

Avant d'aborder le chapitre

EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

- Une **combustion** est une transformation chimique **exothermique**, dont les réactifs sont nommés « le **combustible** » (corps qui brûle) et « le **comburant** » (corps qui aide à brûler).
- Comme dans toutes les transformations chimiques, lors d'une combustion, la **masse est conservée** et les atomes redistribués dans le système chimique.

- Une **réaction exothermique** libère de l'énergie par **transfert thermique** proportionnellement à la masse de **réactif limitant**. Ce transfert thermique conduit à une élévation de température du système chimique.
- L'**énergie chimique** est l'énergie associée aux transformations chimiques. Son unité est le **joule**, de symbole **J**.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement. → Vérifiez vos réponses en flashant la page ou sur le site lycee.editions-bordas.fr

SITUATION 1

Le gaz de ville, l'éthanol, le pétrole ou encore le bois sont des combustibles.

Que faut-il pour les faire brûler ?
À quoi servent-ils ?

SITUATION 2

La combustion des carburants d'origine fossile ou d'origine agricole produit de l'eau et du dioxyde de carbone.

Obtient-on dans les deux cas des équations de combustion semblables ? Justifier.



SITUATION 3

En se consumant, le bois produit de la chaleur dans le foyer d'une cheminée.



À quoi est liée la chaleur libérée dans la pièce ?
L'énergie produite est-elle plus grande lorsque plusieurs bûches ont brûlé ? Justifier.



Les combustions



Comment expliquer la formation d'une flamme en sortie de tuyère (conduit arrière) de cet avion ?

EXERCICE 44

NOTIONS ET CONTENUS

- ▶ Combustibles organiques usuels.
- ▶ Modélisation d'une combustion par une réaction d'oxydoréduction.
- ▶ Énergie libérée lors d'une combustion et pouvoir calorifique massique.
- ▶ Énergie molaire de réaction, modification des structures moléculaires et énergie de liaison.
- ▶ Combustions et enjeux de société.

CAPACITÉS EXPÉIMENTALES

- ▶ Mettre en œuvre une expérience pour estimer le pouvoir calorifique massique d'un combustible

→ ACTIVITÉ 2

1. ACTIVITÉ DE DÉCOUVERTE

COMPÉTENCE :

(APP) Rechercher et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée

Combustion

Qu'est-ce qu'une combustion ? À quoi sert-elle ?

DOC 1 Combustion

Les combustions sont des réactions chimiques entre un **combustible** et un **comburant**.

Les **combustibles organiques** sont formés de molécules qui possèdent au moins un atome de carbone, et des atomes d'hydrogène.

La plupart du temps, le comburant est le dioxygène de l'air, de formule O₂, qui représente 20 % en volume de l'air.

Les réactions de combustion sont amorcées grâce à une **source d'énergie**, comme une flamme, une étincelle ou de la chaleur.

DOC 3 Alcanes et alcools

Les **alcanes** et les **alcools** sont les combustibles les plus couramment utilisés. Leur combustion complète donne comme seuls produits de l'eau et du dioxyde de carbone.

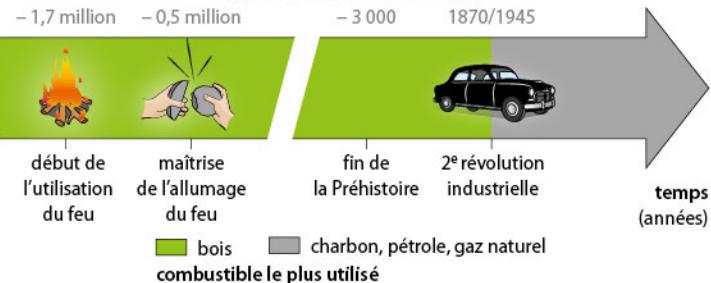
Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) contient du **propane** (de formule brute C₃H₈). Il fait fonctionner certains moteurs.

L'essence contient des alcanes dont la chaîne carbonée est plus longue que celle du propane, tels que l'**octane** (de formule brute C₈H₁₈).

L'**éthanol** (de formule brute C₂H₆O) contenu dans une lampe à alcool chauffe un plat ou donne de la lumière.

DOC 2 Apport des combustions pour l'Homme

I'Homme et les combustibles



À la Préhistoire, grâce au feu, l'Homme a pu se protéger des prédateurs, cuire ses aliments, améliorer ses outils et ses armes, ou encore se chauffer.

Certains aliments une fois cuits étant plus digestes ont été mieux assimilés par l'organisme. L'énergie gagnée a permis au cerveau de se développer et à l'intelligence de croître. De plus, le feu a assuré une cohésion du groupe, due à la nécessité de son entretien.

La découverte de nouvelles sources d'énergie abondantes, telles que le pétrole ou le charbon, a permis la deuxième révolution industrielle au XX^e siècle et l'amélioration des conditions de vie.

DOC 4 Classement des combustibles organiques

	biomasse	combustibles fossiles
Définition	matière organique des êtres vivants (végétaux, animaux, champignons, bactéries)	matière organique décomposée et transformée
Exemples	bois, huiles végétales (carburants agro-sourcés), alcool, graisses animales	hydrocarbures (pétrole, essence, gaz)

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Qu'a apporté la maîtrise du feu dans l'histoire de l'Homme ? Donner deux ou trois exemples.

2 a. Que faut-il pour qu'une combustion puisse s'établir ?
b. Donner des exemples de sources d'énergie pouvant servir à l'amorçage de la combustion dans un moteur à essence et une lampe à huile.

3 Écrire les équations de combustion complète :
a. du propane.
b. de l'éthanol.
c. de l'octane.

4 De nos jours, quels sont les combustibles les plus utilisés ?

SYNTHÈSE

5 a. Que nécessite une combustion ?
b. Comment ajuster l'équation de combustion d'un alcane ou d'un alcool ?

Je réussis si...

- Je connais des combustibles usuels.
- Je sais que la combustion complète d'un alcane ou d'un alcool produit de l'eau et du dioxyde de carbone.
- Je sais ajuster une équation de combustion complète.

2. DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCE :

(RÉA) Mettre en œuvre un protocole expérimental en respectant les règles de sécurité

Pouvoir calorifique massique

Le pouvoir calorifique massique est une grandeur caractéristique d'un combustible.
Comment le calculer ?

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- Peser la masse m_0 d'un brûleur à alcool rempli d'éthanol.
- Prendre un bêcher contenant environ 300 g d'eau.
- Mesurer précisément cette masse m_{eau} d'eau.
- Relever aussi la température de l'eau T_i .
- Utiliser le brûleur pour chauffer l'eau jusqu'à obtenir une augmentation de température de 30 °C.
- Noter la valeur finale T_f .
- Arrêter le chauffage et mesurer à nouveau la masse du brûleur.
- Noter cette masse m_1 .

EXPÉRIENCE ET ANALYSE

- 1 Mettre en œuvre le protocole.
- 2 Calculer la masse m_{alcool} d'alcool ayant disparu.
- 3 a. Écrire l'équation de la réaction de combustion complète de l'éthanol.
b. La réaction est-elle exothermique ou endothermique ? Justifier.
- 4 Déterminer la valeur de l'énergie Q_{eau} reçue par l'eau.
- 5 Quelle est la relation entre Q_{eau} et Q , énergie libérée par la combustion ? En déduire Q .
- 6 Déterminer la valeur de l'énergie libérée par un kilogramme d'éthanol lors de sa combustion. Il s'agit du pouvoir calorifique massique PC de l'éthanol.

CONCLUSION

- 7 Comparer ce résultat expérimental à la valeur de référence de l'éthanol et conclure.

DOC 1 Principe de l'expérience

Une lampe à alcool, ou brûleur à alcool, permet d'assurer la combustion lente d'un alcool, ici l'éthanol, et de produire de la lumière. Elle est utilisée ici afin de chauffer une masse d'eau connue.



DOC 2 Données sur l'éthanol

Pouvoir calorifique massique (en MJ · kg ⁻¹)	Pictogrammes de sécurité
29	

L'éthanol est incorporé dans l'essence. La valeur de son pouvoir calorifique massique est inférieure à celle de l'essence, qui vaut 44 MJ · kg⁻¹. Ainsi, le supercarburant E10, qui est un supercarburant sans plomb contenant 10 % d'éthanol en volume, ne libère pas autant d'énergie qu'un supercarburant ne contenant que de l'essence.

DOC 3 Énergie par transfert thermique

La température d'un corps s'élève proportionnellement à l'énergie par transfert thermique Q qu'il reçoit. Ainsi, pour augmenter la température d'un kilogramme d'eau de 1,0 °C, il faut lui apporter $Q_{\text{eau}} = 4,2 \text{ kJ}$.

