



MINISTÈRES
ÉDUCATION
JEUNESSE
SPORTS
ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
RECHERCHE

Liberté
Égalité
Fraternité

Académie de Grenoble

LYCEE DES METIERS LA PLÉIADE

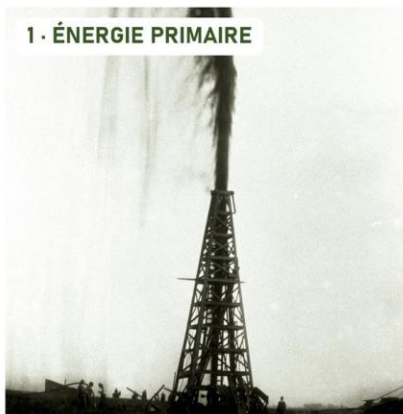
Pont de Cheruy



La chaîne d'énergie

Première STI2D – I2D

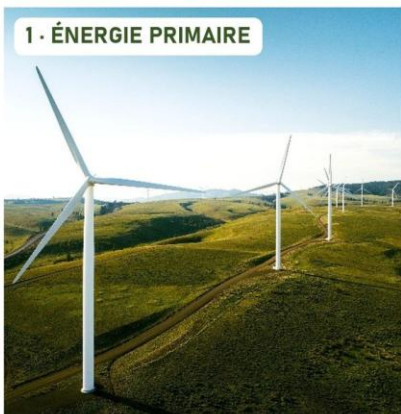
1 · ÉNERGIE PRIMAIRE



Le pétrole brut



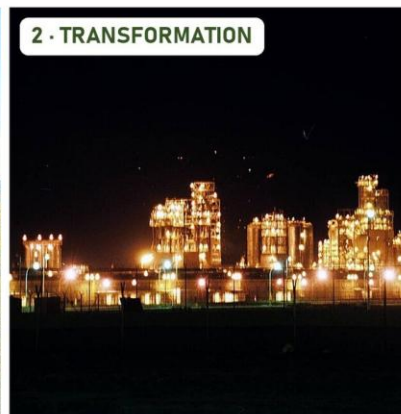
1 · ÉNERGIE PRIMAIRE



Le vent



2 · TRANSFORMATION



La raffinerie



2 · TRANSFORMATION



La centrale électrique



3 · TRANSPORT



Le réseau électrique



4 · ÉNERGIE UTILE



Le tramway de Lyon

Convertir l'énergie, de la ressource à l'usage

Première	La chaîne d'énergie		Cours – TP ₀₂
Objectifs :	▪ Comprendre le voyage de l'énergie, de la ressource naturelle jusqu'à l'usage, et repérer où elle se perd. ▪ Distinguer énergie primaire, secondaire, finale et utile ; source, forme et vecteur d'énergie. ▪ Utiliser $E = P \times t$ et convertir une énergie entre J, Wh, kWh, TWh, tep, tec, MBtu et kcal. ▪ Représenter une chaîne de puissance : fonctions, convertisseurs, stockage. ▪ Calculer un rendement, des pertes et un rendement global. ▪ Lire un diagramme de Sankey et exploiter des données chiffrées (pourcentages, camemberts) dans une démarche de développement durable.		
Compétences visées	Programme d'I2D (ingénierie et développement durable), classe de première STI2D : arrêté du 17 janvier 2019 – BO spécial n°1 du 22 janvier 2019 (NOR MENE1901591A), annexe 1. Spécialité suivie par tous les élèves de première STI2D. Compétences du programme (BO) : C01.1 Justifier les choix des structures matérielles et/ou logicielles d'un produit, identifier les flux mis en œuvre dans une approche de développement durable. → <i>flux d'énergie : sources, formes et vecteurs</i> C01.3 Justifier les solutions constructives d'un produit au regard des performances environnementales et estimer leur impact sur l'efficacité globale. → <i>rendement, pertes, efficacité globale d'une chaîne</i> C03.1 Identifier et caractériser les fonctions et les constituants d'un produit ainsi que ses entrées/sorties. → <i>fonctions et convertisseurs de la chaîne de puissance</i> Concrètement, l'élève saura : ▪ Calculer une énergie ou une puissance avec $E = P \times t$ et les préfixes k, M, G, T. ▪ Convertir une énergie d'une unité à l'autre en suivant une méthode en 4 étapes. ▪ Placer les étapes primaire → secondaire → finale → utile sur un exemple concret. ▪ Calculer un rendement, des pertes et un rendement global. ▪ Rédiger un calcul : relation littérale → application numérique → résultat avec unité.		
Connaissances associées (BO)	1.5.2 Mise à disposition des ressources : enjeux énergétiques mondiaux : extraction et transport, production centralisée ou locale 2.1 Représentation des flux MEI : notion de flux et de stock, principaux flux d'énergie, unités et calculs, diagrammes de Sankey 2.3.1 à 2.3.3 Chaînes de puissance : fonctions de la chaîne de puissance, stockage (chimique, mécanique, thermique), conversion de puissance 3.3 Comportement énergétique des produits : conservation de l'énergie, pertes et rendements, natures des sources d'énergie, bilan énergétique		
Durée	180 mn		
Discipline	AC – ITEC – EE		
Notation Pronote	20 points – TP (4 missions + bilan)	En binôme	
Coefficient	1		

CHAPITRE

02

La chaîne d'énergie

De la ressource à l'usage : convertir, transporter, utiliser

LE FIL ROUGE DU CHAPITRE : LE VOYAGE DE L'ÉNERGIE

ÉTAPE 1 → Énergie primaire	ÉTAPE 2 → Transformation	ÉTAPE 3 → Énergie secondaire	ÉTAPE 4 → Transport	ÉTAPE 5 → Énergie finale	ÉTAPE 6 Énergie utile
-------------------------------	-----------------------------	------------------------------------	------------------------	-----------------------------	--------------------------

LA QUESTION DU CHAPITRE

« Le plein d'essence, la prise de courant, le tramway que je prends le matin : **d'où vient cette énergie, combien en perd-on en route, et comment passer des joules aux kilowattheures ou aux tonnes d'équivalent pétrole sans jamais se tromper ?** »

JE SERAI CAPABLE DE...

- ☐ Utiliser la relation $E = P \times t$ et les **préfixes** (k, M, G, T).
- ☐ **Convertir** une énergie d'une unité à l'autre : J, Wh, kWh, TWh, tep, tec, MBtu, kcal.
- ☐ Citer les **formes d'énergie** et classer les **sources** (renouvelables ou non).
- ☐ Distinguer énergie **primaire**, **secondaire**, **finale** et **utile**.
- ☐ Représenter une **chaîne d'énergie** : fonctions, convertisseurs, stockage.
- ☐ Calculer un **rendement**, des **pertes** et un **rendement global**.
- ☐ Lire un **diagramme de Sankey** et calculer des **pourcentages**.

Coche chaque case quand la compétence est acquise.

