

The background features a light-colored wall with a wooden surface at the bottom. On the wooden surface, there is a spool of white rope with a green plant stem resting on it. The text is overlaid on this background.

Travaux Dirigés  
**ENERGIES RENOUVELABLES**

**Docteur EGORAN. Enseignant-Chercheur**

**+225 0758026840 / 0707578110**

**UFR SDM – LICENCE 3**

A glass test tube is positioned vertically, containing a clear liquid. A white straw is inserted into the tube, extending from the top to the bottom. The background is a light, off-white color with a subtle grid pattern. The entire scene is framed by a thin, light brown border.

# **INTRODUCTION**

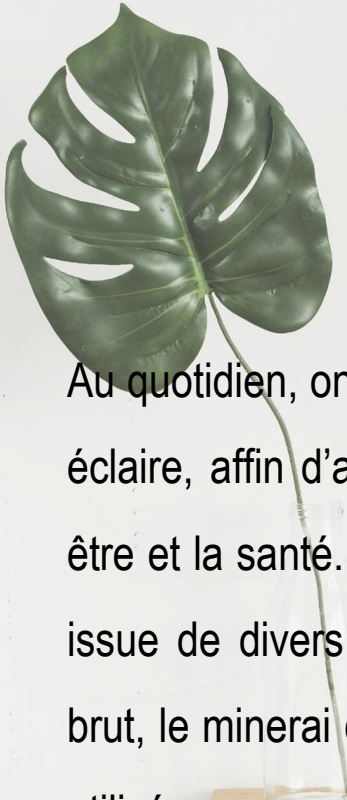




## INTÉRÊT DU COURS

Au quotidien, **on utilise L'énergie**, pour se **déplacer**, **chauffer**, **éclairer**, afin d'assurer un développement économique et social et améliorer le bien-être et la santé.

# INTRODUCTION



Au quotidien, on utilise différents types d'énergie, que ce soit pour déplacer, chauffer, éclairer, afin d'assurer un développement économique et social et améliorer le bien-être et la santé. Cette énergie n'est pas disponible dans notre environnement. Elle est issue de divers processus de transformation d'énergies primaires comme le pétrole brut, le minerai d'uranium, le vent, les rayonnements solaires, qui lui permettent d'être utilisée au quotidien par nos appareils électroménagers ou nos dispositifs de chauffage.

# □ Le rôle actuel des soucis d'énergétiques

Il est régulièrement fait référence à la «crise de l'énergie», **c'est-à-dire au manque à terme d'énergie en quantité suffisante.**

En fait, à chaque crise l'analyse des énergies disponibles, en particulier des réserves de combustibles en sous-sol, ont permis de montrer que ce risque était souvent surévalué, toutes les ressources du sous-sol n'ayant pas jusque là été prises en compte.

**En fait le risque principal est surtout dû au développement de l'effet de serre dans l'atmosphère** (avec risque de réchauffement climatique), effet lié à l'usage prédominant de combustibles dont la combustion dégage du CO<sub>2</sub>, qui est l'un des principaux gaz de l'atmosphère à l'origine de l'effet de serre. De ce fait c'est surtout sous ce deuxième angle (celui du risque lié au réchauffement climatique) que l'on parle aujourd'hui des «économies d'énergie» alors qu'il s'agit plutôt de «mauvais choix énergétique». D'où l'importance des analyses qui suivent.

# □ Les deux classes d'énergies

Il est désormais classique de classer les énergies de la manière suivante :

- ✓ d'une part les *énergies non renouvelables*, un domaine correspondant essentiellement à celui des combustibles extraits du sous-sol;
- ✓ et d'autre part les *énergies renouvelables*, dont le stock n'entre pas dans la catégorie précédente. Cette définition est, en fait, souvent très simpliste, l'énergie nucléaire n'étant pas, par exemple, classée comme «renouvelable» alors qu'elle ne participe pas au développement de l'effet de serre.

Pour plus de clarté dans le langage, nous classerons souvent les énergies en quatre catégories :

- ✓ celle des **combustibles non renouvelables**, issus du sous-sol;
- ✓ celle des **combustibles renouvelables**, examinés plus loin;
- ✓ celle des **énergies nucléaires**, normalement neutres quant à l'effet de serre;
- ✓ celle des **énergies «naturelles»** (soleil, vent, marées, etc..).