Je réussis si...

- Je sais mesurer une élévation de température.
- Je sais déterminer une variation de masse.
- Je sais calculer l'énergie reçue par l'eau lors du chauffage.
- Je sais relier l'énergie reçue par l'eau au pouvoir calorifique massique d'un combustible pour le calculer.

3. DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

COMPÉTENCES :

(APP) Rechercher et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée

(AN/RA) Proposer une stratégie de résolution

Énergie issue d'une combustion

Comment déterminer l'énergie libérée par la combustion d'une mole de combustible sans rien faire brûler ?

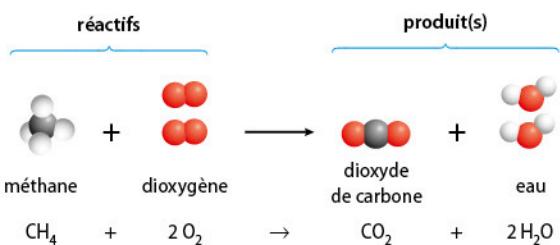
DOC 1 Combustion complète du propane



Le propane est un alcane de formule brute C_3H_8 . Il subit une combustion complète dans un réchaud à gaz lorsque le dioxygène disponible est présent en quantité suffisante. Dans ce cas, les seuls produits formés sont de l'eau et du **dioxyde de carbone**, la réaction est **exothermique**, et la flamme bleue permet de chauffer un récipient.

DOC 3 Énergie molaire de réaction

Les électrons assurent les liaisons entre les atomes au sein des molécules. Lors d'une réaction chimique, les atomes se réorganisent. Certaines liaisons, ou toutes, sont rompues, et de nouvelles se forment, comme lors de la combustion complète du méthane :



Pour la réaction d'une mole de combustible, l'énergie molaire de réaction ΔE est la somme des énergies des liaisons rompues, moins la somme des énergies des liaisons formées :

$$\Delta E = \sum E_{\text{liaisons rompues}} - \sum E_{\text{liaisons formées}}$$

DÉMARCHE EXPERTE

Déterminer l'énergie molaire de combustion du propane, et justifier son signe.

DÉMARCHE AVANCÉE

- Écrire l'équation de la combustion complète du propane.
- Indiquer le nombre et la nature des liaisons rompues et formées.
- En déduire l'énergie molaire de la réaction.

DOC 2 Énergie de liaison

En phase gazeuse, la dissociation d'une liaison chimique A—B conduit aux atomes A et B isolés :



Cette dissociation nécessite de l'énergie, appelée « **énergie de liaison** ». Elle est notée E_{A-B} . Son unité est le joule par mol ($J \cdot mol^{-1}$).

Le tableau ci-dessous donne les énergies des liaisons pouvant intervenir lors de la combustion d'un alcane :

Liaison	Énergie (en $kJ \cdot mol^{-1}$)
C—C	345
H—C	415
H—H	436
H—O	463
O=O	498
C=O	804

DOC 4 Signe de l'énergie de réaction

Au cours d'une transformation chimique, le système chimique :

- peut libérer de l'énergie par transfert thermique Q. La réaction est **exothermique** et Q est négatif ;
- peut recevoir de l'énergie par transfert thermique Q. La réaction est **endothermique** et Q est positif.

DÉMARCHE ÉLÉMENTAIRE

- Écrire l'équation de la combustion complète du propane C_3H_8 dans le dioxygène produisant de l'eau et du dioxyde de carbone.
- a. Déterminer le nombre et la nature des liaisons constituant les réactifs et les produits.
b. À partir des liaisons rompues, calculer l'énergie permettant de transformer les réactifs en atomes isolés.
c. Déterminer l'énergie libérée par la formation des produits à partir des atomes isolés.
3. En déduire l'énergie molaire de la réaction.

Je réussis si...

Je sais déterminer une énergie molaire de combustion à partir des énergies de liaison.

4. DÉMARCHE D'INVESTIGATION

COMPÉTENCE :

(COM) Utiliser un vocabulaire adapté

Les agrocarburants

SITUATION-PROBLÈME

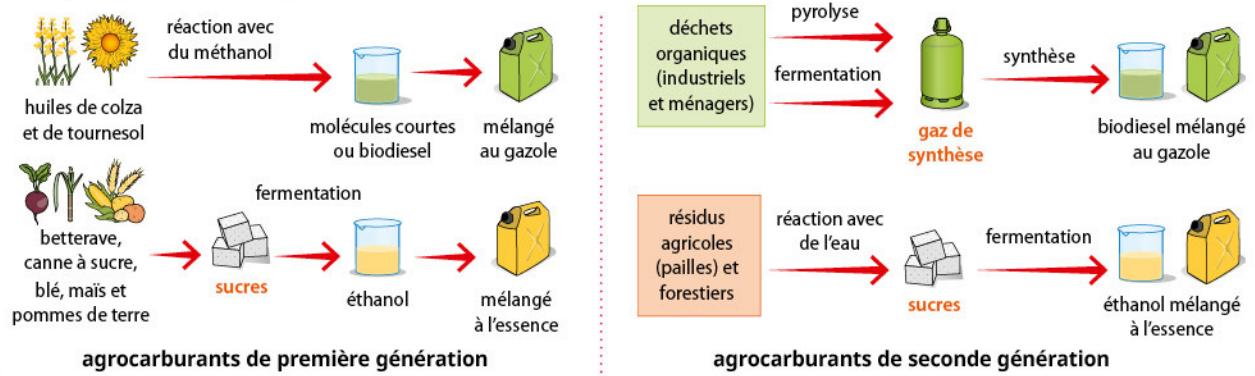
Dans plusieurs pays du monde, des surfaces agricoles sont cultivées afin de produire des agrocarburants destinés au commerce mondial, à la place de récoltes pour les populations locales.

Comment expliquer le débat relatif à ce phénomène ?



HYPOTHÈSE Proposer une hypothèse en la justifiant.

DOC 1 Fabrication des agrocarburants



DOC 2 Agrocarburants et surfaces cultivées en France

Annuellement, la France consomme environ 100 millions de tonnes de pétrole, dont la moitié pour les transports. Si on souhaite remplacer cette quantité de pétrole, voici les valeurs correspondantes en surfaces cultivées :

Filière	Culture initiale	Énergie brute produite par hectare (en tep)	Énergie nécessaire pour les engrains, la culture et la distillation (en tep)	Énergie nette produite par hectare (en tep)	Nombre minimum de kilomètres carrés mobilisés pour produire 100 Mtep	En % du territoire français	En % des superficies cultivées	Soit la surface cultivable de ... fois celle de la France
huile	colza	1,37	0,5	0,87	1 200 000	210	400	4
éthanol	betterave	3,98	3,22	0,76	1 300 000	240	450	4,5

PISTES DE RÉSOLUTION

- Pourquoi est-il plus juste d'utiliser le terme « agrocarburant » plutôt que « biocarburant » ?
- a. Quelle partie de la plante est utilisée pour les agrocarburants de première génération ?
b. Quel problème sociétal leur utilisation pose-t-elle ?
- Peut-on remplacer totalement le pétrole importé en France par des agrocarburants produits sur le territoire ? Justifier.
- Quels avantages apportent les agrocarburants de deuxième génération ?

CONCLUSION

- Dans quelle mesure les agrocarburants constituent-ils une solution encourageant le développement des recherches ?

VOCABULAIRE

► Tonne équivalent pétrole (tep) : énergie moyenne libérée par la combustion d'une tonne de pétrole.

Je réussis si...

- Je sais qu'il existe des filières d'agrocarburants.
► Je sais comparer les caractéristiques d'un carburant d'origine fossile à celles d'un agrocarburant.



1 Réactions de combustion

▶ Combustibles organiques

Un **combustible** est une espèce chimique ou un mélange capable de brûler en présence d'un autre réactif, le **comburant**, pour fournir de l'énergie par transfert thermique. Un troisième élément est indispensable : l'**énergie d'activation** (FIG. 1).

Les **combustibles organiques** les plus courants sont les alcanes et les alcools. Ils sont surtout d'origine fossile, comme le gaz naturel, le pétrole et le charbon. Un **carburant** est un combustible qui alimente un moteur thermique.

EXEMPLE

Le combustible peut être :

- un liquide ou un solide liquéfiable (alcool, kérozène, fiouls légers ou lourds, essence, huile... qui sont issus du pétrole, etc.) ;
- un solide (biomasse, charbon, papier, carton, matières plastiques, etc.) ;
- un gaz (méthane, propane, butane, etc.).

Quel que soit l'état du combustible (liquide, gazeux ou solide), ce sont des **vapeurs qui brûlent**.