AU PROGRAMME

- I L'énergie et la puissance**
 $E = P \times t$ · les formes d'énergie · les sources · les savants derrière les unités
- II Convertir sans se tromper**
préfixes · joule et kilowattheure · tep, tec, MBtu · pourcentages et camemberts
- III La chaîne d'énergie**
primaire, secondaire, finale, utile · fonctions · convertisseurs · stockage
- IV Rendement et pertes**
rendement · rendement global · diagramme de Sankey
- V Je m'entraîne**
formulaire · quiz · exercice corrigé · solutions des défis

PARTIE I

L'énergie et la puissance

DÉJÀ VU AU COLLÈGE

Ce que tu sais déjà

Au collège, tu as vu qu'un appareil électrique **consomme de l'énergie** et que sa **puissance** est écrite sur sa plaque signalétique (en watts). Tu as aussi vu que la facture d'électricité se paie en **kilowattheures**. Ce chapitre part de là... et va beaucoup plus loin : à la fin, tu sauras suivre l'énergie depuis le puits de pétrole jusqu'à la roue du tramway.

01 Énergie et puissance : deux grandeurs à ne pas confondre

L'**énergie** mesure la capacité à produire un changement : mettre un objet en mouvement, le soulever, le chauffer, l'éclairer... Son unité officielle (Système international) est le **joule (J)**.

La **puissance** mesure la **vitesse** à laquelle l'énergie est transférée ou convertie. Son unité est le **watt (W)**. Un appareil de 2 000 W transforme 2 000 joules **chaque seconde**.

IMAGE MENTALE

La baignoire

Imagine une baignoire qui se remplit. Le **débit du robinet** (en litres par seconde) correspond à la **puissance**. Le **volume d'eau** dans la baignoire (en litres) correspond à l'**énergie**. Un gros débit pendant peu de temps peut remplir autant qu'un petit débit pendant longtemps.

FORMULE

Énergie, puissance et durée

$$E = P \times t$$

E : énergie · P : puissance · t : durée

SI P EST EN...	ET T EN...	ALORS E EST EN...	UTILISATION
watt (W)	seconde (s)	joule (J)	unité officielle, calculs de physique
watt (W)	heure (h)	wattheure (Wh)	petites batteries (téléphone, trottinette)
kilowatt (kW)	heure (h)	kilowattheure (kWh)	facture d'électricité, voiture électrique

On en déduit aussi : $P = E / t$ et $t = E / P$.

PIÈGE À ÉVITER

kW ou kWh ?

- Le **kW** est une unité de **puissance** (ce que l'appareil « tire » à un instant donné).
- Le **kWh** est une unité d'**énergie** (ce que l'appareil a consommé pendant une durée).
- Le « kW/h » **n'existe pas** : c'est une erreur fréquente, même dans les journaux !

EXEMPLE RÉSOLU

Le sèche-cheveux

Un sèche-cheveux de puissance **2 000 W** fonctionne pendant **6 min**.

a) Énergie consommée en joules

Relation littérale $E = P \times t$ (P en W, t en s)

Application numérique $E = 2\,000 \times (6 \times 60) = 2\,000 \times 360$

Résultat **$E = 720\,000 \text{ J} = 720 \text{ kJ}$**

b) Énergie consommée en kilowattheures

Relation littérale $E = P \times t$ (P en kW, t en h)

Application numérique $E = 2 \times (6 / 60) = 2 \times 0,1$

Résultat **$E = 0,2 \text{ kWh}$**

Interprétation on retrouve le même résultat sous deux formes : $720\,000 \text{ J} = 0,2 \text{ kWh}$. Le kWh est simplement une unité plus « grosse » que le joule.

EXEMPLE RÉSOLU

La console de jeu

Une console de jeu consomme **150 W**. Lucas joue **3 h par jour** pendant **30 jours**. Le prix de l'électricité est supposé égal à **0,20 € par kWh**.

a) Énergie consommée en un mois

Relation littérale $E = P \times t$

Application numérique $E = 0,150 \text{ kW} \times (3 \text{ h} \times 30) = 0,150 \times 90$

Résultat **$E = 13,5 \text{ kWh}$**

b) Coût de l'électricité

Relation littérale $\text{Coût} = E \times \text{prix du kWh}$

Application numérique $\text{Coût} = 13,5 \times 0,20$

Résultat **$\text{Coût} = 2,70 \text{ €}$**

Interprétation pas énorme pour une console... mais un foyer compte des dizaines d'appareils, qui fonctionnent toute l'année.

ORDRES DE GRANDEUR

Quelques puissances à connaître

APPAREIL OU SYSTÈME	PUISSANCE	APPAREIL OU SYSTÈME	PUISSANCE
Lampe LED	5 à 10 W	Four électrique	≈ 2 500 W
Humain au repos	≈ 100 W	Voiture citadine	≈ 70 kW
Console de jeu	≈ 150 W	Éolienne terrestre	2 à 3 MW
Sèche-cheveux	≈ 2 000 W	Réacteur nucléaire (électrique)	900 à 1 650 MW

DÉFI EXPRESS

Défi n° 1 — à toi de jouer !

Un radiateur électrique de **1 500 W** fonctionne **4 h**. Calcule l'énergie consommée en **kWh**, puis en **mégajoules** ($1 \text{ MJ} = 1\,000\,000 \text{ J}$).

Réponse à la fin du cours (page « Solutions des défis »). Ne triche pas !

02 Les formes d'énergie

L'énergie se présente sous plusieurs **formes**. Toute la technologie consiste à la faire passer d'une forme à une autre, grâce à des **convertisseurs** (partie III).

FORME D'ÉNERGIE	D'OÙ VIENT-ELLE ?	EXEMPLES
Mécanique	mouvement (énergie cinétique) ou hauteur (énergie potentielle)	vent, eau d'un barrage, roue qui tourne
Thermique	agitation des particules (température)	radiateur, eau chaude, géothermie
Chimique	liaisons entre les atomes	pétrole, gaz, bois, piles, batteries, aliments
Électrique	déplacement de charges électriques	courant dans un câble, prise de courant
Rayonnante	lumière, ondes électromagnétiques	Soleil, lampe LED, micro-ondes
Nucléaire	noyaux des atomes	uranium dans un réacteur, Soleil (fusion)

À RETENIR

Le principe de conservation

L'énergie **ne se crée pas** et **ne disparaît pas** : elle se **convertit** d'une forme à une autre. Quand on dit qu'on « perd » de l'énergie, elle n'est pas détruite : elle part sous une forme **inutile**, le plus souvent de la **chaleur**.

03 Les sources d'énergie : renouvelables ou non ?

Une **source d'énergie** est ce que l'on trouve dans la nature et que l'on exploite pour obtenir de l'énergie.

NON RENOUVELABLES (STOCKS)	RENOUVELABLES (FLUX)
Pétrole, gaz naturel, charbon : énergies fossiles , formées en des millions d'années.	Soleil, vent, eau (rivières, marées), biomasse (bois, déchets), géothermie (chaleur de la Terre).
Uranium : combustible des centrales nucléaires, extrait de mines.	Elles se renouvellent à l'échelle d'une vie humaine (ou plus vite).
Leurs réserves s'épuisent à l'échelle humaine.	Leur production est souvent variable (jour/nuit, météo).

PIÈGE À ÉVITER

L'électricité n'est pas une source d'énergie

L'électricité ne se trouve pas toute prête dans la nature : il faut la **produire** à partir d'une source (uranium, vent, soleil, gaz...). C'est un **vecteur d'énergie** : elle **transporte** l'énergie jusqu'à l'utilisateur. L'**hydrogène** est aussi un vecteur.

