrement pénalisant dans les immeubles alors que les piles à combustible n'émettent pas de vibration ou de bruit puisqu'elles sont essentiellement statiques. Le domaine de la combustion a bénéficié d'efforts de recherche de développement considérable dans le passé. On a investi mille fois plus d'argent dans la combustion et les techniques affiliées que dans les piles à combustible. À l'heure actuelle, on a toujours un rapport 100 entre les investissements faits dans les dispositifs à combustion par rapport aux dispositifs à pile à combustible.

Notes

Summary



Conclusions



- Tous les combustibles qu'ils soient d'origine fossile ou tirés de la biomasse peuvent être convertis en électricité:
 - soit en passant par l'énergie thermique (chaleur)
 - soit directement (piles à combustible)

La transition énergétique suisse

Passons maintenant aux conclusions générales. tous les combustibles, qu'ils soient d'origine fossile ou tirés de la biomasse peuvent être convertis en électricité soit en passant par l'énergie thermique, la chaleur, soit en passant directement à l'électricité à l'aide de piles à combustible.

Notes

Summary



20m 20s

Conclusions



- Tous les combustibles qu'ils soient d'origine fossile ou tirés de la biomasse peuvent être convertis en électricité:
 - soit en passant par l'énergie thermique (chaleur)
 - soit directement (piles à combustible)
- Le rendement potentiel des piles à combustibles est supérieur à celui des technologies basées sur la combustion
- Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre on peut, soit améliorer le rendement, soit séparer le CO_2 pour le réutiliser, pour le stocker, ou faire l'un et l'autre
- Tous les combustibles peuvent être utilisés à l'aide de technologies mettant en oeuvre la cogénération

La transition énergétique suisse

Le rendement potentiel des piles à combustibles est supérieur à celui des technologies basées sur la combustion et surtout dans le futur. Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre on peut soit améliorer le rendement, soit séparer le CO_2 pour le réutiliser, pour le stocker et/ou faire l'un et l'autre. Tous les combustibles peuvent être utilisés à l'aide de technologies mettant en oeuvre la cogénération de chaleur et d'électricité.

Notes

Summary



20m 37s