Ces vapeurs combustibles proviennent de la **vaporisation** d'un combustible liquide (FIG. 2) ou de la **pyrolyse** (c'est-à-dire la décomposition) d'un combustible solide (FIG. 3) sous l'effet de la chaleur.

▶ Combustions

Une combustion est une **réaction d'oxydoréduction**.

Elle correspond à l'oxydation d'un combustible par un comburant (en général le dioxygène de l'air).

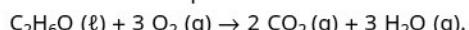
Une combustion s'accompagne de production de chaleur, de rayonnement et de la formation de produits de combustion.

Lors de la **combustion complète** d'un alcane ou d'un alcool, le composé organique réagit avec du dioxygène pour former, comme seuls produits, du dioxyde de carbone et de l'eau. Dans ce cas, la flamme est en partie bleue et peu éclairante. Cette réaction est exothermique (FIG. 2).

Lors de l'écriture d'une combustion complète, on utilise la conservation des éléments **carbone** et **hydrogène** pour ajuster les nombres stœchiométriques devant les réactifs et les produits. Puis on vérifie la conservation de l'élément **oxygène** en ajustant le nombre stœchiométrique devant le dioxygène O₂.

EXEMPLE

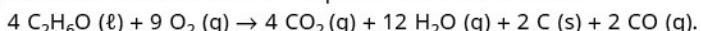
L'équation de la combustion complète de l'éthanol s'écrit :



Si la quantité d'oxygène est insuffisante, la combustion est **incomplète** : il peut se former aussi du monoxyde de carbone CO et du carbone C. Dans ce cas, la flamme est jaune, lumineuse, et peut produire de la fumée noire (FIG. 3).

EXEMPLE

L'équation de la combustion incomplète de l'éthanol s'écrit :



Le monoxyde de carbone est un gaz incolore, inodore et non irritant : il n'est donc pas détectable. Pourtant, si on le respire, il peut entraîner la mort en moins d'une heure. Les symptômes sont des maux de têtes, des nausées et des vomissements.



FIG. 1 Le « triangle du feu ».

VOCABULAIRE

► **Biomasse** : matière organique d'origine végétale cultivée ou non, animale ou bactérienne.



FIG. 2 Combustion complète dans une lampe à alcool.



FIG. 3 Un feu dans un insert met en jeu un combustible.



2 Aspect énergétique des combustions

Les transformations chimiques peuvent libérer de l'énergie et elles sont exothermiques, en prendre au milieu extérieur et elles sont endothermiques, ne pas avoir d'impact énergétique et elles sont athermiques.

La **combustion** provoque un dégagement de chaleur accompagné d'une émission de flammes et/ou de fumées. C'est une **réaction exothermique**, au cours de laquelle la structure moléculaire des réactifs se modifie, avec des liaisons qui se dissocient et d'autres qui se forment.

► Pouvoir calorifique massique d'un combustible

Le **pouvoir calorifique massique d'un combustible PC** est l'énergie dégagée par la combustion complète d'un kilogramme de combustible. Il s'exprime en joule par kilogramme ($J \cdot kg^{-1}$). Par convention, PC est positif.

On parle de pouvoir calorifique massique supérieur PCS si l'eau produite par la combustion est à l'état liquide. Dans le cas où l'eau formée est à l'état de vapeur, on parle de pouvoir calorifique massique inférieur PCI (FIG. 4).

► Énergie libérée par une combustion

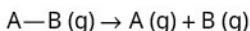
L'**énergie libérée** par une masse m de combustible est calculée à partir du pouvoir calorifique massique du combustible mis en jeu :

$$\text{énergie libérée par la combustion (en J)} \longrightarrow Q = m \cdot PC \longleftarrow \begin{matrix} \text{pouvoir calorifique massique (en } J \cdot kg^{-1}) \\ \uparrow \\ \text{masse de combustible (en kg)} \end{matrix}$$

La valeur de Q est positive ici, car PC est toujours positif par convention.

► Énergie de liaison

En phase gazeuse, la dissociation d'une liaison chimique A—B conduit aux atomes A et B isolés :



La dissociation d'une liaison chimique nécessite de l'énergie, nommée « **énergie de liaison** », notée E_{A-B} . Elle s'exprime en joule par mol ($J \cdot mol^{-1}$).

Les valeurs des énergies de liaison que l'on trouve dans les tables sont des moyennes, car la force d'une liaison dépend aussi des autres liaisons établies par les atomes liés (FIG. 5).

► Énergie molaire de réaction

L'**énergie molaire de réaction ΔE** est l'énergie libérée lors de la combustion d'une mole de combustible. Elle est négative puisque les combustions sont exothermiques. Elle peut être calculée de manière assez précise à partir des liaisons rompues et formées au cours de la combustion complète :

$$\text{énergie molaire de réaction (en } J \cdot mol^{-1}) \longrightarrow \Delta E = \Sigma E_{\text{liaisons rompues}} - \Sigma E_{\text{liaisons formées}}$$

↑ somme des énergies des liaisons rompues (en $J \cdot mol^{-1}$) ↑ somme des énergies des liaisons formées (en $J \cdot mol^{-1}$)

Combustible	Pouvoir calorifique massique inférieur (en $MJ \cdot kg^{-1}$)
bois	15
charbon	15 à 27
éthanol	29
gazole	45
octane	45
heptane	45
méthane	50

FIG. 4 Valeurs de quelques pouvoirs calorifiques massiques inférieurs de combustibles.

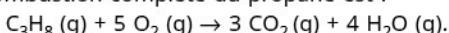
Liaison	Énergie de liaison (en $kJ \cdot mol^{-1}$)
C—C	345
C—O	358
C—H	415
H—H	436
O—H	463
O=O	498
C=C	615
C=O	804

FIG. 5 Valeurs de quelques énergies de liaison.



EXEMPLE

L'équation de combustion complète du propane est :



Au cours de cette combustion :

- **2** liaisons C—C, **8** liaisons C—H et **5** liaisons O=O sont rompues ;
- **6** liaisons C=O et **8** liaisons O—H sont formées (FIG. 6).

L'énergie molaire de réaction est :

$$\Delta E = (2 E_{\text{C}-\text{C}} + 8 E_{\text{C}-\text{H}} + 5 E_{\text{O}= \text{O}}) - (6 E_{\text{C}=\text{O}} + 8 E_{\text{O}-\text{H}})$$

$$\Delta E = (2 \times 345 + 8 \times 415 + 5 \times 498) - (6 \times 804 + 8 \times 463)$$

$$\Delta E = -2,0 \times 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

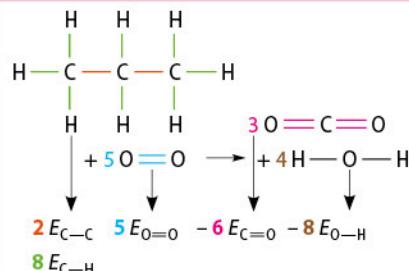


FIG. 6 Rupture et formation des liaisons chimiques lors de la combustion du propane.

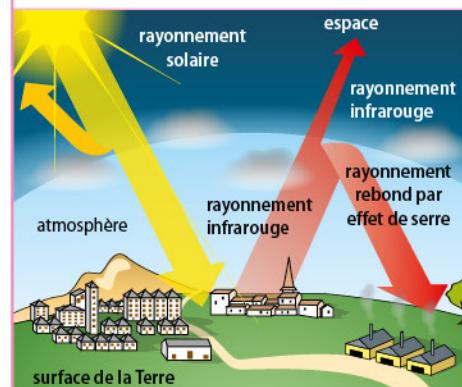


FIG. 7 Le mécanisme de l'effet de serre.

VOCABULAIRE

► **Agrocarburant** : carburant obtenu à partir de la transformation de végétaux (oléagineux, céréales, canne à sucre, algues, etc.).

► **Rendement** : quotient de l'énergie utile sur l'énergie produite.

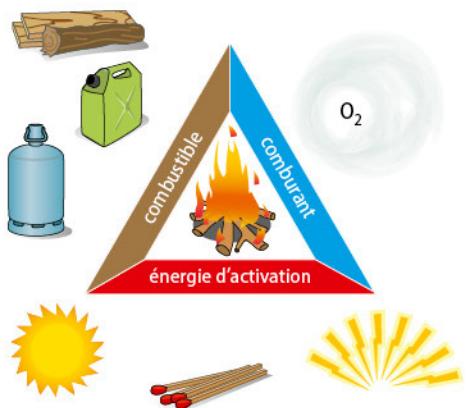
► **Renouvelable** : se dit d'une source d'énergie, comme le vent, le soleil ou la biomasse, dont le renouvellement est « rapide » à l'échelle humaine.