LE SAVAIS-TU ?

Le monde roule encore aux énergies fossiles

En 2019, l'humanité a consommé **13 944 Mtep** d'énergie primaire (source : BP). Pétrole, charbon et gaz en représentaient **84 %** ! On calculera ce pourcentage nous-mêmes dans la partie II.

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Des savants derrière les unités

DATE	QUI ?	SON APPORT
1769	James Watt (Écosse)	Perfectionne la machine à vapeur et compare sa puissance à celle des chevaux : le cheval-vapeur . L'unité de puissance porte son nom : le watt .
1800	Alessandro Volta (Italie)	Invente la pile électrique : première source de courant continu. → le volt .
1820	André-Marie Ampère (né à Lyon)	Fonde l'électrodynamique : le courant électrique crée des forces. → l' ampère .
1843	James Prescott Joule (Angleterre)	Montre que le travail mécanique et la chaleur sont deux formes de la même énergie . → le joule .

PARTIE II

Convertir sans se tromper

Selon le domaine, on ne mesure pas l'énergie avec la même unité : le **kWh** pour l'électricité, la **kcal** sur les emballages alimentaires, la **tep** pour les bilans d'un pays, le **MBtu** pour le commerce du gaz... Savoir **convertir** est donc indispensable pour comparer.

04 Les préfixes : l'escalier des puissances de 10

PRÉFIXE	SYMBOLE	FACTEUR	ÉCRITURE	EXEMPLE
téra	T	10^{12}	1 000 000 000 000	production électrique d'un pays (TWh)
giga	G	10^9	1 000 000 000	production d'une centrale (GWh)
méga	M	10^6	1 000 000	puissance d'une éolienne (MW)
kilo	k	10^3	1 000	facture d'électricité (kWh)
milli	m	10^{-3}	0,001	capacité d'une batterie (mAh)

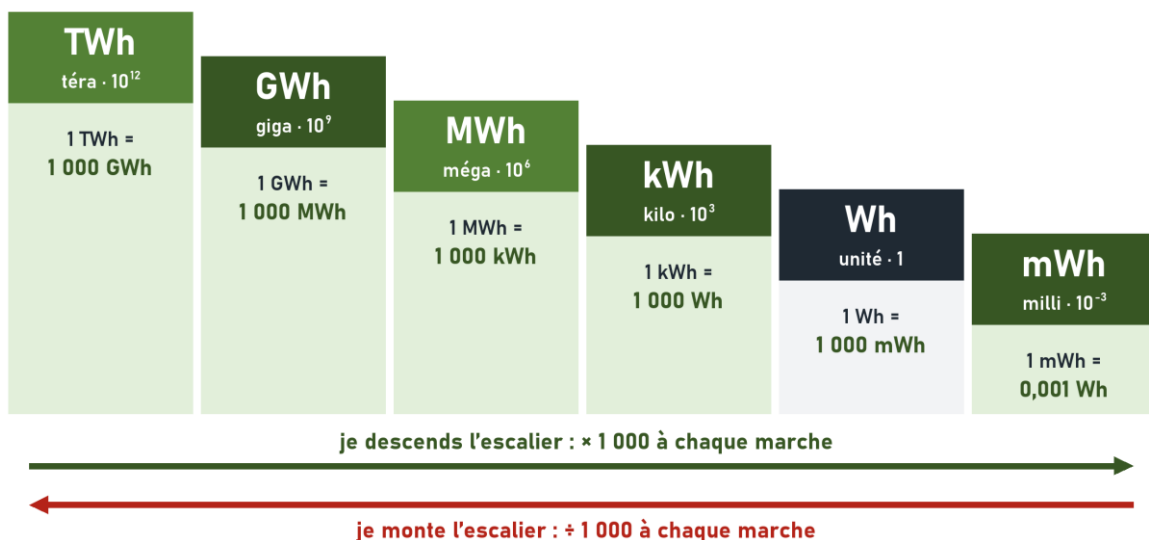


FIG. 1 L'escalier des préfixes : chaque marche vaut un facteur 1 000.

PIÈGE À ÉVITER

m ou M ?

m (minuscule) = milli = 0,001 · **M** (majuscule) = méga = 1 000 000. Un facteur **un milliard** sépare les deux : la casse compte !

EXEMPLE RÉSOLU

Descendre et monter l'escalier

a) Convertir 1,5 GW en kW

Relation littérale giga → méga → kilo : on descend 2 marches, donc $\times 1\,000 \times 1\,000$

Application numérique $1,5 \times 1\,000 \times 1\,000$

Résultat **1,5 GW = 1 500 000 kW**

b) Convertir 37 700 GWh en TWh

Relation littérale giga → téra : on monte 1 marche, donc $\div 1\,000$

Application numérique $37\,700 \div 1\,000$

Résultat **37 700 GWh = 37,7 TWh**

DÉFI EXPRESS

Défi n° 2 — à toi de jouer !

Convertis **2,5 GWh** en **kWh**, puis **850 000 Wh** en **MWh**.

Réponse à la fin du cours (page « Solutions des défis »). Ne triche pas !

05 Du joule au kilowattheure

Une heure dure **3 600 secondes**. Un appareil de 1 W qui fonctionne 1 h transfère donc $1 \times 3\,600 = 3\,600$ J. D'où les deux égalités à connaître par cœur :

FORMULE

Les deux égalités à connaître par cœur

$$1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J} \qquad 1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

J → kWh : on **divise** par 3 600 000 · kWh → J : on **multiplie** par 3 600 000

EXEMPLE RÉSOLU

La batterie du smartphone

La batterie d'un smartphone indique **3,85 V** et **4 000 mAh**. L'énergie stockée dans une batterie se calcule par **E = U × Q**, avec U en volts et Q (la capacité) en ampères-heures : on obtient des **wattheures**.

a) Capacité en ampères-heures

Relation littérale 1 mAh = 0,001 Ah

Application numérique $Q = 4\,000 \times 0,001$

Résultat **Q = 4 Ah**

b) Énergie stockée en Wh

Relation littérale $E = U \times Q$

Application numérique $E = 3,85 \times 4$

Résultat **E = 15,4 Wh**

c) Énergie stockée en joules

Relation littérale $E \text{ (J)} = E \text{ (Wh)} \times 3\,600$

Application numérique $E = 15,4 \times 3\,600$

Résultat **E = 55 440 J ≈ 55 kJ**

Interprétation une recharge complète de téléphone ne coûte que 15,4 Wh, soit 0,0154 kWh : moins d'un centime d'euro.

EXEMPLE RÉSOLU

La barre chocolatée

Une barre chocolatée apporte **250 kcal** (lu sur l'emballage). On rappelle que **1 kcal = 4,18 kJ**.

a) Énergie en kilojoules

Relation littérale $E \text{ (kJ)} = E \text{ (kcal)} \times 4,18$

Application numérique $E = 250 \times 4,18$

Résultat **$E = 1\,045 \text{ kJ} = 1\,045\,000 \text{ J}$**

b) Énergie en kWh

Relation littérale $E \text{ (kWh)} = E \text{ (J)} \div 3\,600\,000$

Application numérique $E = 1\,045\,000 \div 3\,600\,000$

Résultat **$E \approx 0,29 \text{ kWh} = 290 \text{ Wh}$**

c) Combien de temps pourrait-on éclairer une lampe LED de 10 W ?