Ici nous adoptons le premier classement distinguant *énergies renouvelables* et *énergies non renouvelables*.

Les énergies renouvelables sont, actuellement classables par importance de la manière suivante :

- 1. La *biomasse*,
- 2. L'*hydraulique*,
- 3. La *géothermie*,
- 4. L'*éolien*,
- 5. Le *solaire*

auxquels nous ajouterons les « *combustibles*

# PLAN DU COURS

<i>Contenu</i>	<i>page</i>
1. Panorama des énergies renouvelables	3
6.1. Le cadre de ce guide	3
2. La biomasse énergie	4
2.1. Panorama de la biomasse énergie	4
2.2. L'avenir de la biomasse énergie	5
2.3. La biomasse primaire	6
2.4. Le problème général du bois	7
2.5. Bois, plaquettes et granulés	7
2.6. La biomasse énergie secondaire	8
2.7. Le biogaz	8
3. L'hydraulique	10
4. La géothermie	11
4.1. La température du sol et les géothermies	11
4.2. Le montage géothermique type	11

<i>Contenu</i>	<i>page</i>
5. L'éolien	13
5.1. La structure du vent	13
5.2. Les éoliennes de parcs terrestres	14
5.3. Les éoliennes off-shore	14
5.4. Les performances éoliennes	15
6. Le solaire	16
6.1. Le solaire : survol	16
6.2. Le solaire passif	17
7. Le solaire thermique actif	18
7.1. Le classement des systèmes actifs	18
7.2. Les capteurs solaires	18
7.3. La performance des capteurs solaires	19
7.4. La théorie du capteur plan	20
7. Les combustibles renouvelables	22

## **OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES (1/2)**

**OBJECTIF GÉNÉRAL Offrir aux étudiants les connaissances sur les notions des différents types d'énergies renouvelables**



# OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES (2/2)

## OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

- Identifier les différentes formes d'énergies renouvelables
- Définir les différentes formes d'énergies renouvelables

# **PARTIE 1: BIOMASSE ENERGIE**



# LA BIOMASSE ÉNERGIE

La biomasse, comme le solaire, sont les énergies renouvelables essentielles dans nos applications : le chapitre qui suit concerne uniquement la biomasse-énergie.

## Panorama de la biomasse énergie



## L'utilisation de la biomasse-énergie: une ambition récurrente

Ce qu'on appelle aujourd'hui la biomasse couvre en fait de multiples produits organiques, allant du plus simple (le plus évident: le bois) au plus indirect et au plus complexe chimiquement, les produits issus de la méthanisation par exemple.

## ❖ S'agit t'il d'une énergie totalement renouvelable?

La biomasse énergie est quasi-systématiquement considérée comme «*énergie renouvelable*», alors que ce n'est pas toujours très évident.

L'utilisation du bois-énergie suppose qu'on assure, par ailleurs, une reforestation correcte, assez loin d'être neutre énergétiquement.

D'une manière générale les présentations françaises courantes négligent les «*énergies grises*», celles correspondant aux activités annexes : préparation et transport des combustibles, remises en état diverses (reforestation comprise), etc.

L'exemple le plus net est celui des *déchets ménagers*, dont la collecte et le transport représentent la moitié (en ordre de grandeur) des valeurs sur le plan des bilans économiques et énergétiques.

## ❖ La biomasse énergie et l'effet de serre

L'utilisation de la biomasse met en évidence l'insuffisance courante - hélas trop fréquente - qui consiste à considérer que le seul gaz à effet de serre est le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ).

En oubliant le méthane ( $CH_4$ ), qui est justement dégagé par de nombreux processus organiques. Un oubli d'autant plus regrettable que le méthane a, schématiquement, quatre fois plus d'action que le  $CO_2$ .

Les réglementations les plus courantes ne tiennent pourtant compte que du  $CO_2$ , alors que la récupération (et la combustion) du méthane, dégagé par exemple par les décharges, conduirait à des bilans économiques et énergétiques très positifs en matière d'effet de serre.

## ❖ L'avantage de la biomasse: le stockage

La plupart des énergies renouvelables (en particulier celles vues dans les chapitres qui suivent) ont toutes le même défaut, celui de n'être pas stockables :

- *l'énergie solaire* est nulle à certaines heures ou insuffisante pour des raisons météorologiques,

- *l'énergie éolienne* l'est également pour des raisons météorologiques (vent trop faible ou trop fort).