FIG. 8 Algues produisant des lipides pour les agrocarburants de troisième génération.

1 Réactions de combustion

► Une combustion nécessite la présence de trois éléments représentés dans le « triangle du feu » : le **combustible**, le **comburant** et l'**énergie d'activation** : si l'un d'entre eux vient à manquer, alors la combustion s'arrête.



► Un **combustible organique** comporte les éléments carbone et hydrogène. Il est issu des gisements de pétrole ou de gaz, des mines de charbon (photo) ou de la **biomasse**.



► Lors de la **combustion complète** d'un alcane ou d'un alcool, il y formation d'eau et de dioxyde de carbone.

3 Combustion et enjeux sociaux

► Les combustibles organiques permettent à l'humanité de se chauffer, de cuisiner, de se déplacer, de produire des biens. Ces points constituent le versant positif de leur utilisation.

Un des versants négatifs réside dans la production d'espèces polluantes, dont le CO₂, **gaz à effet de serre** nocif pour l'environnement et la santé.

2 Aspect énergétique des combustions

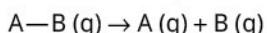
► Le **pouvoir calorifique massique PC** est l'énergie libérée par la combustion complète d'un kilogramme de combustible (en J · kg⁻¹).

► L'**énergie Q** libérée par une masse m de combustible est calculée à partir du pouvoir calorifique massique du combustible mis en jeu :

$$énergie libérée par la combustion (en J) \rightarrow Q = m \cdot PC \leftarrow \begin{matrix} \text{pouvoir calorifique massique} \\ (\text{en J} \cdot \text{kg}^{-1}) \end{matrix}$$

masse de combustible (en kg)

► En phase gazeuse, la dissociation d'une liaison chimique A—B nécessite une **énergie de liaison E_{A—B}** (en J · mol⁻¹) positive pour obtenir les deux atomes A et B isolés selon l'équation de réaction :



► L'**énergie molaire de réaction ΔE** (en J · mol⁻¹) est l'énergie libérée par la combustion d'une mole de combustible.

L'énergie molaire de réaction peut être déterminée à partir des énergies de liaison :

$$\Delta E = \sum E_{\text{liaisons rompues}} - \sum E_{\text{liaisons formées}}$$

énergie molaire de réaction (en J · mol⁻¹)

somme des énergies des liaisons rompues (en J · mol⁻¹) somme des énergies des liaisons formées (en J · mol⁻¹)

Elle est négative puisque les combustions sont exothermiques.

Par ailleurs, l'extraction et le transport des combustibles organiques constituent des sources de risques. Enfin, la majorité des combustibles sont d'origine fossile, et donc **non renouvelables**.

► Des alternatives aux combustibles fossiles sont développées : **agrocarburants, biogaz**, etc.

Vérifier l'essentiel EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➔ SOLUTIONS EN PAGE 423



1 Réactions de combustion

	A	B	C
1 Un combustible organique :	brûle avec le dioxygène.	contient l'élément oxygène.	nécessite un comburant pour brûler.
2 Une combustion complète :	ne contribue pas à l'effet de serre.	produit de l'eau et une petite molécule.	ne laisse pas de résidus solides.
3 L'équation de combustion complète du butane s'écrit :	$2 \text{C}_4\text{H}_{10} + \text{O}_2 \rightarrow 8 \text{CO}_2 + 10 \text{H}_2\text{O}$	$2 \text{C}_4\text{H}_{10} + 13 \text{O}_2 \rightarrow 8 \text{CO}_2 + 10 \text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_4\text{H}_{10} + \frac{13}{2} \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$
4 Lorsqu'un combustible liquide brûle dans l'air :	le combustible est le réactif limitant.	ce sont les vapeurs de combustibles qui brûlent.	la chaleur permet la vaporisation du combustible.

2 Aspect énergétique des combustions

	A	B	C
5 Le pouvoir calorifique massique PC du méthanol vaut $20,0 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.	Pour une masse m de méthanol, l'énergie Q libérée vaut $m \cdot PC$.	Pour une masse m de méthanol, l'énergie Q libérée vaut $\frac{PC}{m}$.	Pour $m = 20 \text{ g}$ de méthanol, l'énergie Q libérée vaut 400 kJ .
6 L'énergie de la liaison A—B :	se note E_{A-B} et s'exprime en $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.	se note Δ_{A-B} et s'exprime en $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.	se note E_{A-B} et s'exprime en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$.
7 L'énergie molaire de réaction peut être déterminée par :	la somme des énergies des liaisons rompues et des liaisons formées.	la somme des énergies des liaisons rompues moins celle des liaisons formées.	la somme des énergies des liaisons formées moins celle des liaisons rompues.

3 Combustion et enjeux sociétaux

	A	B	C
8 Les combustibles d'origine fossile :	ont permis le développement des sociétés occidentales.	sont en général dangereux pour l'environnement.	sont produits à partir de la biomasse.
9 Il est possible :	de remplacer immédiatement les combustibles issus du pétrole.	de se passer des combustions dans notre société.	de réduire la part des énergies d'origine fossile.
10 Les gaz à effet de serre :	sont surtout produits par les combustions.	ont une teneur nettement plus marquée dans l'atmosphère depuis la première révolution industrielle.	ont un impact sur le réchauffement climatique.
11 Les agrocarburants :	sont issus de l'agriculture biologique et sont sans danger.	sont produits à partir de la biomasse.	posent des problèmes pour l'environnement et la nutrition des populations.

Acquérir les notions

1 Réactions de combustion

Notions du programme

Combustibles organiques usuels

→ EXERCICE 12

Ce qu'on attend de moi

Citer des combustibles usuels.

Modélisation d'une combustion par une réaction d'oxydoréduction

→ EXERCICES 13 à 19

Écrire l'équation de combustion complète d'un alcane et d'un alcool.

DONNÉES

$$M_H = 1,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}, M_c = 12,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}, M_O = 16,0 \cdot \text{mol}^{-1}$$

12 Combustible organique ?

- Indiquer les combustibles organiques parmi les substances suivantes : papier, kérosome, mazout, aluminium, houille, uranium, hydrogène, méthanol, eau.
- Le GPL, ou gaz de pétrole liquéfié, comporte entre autres un alcane, dont la formule générale est C_nH_{2n+2} . Pourquoi est-ce un combustible organique ?

13 Combustion « salissante »

Lors de la combustion d'un alcane, on place une soucoupe au-dessus de la flamme. On observe la formation d'un dépôt noir.

- À votre avis, de quoi est constitué ce dépôt noir ?
- Que pensez-vous de la combustion de cet alcane dans ces conditions ?



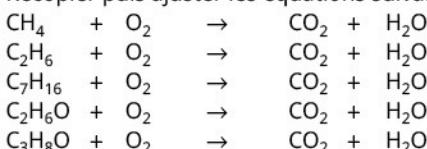
14 Vrai ou faux ?

Corriger, si nécessaire, les affirmations suivantes :

- La combustion d'un alcane produit toujours uniquement du dioxyde de carbone et de l'eau.
- La combustion complète d'une mole d'éthane C_2H_6 consomme la même quantité de matière de dioxygène que celle d'une mole d'éthanol C_2H_6O .
- L'équation de la combustion complète du butanol est : $C_4H_{10}O(\ell) + 6 O_2(g) \rightarrow 4 CO_2(g) + 5 H_2O(g)$.
- L'équation de la combustion complète du méthanol est : $CH_4O(\ell) + 2 O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2 H_2O(g)$.
- Le dihydrogène brûle très facilement avec le dioxygène de l'air, c'est donc un combustible organique.

15 Équations de combustion

Recopier puis ajuster les équations suivantes :



16 Équations de combustion complète

Écrire les équations ajustées correspondant à la combustion complète de l'hexane $C_6H_{14}(\ell)$, de l'hexan-1-ol $C_6H_{14}O(\ell)$ et du propan-1-ol $C_3H_8O(\ell)$.

17 Complete combustion of ethanol



Ethanol is a volatile, colorless liquid also called "grain alcohol", since it is produced by fermentation of numerous fruits (grape, apples, etc). Its molecular formula is $C_2H_6O(\ell)$.

- Write the equation of complete combustion of ethanol.
- Calculate the mass of water produced by the complete combustion of 50 g of ethanol.

18 Combustion du butane

Le gaz contenu dans la plupart des briquets est du butane, qui est maintenu sous pression afin de demeurer à l'état liquide. Il est détendu et brûle à l'état gazeux lorsqu'on actionne le briquet.

Donnée : masse volumique du butane liquide : $580 \text{ g} \cdot L^{-1}$.