Relation littérale $t = E / P$

Application numérique $t = 290 \text{ Wh} / 10 \text{ W}$

Résultat **$t = 29 \text{ h}$**

Interprétation une seule barre chocolatée contient l'énergie nécessaire pour éclairer une pièce pendant plus d'une journée !

LE SAVAIS-TU ?

Grimper avec une barre chocolatée

Pour monter une hauteur h , il faut fournir l'énergie **$E = m \times g \times h$** (m en kg, $g = 9,81 \text{ N/kg}$, h en m). Avec les 1 045 kJ de la barre, une personne de 60 kg pourrait théoriquement monter de $h = 1\,045\,000 / (60 \times 9,81) \approx 1\,775 \text{ m}$. En réalité, nos muscles n'ont qu'un rendement d'environ 25 % : on ne monte « que » de 440 m environ. Le reste part en **chaleur**... c'est pour cela qu'on transpire !

06 Les unités des énergéticiens : tep, tec, MBtu

Pour additionner du pétrole, du charbon, du gaz et de l'électricité dans le **bilan énergétique d'un pays**, on les exprime dans une unité commune. La plus utilisée est la **tep**.

UNITÉ	SIGNIFICATION	ÉQUIVALENCE
tep	tonne d'équivalent pétrole : énergie libérée par la combustion d' une tonne de pétrole	1 tep = 41,868 GJ = 11 630 kWh
Mtep	million de tep (bilans nationaux et mondiaux)	1 Mtep = 11,63 TWh
tec	tonne d'équivalent charbon : le charbon est moins énergétique que le pétrole	1 tec = 0,7 tep
MBtu	million de British thermal units (commerce du gaz, en Amérique et en Asie)	1 tep $\approx$ 39,68 MBtu ; 1 MBtu = 1,055 GJ
kcal	kilocalorie (alimentation)	1 kcal = 4,18 kJ

La carte des conversions d'énergie : suivez les flèches !

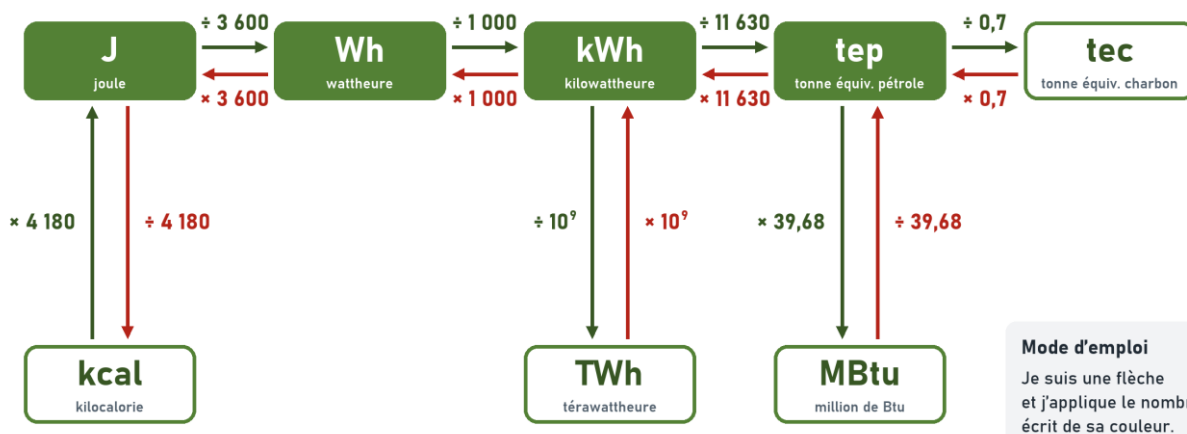


FIG. 2 La carte des conversions : suis les flèches et applique le facteur écrit de la même couleur.

MÉTHODE

Convertir en 4 étapes

1. J'écris l'égalité de conversion (par exemple $1 \text{ tep} = 11\,630 \text{ kWh}$).
2. Je me demande si l'unité d'arrivée est **plus grande** ou **plus petite** : vers une unité plus grande, le nombre **diminue** (je divise) ; vers une unité plus petite, il **augmente** (je multiplie).
3. Je pose le calcul en écrivant les **unités** à chaque ligne.
4. Je vérifie l'ordre de grandeur du résultat.

EXEMPLE RÉSOLU

Le plein d'essence

Un automobiliste fait le plein : **50 L** d'essence. Chaque litre d'essence libère environ **32 MJ** en brûlant.

a) Énergie contenue dans le plein, en MJ

Relation littérale $E = V \times 32 \text{ MJ/L}$

Application numérique $E = 50 \times 32$

Résultat $E = 1\,600 \text{ MJ} = 1\,600\,000\,000 \text{ J}$

b) Conversion en kWh

Relation littérale $E (\text{kWh}) = E (\text{J}) \div 3\,600\,000$

Application numérique $E = 1\,600\,000\,000 \div 3\,600\,000$

Résultat $E \approx 444 \text{ kWh}$

c) Conversion en tep

Relation littérale $E (\text{tep}) = E (\text{kWh}) \div 11\,630$

Application numérique $E = 444 \div 11\,630$

Résultat $E \approx 0,038 \text{ tep}$

Interprétation un plein contient 444 kWh. Une voiture électrique qui consomme 15 kWh aux 100 km pourrait, avec la même énergie, rouler près de 3 000 km ! La voiture à essence, elle, ne fait qu'environ 800 km : elle **perd** la plus grande partie de l'énergie en chaleur (partie IV).

EXEMPLE RÉSOLU

La centrale à charbon

Une centrale électrique brûle **2 Mtec** de charbon par an.

a) Conversion en Mtep

Relation littérale $1 \text{ tec} = 0,7 \text{ tep}$

Application numérique $2 \times 0,7$

Résultat **2 Mtec = 1,4 Mtep**

b) Conversion en TWh

Relation littérale $1 \text{ Mtep} = 11,63 \text{ TWh}$

Application numérique $1,4 \times 11,63$

Résultat **$\approx 16,3 \text{ TWh}$**

Interprétation c'est l'énergie **thermique** libérée par le charbon. Avec un rendement d'environ 40 %, la centrale produit environ 6,5 TWh d'électricité.

EXEMPLE RÉSOLU**Le méthanier**

Un navire méthanier livre **3,5 millions de MBtu** de gaz naturel liquéfié.

a) Conversion en tep

Relation littérale $1 \text{ tep} = 39,68 \text{ MBtu}$, donc on divise par 39,68

Application numérique $3\,500\,000 \div 39,68$

Résultat **$\approx 88\,200 \text{ tep}$**

b) Conversion en GWh

Relation littérale $1 \text{ tep} = 11\,630 \text{ kWh}$

Application numérique $88\,200 \times 11\,630 = 1\,025\,766\,000 \text{ kWh}$

Résultat **$\approx 1\,026 \text{ GWh} \approx 1 \text{ TWh}$**

Interprétation un seul bateau transporte environ 1 TWh, de quoi chauffer environ 80 000 logements au gaz pendant un an (en comptant 12 500 kWh par logement).