Au contraire l'énergie issue de la biomasse, avec les biocombustibles en particulier, est ajustable aux besoins instantanés à chaque moment.

## ❖ La biomasse énergie face au poids des traditions

La tradition, et les «souvenirs d'antan» avec ses foyers ouverts (les fameuses «cheminées»), peut avoir des effets psychologiques et commerciaux nocifs.

Il serait souhaitable qu'on abandonne les nostalgies au bénéfice de considérations plus ingrates, mais essentielles si l'on veut vraiment faire du **développement durable** optimisé.

La biomasse peut y jouer un rôle fondamental, mais pas forcément celui que, parfois, on imagine.

## 2.2. L'avenir de la biomasse énergie

### ➤ La biomasse énergie individuelle face à ses difficultés

. D'abord une alimentation correcte et suffisante en *air neuf*, laquelle est très souvent plus ou moins incompatible avec la réduction drastique actuellement prévue pour la perméabilité à l'air des locaux habités ;

. Ensuite l'oubli fréquent (il n'y a plus guère de «fumistes») que ces systèmes exigent des conduits particuliers et spécifiques d'évacuation des gaz brûlés, des *conduits de fumée* qui ne peuvent pas être confondus avec ceux désormais habituels pour le chauffage central individuel, au gaz en particulier.

## ➤ Le problème fondamental de sécurité

L'insuffisance d'air neuf, sinon même l'absence de conduits de fumée adéquats, font qu'il y a émission de  $CO_2$ , et surtout de monoxyde carbone (CO) très toxique. Sans compter les impuretés solides diverses. Ce qui a surtout dans les habitats modestes très peu ventilés deux conséquences très néfastes ou désagréables : pollution dangereuse de l'air, salissure des parois.

Le risque le plus important est, bien sûr, le risque de dégagement de CO dans les ambiances habitées.

Ce risque est tel que, dans certains pays ou avec certains matériels, il y a présence obligatoire d'un détecteur d'oxyde de carbone (CO) suspendant la combustion en cas de dépassement des teneurs limites (assez vite atteintes).

## ➤ La biomasse énergie Centralisée

L'un des obstacles les plus fréquents au développement de la biomasse énergie tient à la négligence de solutions qui sont aujourd'hui plus que défendables surtout en production d'électricité: le recours à des **installations centralisées utilisant la biomasse**, en particulier les déchets.

C'est là, sans aucun doute, sous réserve de bien organiser le bilan CO<sub>2</sub>, et de maîtriser les effets du méthane (CH<sub>4</sub>), que devrait se situer l'avenir le plus important de la biomasse énergie.

De nombreux efforts ont été consentis afin de développer le marché de la biomasse énergie, et afin de promouvoir la qualité des produits amont. Nous noterons surtout ici :

- . les actions «*bois énergie*»,
- . le soutien au *biogaz agricole*,
- . les actions européennes en particulier pour les spécifications concernant les *granulés*.

# La biomasse primaire

## ✓ Les deux aspects de la biomasse

La **biomasse**, constituée des matières «vivantes», peut être classée en deux catégories (classement propre à ce guide) : la *biomasse primaire* et la *biomasse secondaire*.

1. La **biomasse primaire** comprend le bois et les différents végétaux utilisés comme combustibles, quel que soit leur état physique (solide, etc.). Cette biomasse est traitée dans la présente fiche, le bois (sous forme de bûches ou de dérivés tels que les plaquettes).

2. La **biomasse secondaire** est constituée de déchets issus de matières organiques, végétales ou non.

Quelle que soit la catégorie, la biomasse est classée «**énergie renouvelable**». La raison en est la suivante.

## Raison 1: Le cycle du carbone

Avant toute combustion la biomasse absorbe le  $CO_2$  de l'air au travers diverses réactions chimiques, dites de **photosynthèse**. C'est ainsi que la réaction type en **photosynthèse** des végétaux peut se traduire par la formule suivante, donnée ici à titre d'illustration :



Lors de la combustion il y a, à l'inverse, dégagement de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) : c'est ce cycle (quasi- neutre) du  $CO_2$  qui fait que la biomasse est classée «énergie renouvelable». En voici un exemple.