- Écrire l'équation de la combustion complète du gaz butane $C_4H_{10}(g)$.
- Quelle masse d'eau est formée par la combustion complète des 10 mL de butane contenu dans un briquet ?

19 Combustion (in)complète

Pour assurer le confort des consommateurs, des chauffages au butane sont installés en terrasse. Les flammes produites permettent d'augmenter de quelques degrés la température extérieure.



- La combustion du butane est-elle dans ce cas une combustion complète ou incomplète ?
- Quels sont les réactifs consommés lors cette combustion ?
- Quels sont les produits formés dans le cas d'une combustion complète ? En déduire l'équation de la réaction.
- Si la combustion est incomplète, quels produits peuvent alors se former en plus ? Pourquoi est-il déconseillé voire dangereux d'utiliser ces chauffages à l'intérieur d'un bâtiment ?

2 Aspect énergétique des combustions

Notions du programme

Énergie libérée lors d'une combustion et pouvoir calorifique massique
Énergie molaire de réaction, modification des structures moléculaires et énergie de liaison

► EXERCICES 20 à 26

Ce qu'on attend de moi

- Calculer un pouvoir calorifique massique ou l'énergie libérée par une combustion.
- Calculer une énergie molaire de réaction à partir des énergies des liaisons.

DONNÉES

- $M_H = 1,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M_C = 12,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M_O = 16,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Énergies de liaison p. 157.

20 Vrai ou faux ?

Corriger les propositions suivantes si nécessaire.

- Il faut seulement faire le bilan des liaisons rompues afin de déterminer l'énergie molaire d'une réaction.
- Le pouvoir calorifique massique d'un combustible est égal à l'énergie molaire de combustion.
- L'énergie molaire de combustion est toujours négative dans le cas des alcanes et des alcools.
- Une énergie de liaison correspond à l'énergie à fournir à l'état gazeux pour former la liaison à partir des atomes pris isolément.
- Plus il y a de liaisons rompues dans un combustible et plus le pouvoir calorifique de ce combustible est élevé.

21 Conversions

Recopier le tableau ci-dessous et compléter les données manquantes :

Espèce chimique	Énergie de combustion ($\text{MJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	Pouvoir calorifique massique ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CH_4		50
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	1,3	
C_8H_{18}	5,1	

22 Liaisons et énergie molaire de combustion

- Indiquer pour chacune des molécules des trois équations suivantes le nombre et la nature des liaisons les composant :
 - $\text{CH}_4(\text{g}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$
 - $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}(\text{g}) + 6 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 4 \text{CO}_2(\text{g}) + 5 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$
 - $\text{C}_3\text{H}_8(\text{g}) + 5 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 3 \text{CO}_2(\text{g}) + 4 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$
- En déduire l'énergie molaire de chaque combustion.

23 Décomposition de gaz

- Calculer l'énergie nécessaire pour décomposer le méthanol gazeux de formule $\text{H}_3\text{C}-\text{OH}$ en ses atomes à l'état gazeux.
- Les nitriles comportent des liaisons triples entre un atome de carbone C et un atome d'azote N. Pour décomposer l'éthane nitrile gazeux $\text{H}_3\text{C}-\text{C}\equiv\text{N}(\text{g})$ en ses atomes à l'état gazeux, il faut fournir une énergie de $2\,480 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Que vaut l'énergie de la liaison triple $E_{\text{C}\equiv\text{N}}$?

24 Consommation d'un moteur

Un moteur à essence utilise un carburant composé d'octane liquide C_8H_{18} . L'octane liquide est vaporisé et mélangé à l'air avant d'être introduit dans les cylindres. La puissance mécanique utile du moteur vaut $P = 20 \text{ kW}$ avec un rendement de 25 %.

Donnée : $\Delta E(J) = P(W) \cdot \Delta t(s)$.

- Calculer la puissance P_{ch} fournie par le moteur.
- Calculer l'énergie produite par la combustion en 10 minutes.
- Sachant que le pouvoir calorifique massique de l'octane vaut $PC = 45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, déterminer la masse d'octane consommée en 10 minutes.
- La masse volumique de l'octane vaut $0,70 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$. Le réservoir d'une voiture comporte un volume $V = 70 \text{ L}$. Combien de temps le moteur précédent pourra-t-il fonctionner dans les conditions précédentes à partir d'un réservoir plein ?

25 Pouvoir calorifique volumique inférieur

Le pouvoir calorifique volumique inférieur du propane, de formule C_3H_8 , vaut $PCI = 84 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$.

- Qu'est-ce que le pouvoir calorifique volumique inférieur ?
- Déterminer la quantité de matière de propane contenue dans un mètre cube de propane sachant que le volume molaire vaut $V_m = 24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ dans ces conditions.
- En déduire le pouvoir calorifique massique inférieur du propane en $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.



26 Pouvoir calorifique massique des alcanes

Voici les pouvoirs calorifiques massiques de quelques alcanes :

Alcane	Masse molaire ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	Pouvoir calorifique massique ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
méthane	16	50
propane	44	46
pentane	72	45

Expliquer l'évolution du pouvoir calorifique massique des alcanes en fonction de celle de leur masse molaire.

3 Combustions et enjeux sociétaux

Notions du programme

Combustions et enjeux de société

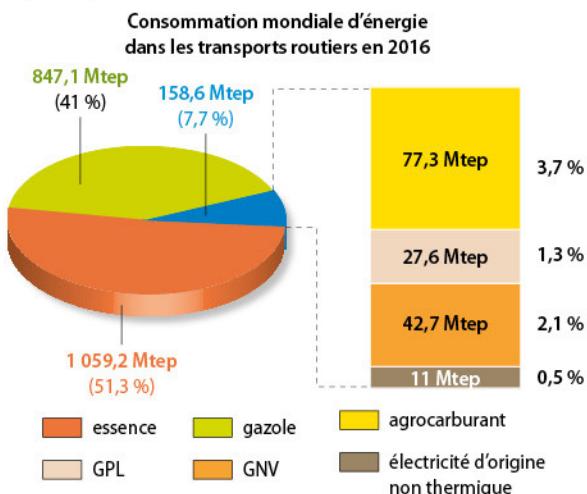
► EXERCICES 27 à 30

Ce qu'on attend de moi

- Connaître des applications usuelles qui mettent en œuvre des combustions et les risques associés.
- Citer des axes d'étude actuels d'applications s'inscrivant dans une perspective de développement durable.

27 Carburants d'origine fossile

1. Que représente le schéma ci-dessous ?

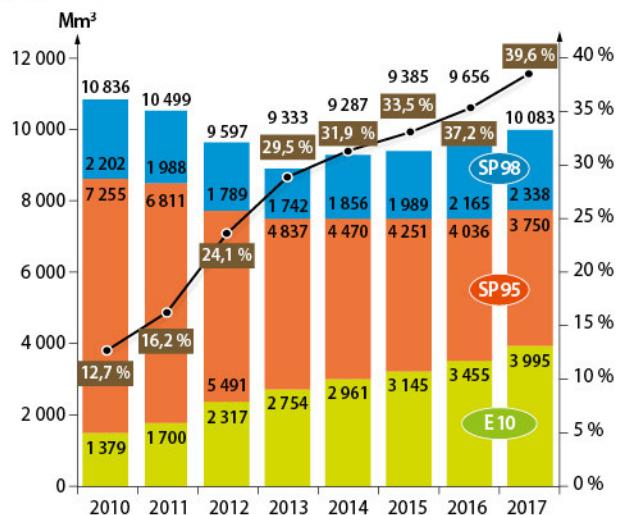


Le GPL est le gaz de pétrole liquéfié. Le GNV est le gaz naturel pour véhicules. L'électricité d'origine non thermique est l'hydroélectricité par exemple.

2. a. Quelle est la part des carburants d'origine fossile dans la consommation totale ?

b. Est-il possible de remplacer rapidement ceux-ci par des agrocarburants ? Justifier.

28 E10



Les graphes à la colonne précédente représentent l'évolution de la part des volumes de carburants « sans plomb » (SP) utilisés pour les moteurs à essence depuis 2010 en France.