PIÈGE À ÉVITER**Le cas de l'électricité dans les bilans officiels**

Dans ce cours, on convertit toujours l'électricité avec **1 Mtep = 11,63 TWh**. Les statistiques officielles comptent parfois l'électricité **nucléaire** autrement : comme une centrale n'a qu'un rendement d'environ 33 %, elles comptent l'énergie **thermique** du réacteur ($1 \text{ TWh électrique} \leftrightarrow 0,26 \text{ Mtep}$). Si un sujet donne une autre convention, c'est **toujours** celle du sujet qu'il faut appliquer.

DÉFI EXPRESS**Défi n° 3 — à toi de jouer !**

En 2019, la France a consommé **152,3 Mtep** d'énergie finale. Convertis cette énergie en **TWh**.

Réponse à la fin du cours (page « Solutions des défis »). Ne triche pas !

07 Calculer une part en pourcentage

FORMULE

Part en pourcentage et angle d'un camembert

$$part (\%) = \frac{valeur}{total} \times 100 \quad angle (^{\circ}) = part (\%) \times 3,6$$

Vérification : la somme des parts vaut **100 %** et la somme des angles vaut **360°**.

EXEMPLE RÉSOLU

L'énergie primaire du monde en 2019

Consommation mondiale d'énergie primaire en 2019 : **13 944 Mtep**, dont pétrole **4 610**, charbon **3 770**, gaz **3 378**, nucléaire **595**, hydroélectricité **899**, solaire, éolien et autres **692** (en Mtep, source : BP).

a) Part du pétrole

Relation littérale $part = valeur / total \times 100$

Application numérique $part = 4\,610 / 13\,944 \times 100$

Résultat **part $\approx 33,1 \%$**

b) Part des énergies fossiles

Relation littérale $part = (pétrole + charbon + gaz) / total \times 100$

Application numérique $part = (4\,610 + 3\,770 + 3\,378) / 13\,944 \times 100 = 11\,758 / 13\,944 \times 100$

Résultat **part $\approx 84,3 \%$**

c) Part des énergies renouvelables

Relation littérale $part = (hydro + solaire, éolien...) / total \times 100$

Application numérique $part = (899 + 692) / 13\,944 \times 100 = 1\,591 / 13\,944 \times 100$

Résultat **part $\approx 11,4 \%$**

d) Angle du pétrole dans un camembert

Relation littérale $angle = part \times 3,6$

Application numérique $angle = 33,1 \times 3,6$

Résultat **angle $\approx 119^{\circ}$**

Interprétation le pétrole occupe à lui seul un tiers du camembert. Fossiles $84,3 \%$ + renouvelables $11,4 \%$ + nucléaire $4,3 \%$ = 100% : le compte est bon.

PARTIE III

La chaîne d'énergie

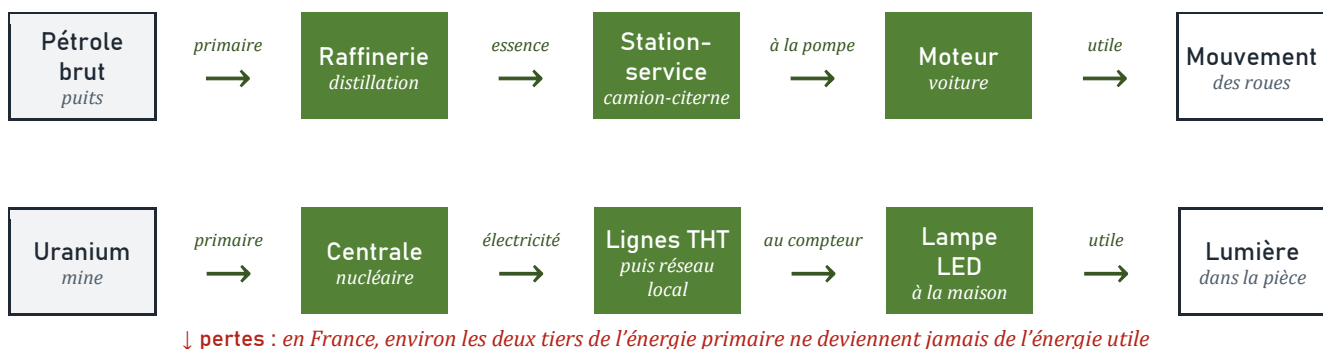
08 De l'énergie primaire à l'énergie utile

Entre le puits de pétrole et la roue de la voiture, l'énergie fait un long voyage. À chaque étape, elle change de nom :

ÉNERGIE...	DÉFINITION	EXEMPLES
primaire	telle qu'on la trouve dans la nature , avant toute transformation	pétrole brut, charbon, gaz, uranium, vent, soleil, chute d'eau, bois
secondaire	obtenue après une transformation (raffinerie, centrale)	essence, gazole, électricité produite par la centrale
finale	livrée et facturée au consommateur	carburant à la pompe, électricité au compteur, gaz livré
utile	celle qui sert vraiment à l'usage voulu	mouvement des roues, lumière de la lampe, chaleur dans la pièce



Deux voyages typiques :



À RETENIR

Le voyage de l'énergie

primaire → (transformation) → **secondaire** → (transport, distribution) → **finale** → (utilisation) → **utile**.
L'énergie diminue à chaque étape : les **pertes** partent principalement en **chaleur**.

09 Les fonctions d'une chaîne de puissance

Dans un système technique, l'énergie passe par une suite de **fonctions**. On les représente par des **blocs** reliés par des flèches qui portent la **forme d'énergie** transmise : c'est la **chaîne de puissance**.

FONCTION	RÔLE	EXEMPLES DE COMPOSANTS
Capter / alimenter	prélever l'énergie à la source	panneau solaire, pales d'éolienne, prise de courant
Stocker	garder l'énergie pour plus tard	batterie, réservoir, barrage, ballon d'eau chaude
Transporter, distribuer	acheminer l'énergie jusqu'à l'utilisateur	câbles, lignes haute tension, oléoduc, tuyaux
Moduler	doser la quantité d'énergie envoyée	variateur de vitesse, interrupteur, gradateur
Convertir	changer la forme de l'énergie	moteur, génératrice, chaudière, lampe
Adapter, transmettre	adapter la vitesse, le couple ou la tension	engrenages, courroie, transformateur, chargeur

Exemple 1 : la trottinette électrique



Exemple 2 : l'éolienne



↓ pertes : frottements dans le multiplicateur, échauffement de la génératrice et des câbles

10 Les convertisseurs d'énergie

Un **convertisseur** change la forme de l'énergie. Certains sont **réversibles** : ils savent faire la conversion dans les deux sens.

CONVERSION	CONVERTISSEUR	RÉVERSIBLE ?	EXEMPLE
électrique → mécanique	moteur électrique	oui : génératrice, alternateur	le tramway freine en produisant de l'électricité
chimique → thermique	chaudière, combustion	non	chaudière au gaz, feu de bois
chimique ↔ électrique	batterie, pile	oui pour la batterie (charge et décharge)	smartphone, voiture électrique
électrique ↔ lumineuse	lampe LED, panneau photovoltaïque	oui : la cellule PV fait l'inverse de la LED	éclairage, toit solaire
électrique → thermique	radiateur, bouilloire (effet Joule)	non	chauffage électrique
thermique → mécanique	moteur thermique, turbine à vapeur	non (en pratique)	voiture, centrale électrique
nucléaire → thermique	réacteur nucléaire	non	centrale du Bugey (Ain)

LE SAVAIS-TU ?