La quantité de carbone contenue dans une forêt étant directement proportionnelle au volume de bois présent, bien que variant certes selon les essences et les peuplements, on a pu calculer que la photosynthèse se produisant au sein de la forêt française piégeait (chiffes 1006) 66 millions de tonnes de  $CO_2$  par an, soit entre 15 et 20 % des émissions annuelles françaises de  $CO_2$ . Le phénomène, sur le plan du développement durable, est donc assez fondamental.

## Raison 2: Biocombustibles et biocarburants

La biomasse peut être utilisée énergétiquement sous deux formes :

- . soit sous forme de **combustible**, dans les *chaudières* ou équipements de même type,
- . soit sous forme de **carburant**, dans les *moteurs*.

Dans le premier cas on parle de **biocombustible**, dans le second cas de **biocarburant**. Les **biocombustibles** se présentent sous des formes très diverses, et peuvent être :

- . soit du bois (sous différentes formes),
- . soit des végétaux spécifiques, ou des résidus solides de la biomasse,
- . soit des déchets solides ou liquides,
- . soit des gaz résultant de traitements divers.

Les **biocarburants**, assez nombreux, sont victimes de discussions multiples sur leur rôle dans le cycle du carbone.

## Raison 3: Les Combustibles Dérivés

*Il existe un certain nombre de gaz issus de la transformation de matières organiques qui peuvent, plus ou moins, revendiquer le titre d'énergies renouvelables, et qui appartiennent aussi bien à la biomasse primaire qu'à la secondaire (déchets). Ce sont en particulier, parmi ceux qui peuvent nous concerner, les combustibles suivants :*

- . le méthane (le biogaz),
- . l'hydrogène (le bio-hydrogène),
- . le gaz naturel (le bio-SNG).

Le **biogaz** (pour l'essentiel du méthane).

Le biogaz d'origine agricole fait, depuis 2011, l'objet d'une plus grande attention, avec la fixation de tarifs assez élevés de vente de ce combustible aux producteurs d'électricité.

### L'importance du bois

Sur le plan pratique, c'est le **bois** - sous des différentes formes - qui constitue l'apport actuel le plus important de la biomasse énergie

## 2.4. La biomasse secondaire en utilisation directe

La «biomasse secondaire» concerne tous les produits organiques, ou assimilables, autres que le bois : il s'agit souvent de déchets utilisés directement ou après transformation en applications énergétiques

### La caractéristique de base

Dans le secteur ici concerné la caractéristique la plus importante est le pouvoir calorifique, exprimé ici en kilowattheure par kilogramme [kWh/kg], et non pas en unité S.I., laquelle est le joule par kilogramme, ici le mégajoule par kilogramme [MJ/kg] pour mieux s'adapter aux ordres de grandeur.

Si vous avez à faire des conversions utilisez la relation suivante :

$$1 \text{ [kWh/kg]} = 3,6 \text{ [MJ/kg]}$$

## Panorama des déchets

De façon très générale on peut classer les déchets de la manière suivante :

- les **déchets courants** (déchets des papiers sous toutes leurs formes, déchets de la voirie et des marchés, etc.), dont le pouvoir calorifique est voisin de 5 [kWh/kg];
- les **ordures ménagères**, dont le pouvoir calorifique varie généralement selon les saisons entre 1,5 et 2,2 [kWh/kg] ;
- les **déchets professionnels** (déchets des activités professionnelles telles que la construction ou les industries du bois, etc.), de pouvoirs calorifiques très variables, mais voisins des précédents ;
- les **déchets verts**, dont le pouvoir calorifique est voisin de 5,5 [kWh/kg] (5,2 à 5,8 en fait);
- les **boues des stations d'épuration (STEP)**, qui ne sont normalement utilisées - au plan énergétique - qu'à travers les procédures décrites au paragraphe suivant.