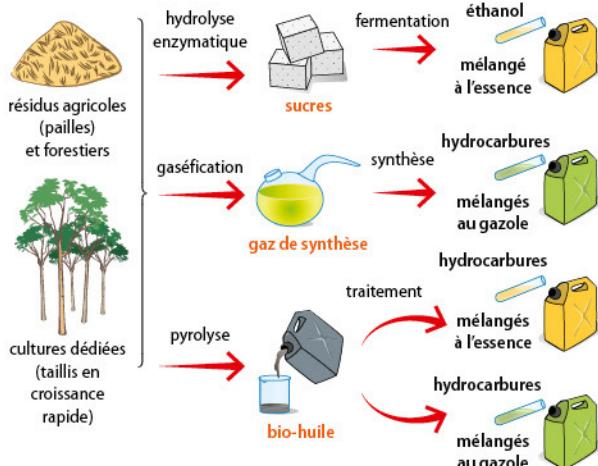
Les carburants pris en considération sont le SP 98, le SP 95 et le carburant contenant de l'éthanol, le E10 (ancien SP95 E10). La courbe en noir représente le pourcentage du E10 utilisé par rapport à l'ensemble des carburants.

1. Comment évolue au cours des années la part d'utilisation du E10 ?

2. Éventuellement à l'aide d'Internet :

- rechercher la signification exacte de SP 95 E10 ;
- trouver une ou des raisons pour laquelle, ou lesquelles, on ne peut pas incorporer davantage d'éthanol dans l'essence.

29 Agrocarburants de deuxième génération



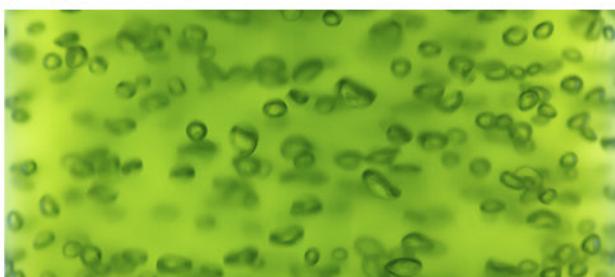
1. Qu'est-ce qu'un agrocarburant ?

2. Quelles sont les ressources employées pour fabriquer des agrocarburants de deuxième génération ?

3. Quel avantage cela apporte-t-il par rapport aux agrocarburants de première génération ?

30 Agrocarburants de troisième génération

Les agrocarburants de troisième génération utiliseront des microalgues, riches en lipides. Des problèmes d'extraction de lipides inclus dans la structure organique des algues sont progressivement levés, et les meilleures souches sont sélectionnées. À terme, plusieurs dizaines de tonnes de lipides pourraient être produites par hectare, alors que les agrocarburants de première génération peinent à atteindre quelques tonnes par hectare.



Donner au moins deux avantages apportés par cette génération d'agrocarburants par rapport aux précédentes.

Exercice résolu EN AUTONOMIE

31 Pouvoir calorifique massique



Une bonbonne de gaz butane pleine pèse 24,0 kg et 11,2 kg lorsqu'elle est vide. Elle alimente le chauffe-eau d'une caravane, permettant d'élever la température de l'eau de 45,0 °C. Cette bonbonne est vidée en quatre semaines avec une consommation quotidienne de 100 L d'eau chaude pour six vacanciers.

Données : $\rho_{\text{eau}} = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$; il faut fournir 4,18 kJ pour éléver la température d'1 kg d'eau de 1,0 °C.

1. **Déterminer** la masse de butane m_{butane} contenue dans une bonbonne pleine.
2. **Déterminer** la masse d'eau m_{eau} chauffée quotidiennement, et en déduire l'énergie Q_{eau} nécessaire pour cette élévation de température.

3. **Expliquer** le lien entre l'énergie de combustion Q et l'énergie permettant de chauffer la masse d'eau Q_{eau} .
4. En déduire la valeur du pouvoir calorifique massique du butane.
5. **Comparer** avec la valeur indiquée dans les tables : $PC = 45,7 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. On détermine la masse de butane en calculant la différence entre la masse pleine et la masse vide de la bonbonne :

$$m_{\text{butane}} = 24,0 - 11,2 \text{ soit } m_{\text{butane}} = 12,8 \text{ kg.}$$

2. On détermine la masse d'eau en prenant en compte la consommation quotidienne, le nombre de jours et la masse volumique de l'eau.

Le chauffe-eau produit donc $28 \times 100 = 2,80 \times 10^3$ L d'eau, soit une masse $m_{\text{eau}} = \rho_{\text{eau}} \cdot V$ soit $m_{\text{eau}} = 2,80 \times 10^3 \text{ kg.}$

Pour éléver la température d'un kilogramme d'eau de 45,0 °C, il faut lui apporter une énergie $4,18 \times 45 = 188 \text{ kJ.}$

Ainsi $Q_{\text{eau}} = 2,80 \times 10^3 \times 188$ soit $Q_{\text{eau}} = 526 \text{ MJ.}$

3. Il faut considérer que l'énergie de combustion Q est transmise intégralement à l'eau sans perte thermique. Ainsi $Q = -Q_{\text{eau}} = -526 \text{ MJ.}$

4. $Q = -526 \text{ MJ}$ est l'énergie de combustion d'une masse $m = 12,8 \text{ kg}$, aussi le pouvoir calorifique massique est le quotient de l'énergie de combustion sur la masse : $PC = \frac{|Q|}{m} = \frac{526}{12,8}$ soit $PC = 41,1 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

5. La valeur trouvée est plus faible que celle indiquée dans les tables, ce qui est normal : la combustion et le transfert thermique ont été considérés sans perte énergétique, ce qui n'est pas le cas.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- La **masse de la bonbonne** est donnée pleine et vide de gaz.
- Le volume d'eau chauffé et l'énergie nécessaire pour éléver la température de l'eau de 1 °C renseignent sur l'**énergie produite** lors de la combustion du butane.

LES QUESTIONS À LA LOUPE

- Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- Expliquer** : donner une justification à une observation ou une affirmation.
- Comparer** : mettre en regard deux résultats pour en identifier les différences ou les similitudes.

QUELQUES CONSEILS

3. La combustion du butane permet le chauffage de l'eau. On peut poser l'hypothèse d'un transfert thermique sans perte.

4. Attention, une énergie de combustion est négative tandis que le pouvoir calorifique massique est positif.

EXERCICE SIMILAIRE

32 Quelle masse de combustible ?

Un réchaud à gaz propane est placé dessous un récipient en cuivre contenant 10 litres de lait à 10 °C afin de le faire bouillir à 100 °C.

Données : il faut 4,18 kJ pour éléver la température d'1 kg de lait de 1,0 °C; $\rho_{\text{lait}} = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$; le pouvoir calorifique massique du propane est $PC = 46 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1. Quelle énergie est nécessaire pour faire bouillir le lait ?
2. Quelle masse de propane est consommée pour y parvenir ?

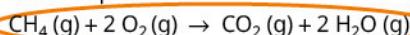


Exercice résolu EN AUTONOMIE

33 Énergie de combustion du méthane dans l'air



Le méthane, le plus simple des alcanes, est le composant essentiel du gaz naturel. Il est utilisé dans les chaudières individuelles, où il brûle avec le dioxygène de l'air. Son équation de combustion complète est :



LA CLÉ DE L'ÉNONCÉ

► L'équation ajustée permet de savoir quelles sont les liaisons rompues et celles qui sont formées.

LES QUESTIONS À LA LOUPE

► Expliquer : donner une justification à une observation ou une affirmation.

► Déterminer : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.

► Comparer : mettre en regard deux résultats pour en identifier les différences ou les similitudes.

2. Déterminer l'énergie molaire de la réaction.

3. Comparer la valeur obtenue à celle donnée dans les tables : - 802 kJ · mol⁻¹.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. Au cours d'une transformation, les liaisons entre les atomes se réorganisent. L'énergie mise en jeu correspond à la différence des énergies des liaisons rompues et de celles qui sont formées.

2. Pour le méthane, on dénombre quatre liaisons C—H rompues.

Pour le dioxygène, une liaison O=O est rompue par molécule, or la réaction met en jeu deux molécules de dioxygène. Il y donc deux liaisons O=O rompues.

Pour le dioxyde de carbone, deux liaisons C=O sont formées.

Pour l'eau, quatre liaisons O—H sont formées puisqu'il y a deux molécules d'eau.

Énergie absorbée par les ruptures de liaisons :

$$4 E_{\text{C-H}} = 4 \times 415 = 1\,660 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$2 E_{\text{O=O}} = 2 \times 498 = 996 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\text{Total : } 2\,656 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Énergie dégagée par la formation des liaisons :

$$2 E_{\text{C=O}} = 2 \times 804 = 1\,608 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$4 E_{\text{O-H}} = 4 \times 463 = 1\,852 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\text{Total : } 3\,460 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

On calcule alors l'énergie dégagée par différence :

$$\Delta E = \Sigma E_{\text{liaisons rompues}} - \Sigma E_{\text{liaisons formées}} = 2\,648 - 3\,460 \text{ soit } \Delta E = -804 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

3. La différence entre la valeur obtenue et celle donnée dans les tables vaut :

$$\Delta E_{\text{obtenue}} - \Delta E_{\text{tables}} = -804 - (-802) = -12 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}, \text{ soit } \frac{12}{802} = 0,3\%.$$

L'écart est faible. On obtient une très bonne approximation.