Le tramway qui recharge le réseau

Quand un tramway freine, son moteur devient une **génératrice** : l'énergie **mécanique** du tram est reconvertie en énergie **électrique**, au lieu d'être perdue en chaleur dans les freins. C'est le **freinage récupératif**, utilisé aussi par les voitures électriques et hybrides.

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Les premiers convertisseurs de l'histoire

DATE	QUI ?	SON APPORT
I ^{er} s.	Héron d'Alexandrie (Égypte)	L' éolipyle : une sphère qui tourne sous l'action de la vapeur. C'est le premier convertisseur thermique → mécanique connue.
1206	Al-Jazari (Haute-Mésopotamie)	Décrit des pompes entraînées par une roue hydraulique avec un système bielle-manivelle , qui transforme une rotation en va-et-vient.
1769	James Watt (Écosse)	Machine à vapeur à condenseur séparé : elle consomme beaucoup moins de charbon.
1831	Michael Faraday (Angleterre)	Découvre l' induction : le principe de toutes les génératrices (mécanique → électrique).
1954	Chapin, Fuller et Pearson (États-Unis)	Première cellule photovoltaïque au silicium : lumière → électricité .

11 Stocker l'énergie

L'énergie électrique se stocke mal telle quelle : on la convertit dans une autre forme, plus facile à conserver.

TYPE DE STOCKAGE	PRINCIPE	EXEMPLES
Chimique	l'énergie est gardée dans des liaisons chimiques	batterie, pile, carburants, hydrogène
Mécanique	énergie potentielle (hauteur) ou cinétique (rotation)	barrage de pompage-turbinage (STEP), volant d'inertie
Thermique	on stocke de la chaleur dans une matière	ballon d'eau chaude, réservoir de sels fondus

FORMULE

Deux formules pour le stockage

$$E = U \times Q \quad E = m \times g \times h$$

Batterie : U (V) ; Q, capacité (Ah) → E en Wh · **Hauteur** : m (kg) ; g = 9,81 N/kg ; h (m) → E en J

EXEMPLE RÉSOLU

La STEP de Grand'Maison (Isère)

Dans l'Isère, la centrale de **Grand'Maison** pompe de l'eau vers un lac situé environ **900 m** plus haut quand l'électricité est abondante, puis la turbine quand on en a besoin. On étudie **1 m³** d'eau, soit **1 000 kg**.

a) Énergie stockée en joules

Relation littérale $E = m \times g \times h$

Application numérique $E = 1\,000 \times 9,81 \times 900$

Résultat $E = 8\,829\,000 \text{ J} \approx 8,83 \text{ MJ}$

b) Énergie stockée en kWh

Relation littérale $E (\text{kWh}) = E (\text{J}) \div 3\,600\,000$

Application numérique $E = 8\,829\,000 \div 3\,600\,000$

Résultat $E \approx 2,45 \text{ kWh}$

Interprétation chaque mètre cube remonté, stocke 2,45 kWh. Avec des millions de mètres cubes, la STEP agit comme une gigantesque **batterie à eau**.

EXEMPLE RÉSOLU

La batterie de trottinette

La batterie d'une trottinette indique **36 V** et **10 Ah**.

Énergie stockée

Relation littérale $E = U \times Q$

Application numérique $E = 36 \times 10$

Résultat **$E = 360 \text{ Wh} = 0,36 \text{ kWh}$**

Interprétation en joules : $360 \times 3\,600 = 1\,296\,000 \text{ J} \approx 1,3 \text{ MJ}$. C'est environ 140 fois moins qu'une batterie de voiture électrique de 50 kWh.

PARTIE IV

Rendement et pertes

12 Rien ne se perd... mais tout ne sert pas

Tout convertisseur reçoit une **énergie absorbée** (ou puissance absorbée). Il en restitue une partie sous la forme voulue : l'**énergie utile**. Le reste constitue les **pertes**, le plus souvent de la chaleur.



FORMULE

Rendement et pertes

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{W_u}{W_a} \quad \text{Pertes} = P_a - P_u$$

η (lettre grecque « éta ») : rendement, **sans unité**, toujours **compris entre 0 et 1** (ou entre 0 et 100 %).

Formules dérivées : $P_u = \eta \times P_a$ et $P_a = P_u / \eta$

PIÈGE À ÉVITER

Trois erreurs classiques

- Un rendement **supérieur à 1** (ou à 100 %) est **impossible** : sinon, on créerait de l'énergie.
- Le rendement, c'est **utile ÷ absorbée**, jamais l'inverse.
- Utile et absorbée doivent être dans la **même unité** (W et W, ou kWh et kWh).

EXEMPLE RÉSOLU

Le moteur de trottinette

Le moteur d'une trottinette absorbe **350 W** et fournit **280 W** à la roue.

a) Rendement

Relation littérale $\eta = P_u / P_a$

Application numérique $\eta = 280 / 350$

Résultat $\eta = 0,80 = 80 \%$

b) Pertes

Relation littérale $\text{Pertes} = P_a - P_u$

Application numérique $\text{Pertes} = 350 - 280$

Résultat **Pertes = 70 W**

Interprétation ces 70 W chauffent le moteur : c'est pour cela qu'il est tiède après une longue montée.

EXEMPLE RÉSOLU

LED contre halogène

Pour éclairer autant, il faut une lampe halogène de **40 W** ou une lampe LED de **5 W**. La lampe fonctionne **1 000 h** dans l'année ; l'électricité coûte **0,20 €/kWh**.

a) Énergie consommée par chaque lampeRelation littérale $E = P \times t$ Application numérique $E_{\text{halogène}} = 0,040 \times 1\,000$; $E_{\text{LED}} = 0,005 \times 1\,000$ Résultat $E_{\text{halogène}} = 40 \text{ kWh}$; $E_{\text{LED}} = 5 \text{ kWh}$ **b) Économie réalisée avec la LED**Relation littérale Économie = $(E_{\text{halogène}} - E_{\text{LED}}) \times \text{prix}$ Application numérique Économie = $(40 - 5) \times 0,20$ Résultat **Économie = 7 € par an et par lampe**

Interprétation la lampe halogène transforme l'essentiel de son énergie en chaleur au lieu de lumière : son rendement est très faible.

DÉFI EXPRESS**Défi n° 4 — à toi de jouer !**Un moteur absorbe **1,5 kW** et fournit **1,2 kW**. Calcule son rendement et ses pertes.

Réponse à la fin du cours (page « Solutions des défis »). Ne triche pas !

13 Le rendement global d'une chaîne

Quand l'énergie traverse plusieurs convertisseurs les uns après les autres, chacun prélève sa part de pertes. Le rendement de la chaîne complète est le **produit** des rendements.