QUELQUES CONSEILS

1. La différence entre la situation initiale et la situation finale permet de trouver l'énergie mise en jeu.

2. Il faut déterminer le nombre et la nature des liaisons rompues et des liaisons formées.

EXERCICE SIMILAIRE

34 Combustion d'un alcool

Le propan-1-ol peut brûler facilement avec le dioxygène de l'air.

Données : énergies de liaisons p. 157.

1. Écrire l'équation de combustion complète du propan-1-ol dans le dioxygène de l'air.

2. Déterminer l'énergie molaire de cette combustion.

3. Comparer la valeur obtenue à celle indiquée dans les tables : - 1 844 kJ · mol⁻¹.

Croiser les notions

DONNÉES

- $M_H = 1,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M_C = 12,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $M_O = 16,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Volume molaire : $V_m = 24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Énergies de liaison p. 157.

35 Choix d'un chauffage à combustion

En hiver, la facture de chauffage peut être élevée, mais elle varie selon le mode de chauffage choisi.

Cet exercice va permettre de trancher entre trois possibilités de chauffage : au fioul, avec des granulés de bois ou au gaz.

A Prix des combustibles

fioul : 950 € le m^3

granulés de bois : 290 € la tonne

gaz propane : 2 000 € la tonne

B Prix des appareils

chaudière au fioul, poêle à bois et chaudière à condensation au gaz : environ 3 000 € chacun

C Pouvoirs calorifiques massique (en $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

fioul : 40,5

granulés de bois : 20,2

gaz propane : 46



Donnée : masse volumique du fioul : $\rho = 840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1. Quelle masse de chaque combustible peut-on acheter avec 500 € ?

2. En déduire l'énergie théorique fournie par chaque combustible avec cette somme.

3. Cependant, les rendements des chaudières diffèrent : 85 % pour les chaudières au fioul ou au gaz, contre 80 % pour un poêle à granulés.

Quelle énergie peut donc être réellement obtenue pour chacun des combustibles ?

4. À partir des résultats précédents, rédiger un petit paragraphe conseillant un mode de chauffage.

36 Combustion de l'essence

Un véhicule à essence consomme 4,8 litres de sans plomb 95 aux 100 kilomètres sur autoroute en roulant à 120 kilomètres par heure. On considère que ce carburant est constitué essentiellement de molécules d'octane, de formule C_8H_{18} et de masse volumique $\rho = 0,70 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1. Calculer la masse m de carburant consommée sur autoroute aux 100 kilomètres.

2. Déterminer la masse molaire de la molécule C_8H_{18} , et en déduire la quantité de matière dans la masse m .

3. Écrire l'équation de combustion se produisant entre le dioxygène de l'air et l'octane, sachant que cette réaction produit de l'eau H_2O et du dioxyde de carbone CO_2 .

4. On considère que la réaction précédente utilise 32 moles de C_8H_{18} par 100 kilomètres, et que le dioxygène est en excès.

Déterminer les quantités de matière d'eau et de dioxyde de carbone produites.

5. En déduire la masse de dioxyde de carbone formée pour 100 kilomètres, puis pour 1 kilomètre.

6. Le pouvoir calorifique massique de l'octane est $PCI = 45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Calculer l'énergie chimique libérée pour ce parcours de 100 kilomètres. À votre avis, cette énergie sert-elle uniquement à la propulsion du véhicule ? Justifier.

37 Chaudière au fioul

Les bureaux d'une usine chimique sont chauffés à l'aide d'une chaudière au fioul. En tenant compte de son rendement, la puissance de cette chaudière est de 30 kW. On admet que le fioul est assimilable à de l'heptane, de formule brute C_7H_{16} .

1. Écrire l'équation de la réaction de combustion complète de l'heptane dans le dioxygène de l'air.

2. Calculer l'énergie molaire de la réaction de combustion, tous les corps étant pris à l'état gazeux.

3. En déduire le pouvoir calorifique massique inférieur PCI de l'heptane, en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

4. Quelle énergie fournit la chaudière en une heure ?

5. On admet que l'air contient 20 % de dioxygène en volume. Calculer le débit d'air d'alimentation de la chaudière en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

38 Combustion du gaz de ville

Le gaz de ville est du méthane, de formule brute CH_4 . Dans cet exercice, on souhaite déterminer le coût de l'heure de fonctionnement d'une chaudière au méthane.

1. Écrire la réaction de combustion complète du méthane dans le dioxygène.

2. Calculer l'énergie molaire de cette réaction, les réactifs et les produits étant pris à une température telle que l'eau formée est gazeuse.

3. On veut produire dans cette chaudière au moins 100 MJ pour une heure de fonctionnement. Quel débit molaire (en $\text{mol} \cdot \text{h}^{-1}$) de méthane doit-on utiliser ?

4. Quel est le coût d'une heure de fonctionnement sachant que le m^3 de gaz est facturé 0,0267 euros ?

39 Combustion du kérósène

Certains moteurs d'avion utilisent des carburants à base de kérósène, mélange constitué, entre autres, d'un alcane de formule brute $C_{10}H_{22}$.

- Écrire la formule semi-développée du 2,2,4,5-tétramethylhexane.
- Vérifier que sa formule brute est $C_{10}H_{22}$.
- Écrire l'équation ajustée correspondant à la combustion complète de cet alcane.
- Quelle masse de dioxyde de carbone est rejetée par la combustion complète d'un kilogramme de cet alcane ?
- On donne quelques caractéristiques de l'Airbus A380 :

Capacité : 525 passagers.

Contenance du réservoir : 310 m³ de kérósène.

Consommation : 2,9 L de kérósène pour 100 km par passager.

Calculer la masse de dioxyde de carbone rejetée par un A380 complet au cours d'un trajet de 6 000 km entre Paris et New York. On assimilera le kérósène à un alcane de formule brute $C_{10}H_{22}$ et de masse volumique $\rho = 0,70 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$.

40 Combustion du GPL

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est essentiellement constitué de propane, de formule brute C_3H_8 . La combustion complète d'un kilogramme de propane, considéré à l'état liquide, a lieu en présence d'air atmosphérique.

- Écrire l'équation de combustion complète du propane.
- On considère une masse $m_{\text{propane}} = 1,00 \text{ kg}$. Etablir le tableau d'avancement de la transformation en considérant que le propane est le réactif limitant.
- Quelle est la valeur de x_{\max} ?
- En déduire, à l'état final, les quantités de matière d'eau et de dioxyde de carbone formées.
- Calculer la masse de dioxyde de carbone rejetée dans l'atmosphère.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- exprimé la masse en gramme pour calculer la quantité de propane ;
- tenu compte de la stœchiométrie dans le tableau d'avancement.

41 Combustion des carburants dans l'air

On souhaite comparer les trois carburants les plus utilisés pour propulser les véhicules terrestres :

	essence	gazole	GPL
Assimilé à	octane	heptadécane	propane
Nombre d'atomes de carbone	8	17	3
Consommation aux 100 km (en L)	7,5	5,5	9,3
Masse volumique (en g · L ⁻¹)	700	840	550

1. Écrire les équations de combustion complète du propane, de l'octane et de l'heptadécane dans l'air.

2. Calculer les masses puis les quantités de matière des trois carburants qui sont consommés par ces moteurs pour 100 km lors d'une combustion complète.

3. En déduire, pour chaque carburant, la masse de dioxyde de carbone rejetée pour 100 km parcourus, puis pour 1 km.

4. Quel moteur produit le moins de gaz à effet de serre ?

42 Valeur seuil de monoxyde de carbone

Lors de la combustion de 3,00 g de butanol, de formule brute $C_4H_{10}O$, il se forme, entre autres produits, 4,00 g de dioxyde de carbone et 0,30 g de carbone pur.

1. La combustion réalisée ici est-elle une combustion complète ? Justifier la réponse.

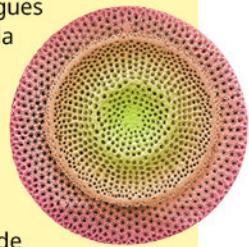
2. Utiliser la conservation de l'élément carbone pour calculer la masse de monoxyde de carbone qui est également formée lors de cette réaction.

3. Si cette combustion a lieu dans une pièce de 9,00 m² ayant une hauteur sous plafond de 3,00 m, atteint-on la concentration limite en monoxyde de carbone fixée à $60,0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (pour une exposition de 30 minutes) ?