FORMULE**Rendement global**

$$\eta_{\text{global}} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots$$

Le rendement global est **toujours plus petit** que le plus petit des rendements de la chaîne.**EXEMPLE RÉSOLU****La trottinette, de la prise à la roue**Chargeur : $\eta_1 = 0,90$ · batterie : $\eta_2 = 0,95$ · contrôleur : $\eta_3 = 0,95$ · moteur : $\eta_4 = 0,80$.**a) Rendement global**Relation littérale $\eta_g = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4$ Application numérique $\eta_g = 0,90 \times 0,95 \times 0,95 \times 0,80$ Résultat $\eta_g \approx 0,65 = 65 \%$ **b) Énergie à prélever sur le réseau pour fournir 0,28 kWh à la roue**Relation littérale $W_a = W_u / \eta_g$ Application numérique $W_a = 0,28 / 0,65$ Résultat $W_a \approx 0,43 \text{ kWh}$

Interprétation sur 100 kWh pris à la prise, 65 kWh font avancer la trottinette et 35 kWh partent en chaleur.

EXEMPLE RÉSOLU**Voiture électrique ou voiture à essence : qui gaspille le moins ?**

Voiture électrique : centrale $\eta = 0,33$ (nucléaire) · réseau $\eta = 0,93$ · chargeur $\eta = 0,90$ · batterie $\eta = 0,90$ · moteur $\eta = 0,90$.

Voiture à essence : raffinage et transport $\eta = 0,85$ · moteur $\eta = 0,30$ · transmission $\eta = 0,90$.

a) Rendement global de la voiture électrique

Relation littérale η_g = produit des 5 rendements

Application numérique $\eta_g = 0,33 \times 0,93 \times 0,90 \times 0,90 \times 0,90$

Résultat $\eta_g \approx 0,22 = 22 \%$

b) Rendement global de la voiture à essence

Relation littérale η_g = produit des 3 rendements

Application numérique $\eta_g = 0,85 \times 0,30 \times 0,90$

Résultat $\eta_g \approx 0,23 = 23 \%$

c) Et si l'électricité vient d'un barrage ($\eta = 0,85$) ?

Relation littérale même calcul en remplaçant 0,33 par 0,85

Application numérique $\eta_g = 0,85 \times 0,93 \times 0,90 \times 0,90 \times 0,90$

Résultat $\eta_g \approx 0,58 = 58 \%$

Interprétation avec de l'électricité nucléaire, les deux voitures se valent en rendement « de la source à la roue » ; avec de l'hydraulique, l'électrique est 2,5 fois meilleure. Le choix de la **source** compte autant que celui du **véhicule**.

DÉFI EXPRESS

Défi n° 5 — à toi de jouer !

Une chaîne comporte trois convertisseurs de rendements **0,95, 0,90 et 0,85**. Calcule le rendement global.

Réponse à la fin du cours (page « Solutions des défis »). Ne triche pas !

14 Le diagramme de Sankey

Un **diagramme de Sankey** représente les flux d'énergie par des flèches dont la **largeur est proportionnelle** à l'énergie transportée. D'un coup d'œil, on voit où part l'énergie et où sont les plus grosses pertes. On l'utilise pour un objet (moteur, maison) comme pour un pays entier.

Diagramme de Sankey d'une voiture à essence (valeurs simplifiées)

La largeur de chaque flèche est proportionnelle à l'énergie transportée.

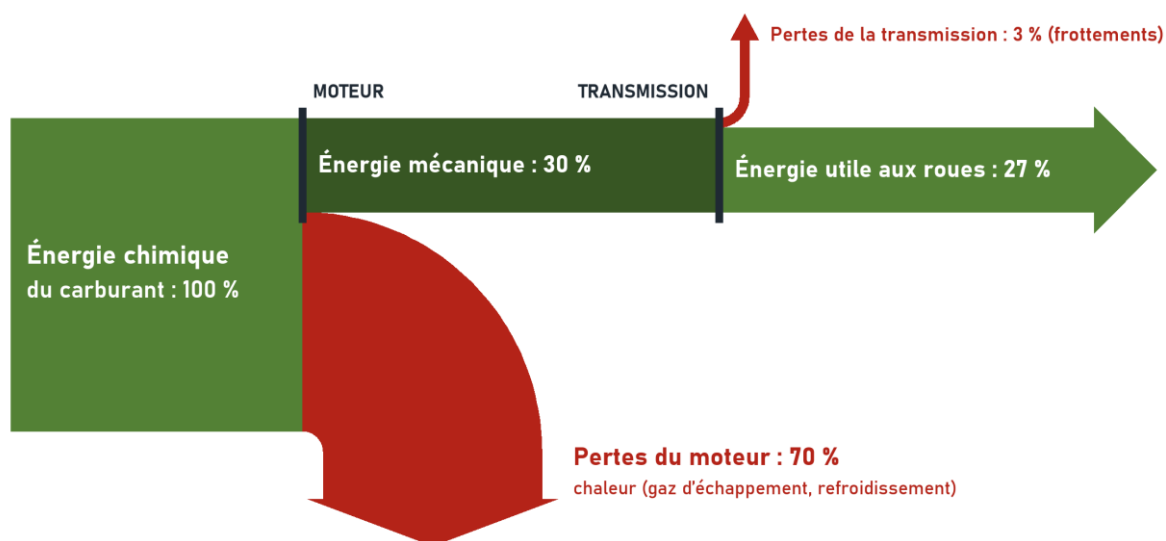


FIG. 3 Sankey d'une voiture à essence : 100 % d'énergie chimique au départ, 27 % d'énergie utile aux roues.

MÉTHODE

Lire un diagramme de Sankey

- Repérer l'**entrée** (à gauche) : c'est l'énergie absorbée (100 %).
- Suivre les flèches qui **sortent** du flux principal : ce sont les **pertes**.
- Repérer la **sortie utile** (à droite) : rendement global = sortie utile ÷ entrée.
- Vérifier la **conservation** : entrée = sortie utile + somme des pertes (ici $100 = 27 + 70 + 3$).

EXEMPLE RÉSOLU

Exploiter le Sankey de la voiture

On utilise le diagramme ci-dessus.

a) Rendement du moteur, de la transmission et rendement global

Relation littérale $\eta = \text{utile} / \text{absorbée}$

Application numérique $\eta_{\text{moteur}} = 30 / 100$; $\eta_{\text{transmission}} = 27 / 30$; $\eta_g = 27 / 100$

Résultat $\eta_{\text{moteur}} = 0,30$; $\eta_{\text{transmission}} = 0,90$; $\eta_g = 0,27$

b) Vérification

Relation littérale $\eta_g = \eta_{\text{moteur}} \times \eta_{\text{transmission}}$

Application numérique $\eta_g = 0,30 \times 0,90$

Résultat $\eta_g = 0,27 \checkmark$

Interprétation les 70 % de pertes du moteur sont la cible n° 1 : c'est là qu'il faut améliorer la voiture.

PARTIE V

Je m'entraîne

15 Le formulaire du chapitre

NOTION	FORMULE	UNITÉS
Énergie et puissance	$E = P \times t$	$J = W \times s$; $Wh = W \times h$; $kWh = kW \times h$
Joule et kilowattheure	$1 Wh = 3\,600 J$; $1 kWh = 3,6 MJ$	—
Unités des bilans	$1 tep = 11\,630 kWh$; $1 Mtep = 11,63 TWh$	$1 tep = 41,868 GJ$
Charbon, gaz, calories	$1 tec = 0,7 tep$; $1 tep \approx 39,68 MBtu$; $1 kcal = 4,18 kJ$	—
Pourcentage	$part = valeur / total \times 100$	$angle = part \times 3,6 (^\circ)$
Batterie	$E = U \times Q$	$U (V)$; $Q (Ah) \rightarrow E (Wh)$
Énergie de hauteur	$E = m \times g \times h$	$m (kg)$; $g = 9,81 N/kg$; $h (m) \rightarrow E (J)$
Rendement	$\eta = P_u / P_a = W_u / W_a$	sans unité ; $0 \leq \eta < 1$
Pertes	$Pertes = P_a - P_u$	même unité que P
Rendement global	$\eta_g = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots$	sans unité
Coût	$Coût = E (kWh) \times \text{prix du kWh}$	€

16 Quiz : vrai ou faux ?

QUIZ

Coche la bonne case, puis vérifie avec les solutions

AFFIRMATION	VRAI	FAUX
1. Le kWh est une unité de puissance.	☐	☐
2. $1 kWh = 3\,600 J$.	☐	☐
3. L'électricité est une source d'énergie primaire.	☐	☐
4. Un très bon moteur peut avoir un rendement de 1,2.	☐	☐
5. 1 tep vaut environ 11 630 kWh.	☐	☐
6. Le rendement global d'une chaîne est le produit des rendements.	☐	☐
7. 1 tec contient plus d'énergie que 1 tep.	☐	☐
8. Une batterie est un convertisseur réversible.	☐	☐

17 Exercice d'entraînement : recharger une voiture électrique au lycée

EXERCICE D'ENTRAÎNEMENT

La borne du parking

Le lycée installe une **borne de recharge de 7,4 kW** sur son parking. Une enseignante branche sa voiture, dont la **batterie de 50 kWh** est chargée à **20 %**. Elle veut la recharger jusqu'à **80 %**.

Données

- Rendement du chargeur : **0,92** ; rendement de la batterie à la charge : **0,95**.

- Consommation de la voiture : **15 kWh aux 100 km** (énergie prise dans la batterie).
- Prix de l'électricité : **0,20 €/kWh** ; voiture à essence équivalente : **6 L aux 100 km**, essence à **1,85 €/L, 32 MJ par litre**.

Questions

- Q1.** Calculer l'énergie à stocker dans la batterie.
- Q2.** Calculer le rendement de la recharge, puis l'énergie prélevée sur le réseau.
- Q3.** Calculer la durée de la recharge (en heures et minutes) et son coût.
- Q4.** Calculer l'autonomie gagnée.
- Q5.** Pour la même distance, calculer le coût de l'essence et l'énergie qu'elle contient, en kWh. Conclure.

CORRIGÉ DÉTAILLÉ

Recharger une voiture électrique

Q1. Énergie à stocker

Relation littérale $E = (0,80 - 0,20) \times E_{\text{batterie}}$

Application numérique $E = 0,60 \times 50$

Résultat **E = 30 kWh**

Q2. Rendement de la recharge et énergie prélevée

Relation littérale $\eta = \eta_{\text{chargeur}} \times \eta_{\text{batterie}} ; W_a = W_u / \eta$

Application numérique $\eta = 0,92 \times 0,95 = 0,874 ; W_a = 30 / 0,874$

Résultat **$\eta \approx 0,87 ; W_a \approx 34,3 \text{ kWh}$**

Q3. Durée et coût

Relation littérale $t = W_a / P ; \text{Coût} = W_a \times \text{prix}$

Application numérique $t = 34,3 / 7,4 \approx 4,64 \text{ h} ; 0,64 \text{ h} \times 60 \approx 38 \text{ min} ; \text{Coût} = 34,3 \times 0,20$

Résultat **$t \approx 4 \text{ h } 38 \text{ min} ; \text{Coût} \approx 6,86 \text{ €}$**

Interprétation la voiture est rechargée pendant la journée de cours.

Q4. Autonomie gagnée

Relation littérale $d = E / \text{consommation}$

Application numérique $d = 30 \text{ kWh} / (15 \text{ kWh} / 100 \text{ km}) = 30 / 15 \times 100$

Résultat **d = 200 km**

Q5. Comparaison avec l'essence

Relation littérale $V = 2 \times 6 \text{ L} ; \text{Coût} = V \times 1,85 ; E = V \times 32 \text{ MJ}$, puis $\div 3,6$ pour passer en kWh

Application numérique $V = 12 \text{ L} ; \text{Coût} = 12 \times 1,85 ; E = 12 \times 32 = 384 \text{ MJ} = 384 / 3,6$

Résultat **Coût = 22,20 € ; E $\approx$ 107 kWh**

Interprétation pour 200 km, la voiture électrique prélève 34,3 kWh au réseau contre 107 kWh d'essence, soit environ **3 fois moins d'énergie finale**, pour un coût **3 fois plus faible** (6,86 € contre 22,20 €). Il reste à regarder **comment** l'électricité est produite (rendement global, CO₂) pour conclure complètement.

18 Solutions des défis et du quiz

SYNTHÈSE

Solutions

Défi 1. $E = 1,5 \text{ kW} \times 4 \text{ h} = 6 \text{ kWh}$. En joules : $E = 1\,500 \text{ W} \times (4 \times 3\,600 \text{ s}) = 21\,600\,000 \text{ J} = 21,6 \text{ MJ}$.

Défi 2. $2,5 \text{ GWh} = 2,5 \times 1\,000 \times 1\,000 = 2\,500\,000 \text{ kWh}$ (2 marches descendues). $850\,000 \text{ Wh} = 850\,000 \div 1\,000 \div 1\,000 = 0,85 \text{ MWh}$ (2 marches montées).

Défi 3. $E = 152,3 \times 11,63 \approx 1\,771 \text{ TWh}$.

Défi 4. $\eta = 1,2 / 1,5 = 0,80 \text{ (80 \%)}$; pertes = $1,5 - 1,2 = 0,3 \text{ kW} = 300 \text{ W}$.

Défi 5. $\eta_g = 0,95 \times 0,90 \times 0,85 \approx 0,73 \text{ (73 \%)}$.

Quiz. 1. Faux (c'est une unité d'énergie). 2. Faux ($1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J}$). 3. Faux (c'est un vecteur, produit à partir d'une source). 4. Faux ($\eta < 1$ toujours). 5. Vrai. 6. Vrai. 7. Faux ($1 \text{ tec} = 0,7 \text{ tep}$). 8. Vrai (charge et décharge).

SYNTHÈSE

Les 5 réflexes du chapitre

- **Énergie ou puissance ?** Je regarde l'unité : W, kW = puissance ; J, Wh, kWh, tep = énergie.
- **Je convertis avant de calculer** : minutes en heures, mAh en Ah, % en nombre décimal.
- Je rédige en **3 étapes** : relation littérale, application numérique, résultat avec unité.
- **Je trace la chaîne** et j'écris le rendement sous chaque bloc ; le rendement global est le produit.
- **Je vérifie** : un rendement est inférieur à 1, des parts font 100 %, un résultat a un ordre de grandeur réaliste.