À L'ORAL

43 Les diatomées, des algues énergétiques

Les diatomées sont des microalgues unicellulaires capables de réaliser la photosynthèse comme les plantes supérieures : elles fixent le CO₂ atmosphérique ou fourni par une installation productrice de ce gaz. Elles peuvent accumuler jusqu'à 50 % de leur poids sec en acides gras, ce qui pourrait représenter une production de 20 à 60 m³ d'huile par hectare par an, contre 6 m³ pour l'huile de palme, ayant un des meilleurs rendements terrestres. Ces algues pourraient être utilisées comme agrocarburants de troisième génération.



Préparer un exposé oral permettant de répondre à la question suivante : en quoi cet agrocarburant du futur est-il à même de solutionner les problèmes énergétiques actuels ?

Cet exposé devra être réalisé sans note écrite.

44 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Lors du décollage d'un avion, on perçoit une flamme vive de couleur orange en sortie de conduit arrière (tuyère).

Préparer un exposé oral permettant d'expliquer la formation d'une flamme en sortie de tuyère de cet avion.



Acquérir des compétences

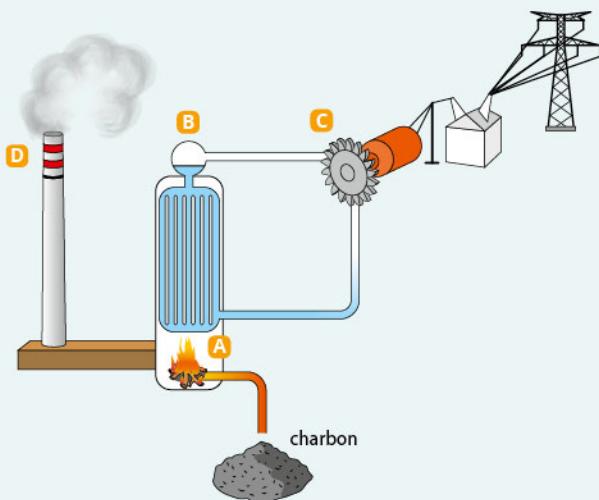
45 Centrales thermiques à flamme ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

APP Rechercher et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée

DOC 1 Fonctionnement d'une centrale à charbon

La société EDF fait fonctionner une ou deux centrales thermiques à flamme lorsque la demande d'électricité dépasse la production disponible, en particulier en hiver. Dans ce cas, le combustible utilisé peut-être du charbon, des dérivés pétroliers, etc.

La combustion de charbon assure le chauffage de l'eau, qui est transformée en vapeur d'eau sous pression. Celle-ci entraîne alors une turbine reliée à un alternateur produisant de l'électricité. De nombreuses particules solides de suies et de gaz sont évacuées par des cheminées.



DOC 2 Pouvoir calorifique massique

L'énergie dégagée par la combustion complète de 1,0 kg de combustible liquide ou solide à la pression atmosphérique est le pouvoir calorifique massique, exprimé en joule par kilogramme ($J \cdot kg^{-1}$).

On donne les pouvoirs calorifiques massiques de quelques combustibles : charbon : 15 à 27 $MJ \cdot kg^{-1}$, gazole : 45 $MJ \cdot kg^{-1}$, éthanol : 29 $MJ \cdot kg^{-1}$, heptane : 45 $MJ \cdot kg^{-1}$.

ANALYSE

1. Compléter la légende du doc. 1.
2. Pourquoi la société EDF conserve-t-elle des centrales thermiques à flamme utilisant du charbon ?
3. À votre avis, quel est l'intérêt du charbon par rapport à d'autres combustibles ?
4. En assimilant le charbon à du carbone, écrire son équation de combustion complète.
5. La production d'électricité à partir de charbon est le principal émetteur de gaz à effet de serre au monde. Nommer ce gaz.

SYNTHÈSE

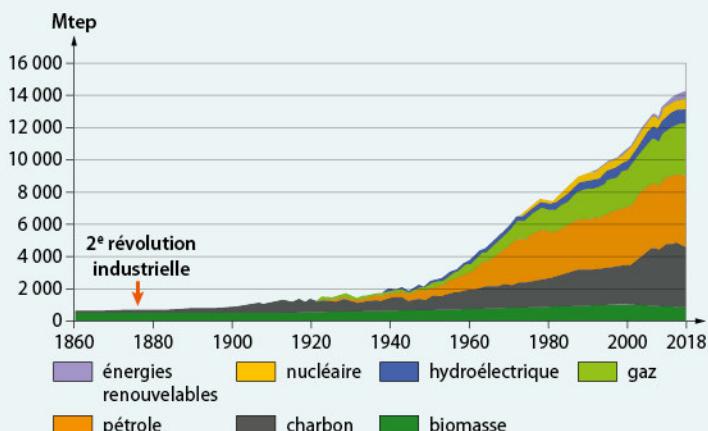
Résumer le principe de fonctionnement d'une centrale thermique à flamme, son intérêt majeur et ses inconvénients.

46 Combustibles fossiles TÂCHE COMPLEXE

AN/RAI Formuler une hypothèse

COM Choisir des modèles de représentation appropriés

DOC 1 Consommation mondiale d'énergie au cours du temps



VOCABULAIRE

► La tonne équivalent pétrole (tep) correspond à l'énergie moyenne libérée par la combustion d'une tonne de pétrole.

LE PROBLÈME À RÉSOUTRE

Comment les combustibles fossiles sont-ils devenus incontournables au cours du temps ? Discuter de leur remplacement futur dans notre société.

DES PISTES POUR L'ORAL TERMINAL

Un projet sur les agrocarburants est l'occasion de réinvestir des notions de chimie (énergie, réaction, etc.), mais aussi de sciences de la vie et de la Terre, d'histoire-géographie et de citoyenneté.

UNE SITUATION À L'ORIGINE DE MON PROJET

Depuis de nombreuses années, on parle de l'épuisement des énergies fossiles et de dérèglement climatique. La COP 21 devait être un nouveau départ pour la Terre.



COP21 - CMP11
PARIS 2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE

DES DOCUMENTS POUR M'AIDER À L'ORIENTER

Le pétrole et le charbon

Les combustibles d'origine fossile représentent encore 70 % de l'énergie consommée dans le monde. Leur exploitation s'avère de plus en plus difficile et peut générer de la pollution. Leur combustion libère beaucoup de produits toxiques, entraînant la mort de nombreuses personnes

Les nouveaux carburants

Les agrocarburants de deuxième génération sont obtenus à partir de matière agricole non comestibles.



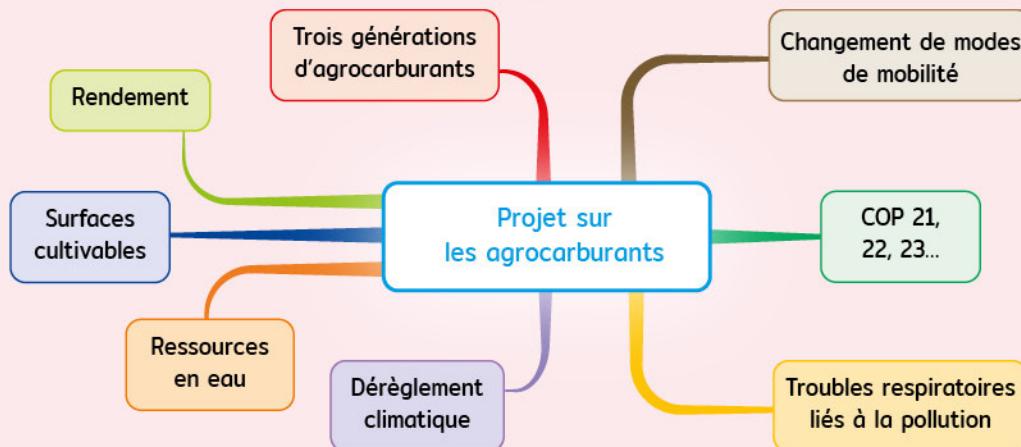
Les huiles produites à partir de microalgues peuvent être transformées en carburant pour les véhicules à essence ou diesel.

Le développement de véhicules consommant moins ou du covoiturage, et, d'une manière générale, une modification de nos modes de transport, vont dans le bon sens pour la planète.

Les agrocarburants de première génération

Les agrocarburants de première génération présentent de nombreux inconvénients. En effet, ils utilisent des ressources alimentaires et sont moins efficaces que les carburants d'origine fossile. De plus, ils ne règlent pas le problème des gaz à effet de serre.

DES PISTES DE RECHERCHE À EXPLORER



Le vocabulaire scientifique à utiliser

- combustible, comburant
- gaz à effet de serre
- pouvoir calorifique