## 2.5. Le biogaz

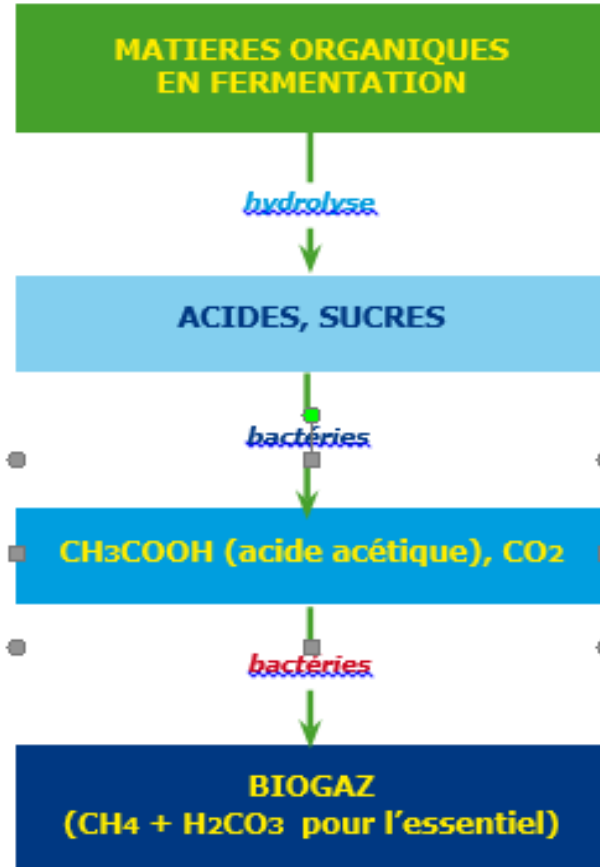
La dégradation par fermentation (en l'absence d'oxygène) de la biomasse et de ses déchets conduit à la production de **biogaz**, surtout constitué de **méthane** ( $\text{CH}_4$ ). De sorte qu'ici l'essentiel des procédés peut être classé dans le cadre de la **méthanisation**, procédé purement chimique.

L'ensemble des processus équivaut, pour l'essentiel, à une fabrication de méthane, aboutissant au mélange suivant dit «biogaz» :

- . 55 à 65 % de méthane ( $\text{CH}_4$ ),
- . 35 à 45 % d'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), les impuretés ( $\text{H}_2\text{S}$  pour l'essentiel) représentant moins de 1 %.

Le méthane, s'il est rejeté à l'atmosphère, étant un gaz à très fort effet de serre, son utilisation comme combustible est très important en développement durable. L'utilisation des déchets par méthanisation est donc un aspect essentiel, même si l'on ne classe pas les déchets dans les énergies renouvelables. La technique s'applique aussi bien aux déchets agricoles (au tarif de rachat réglementé) qu'aux déchets ménagers.

## LA FABRICATION DU BIOGAZ



## Les réacteurs de méthanisation

Ces réacteurs - dits souvent «**digesteurs**» - sont des cuves (en béton ou en acier) où séjourne la matière en fermentation pendant une vingtaine de jours. Cette matière y est régulièrement brassée de façon à limiter les effets de décantation et la formation éventuelle d'une croûte en surface. Elle est, de plus et en cas de nécessité, régulièrement chauffée.

La production de biogaz dépend très fortement de l'origine des déchets, qui peuvent correspondre aux trois grandes catégories suivantes :

- . les déchets ménagers,
- . les déchets agricoles,
- . les déchets industriels (agro-alimentaire).

## Définition de la puissance électrique

La puissance électrique consommée par un appareil électrique est égale au produit de la tension à ses bornes par l'intensité du courant qui le traverse.

1 Expression et unité de la puissance électrique

**La puissance électrique** se note  $P$  et s'exprime en Watt de symbole  $W$ .

$P = U \cdot I$     $U$  : Tension en Volts et  $I$  : intensité en Ampère.

N.B. : - En courant alternatif, la relation  $P = U \cdot I$  n'est valable que pour les appareils utilisant l'effet thermique (fer à repasser, réchaud électrique, lampe à incandescence ...)

- La puissance inscrite sur un appareil électrique est appelée **puissance nominale**. La tension inscrite en Volt représente la tension nominale.

La puissance nominale et la tension nominale sont les caractéristiques nominales de l'appareil.

### **Activité d'application 1**

- a- Donne l'expression de la puissance l'expression de la puissance électrique consommée par un appareil électrique.
- b- Calcule la puissance électrique consommée par un réchaud électrique soumis à une tension  $U = 220 \text{ V}$  et traversé par un courant d'intensité  $I = 3,63 \text{ A}$ .

### **Activité d'application 2**

Dans une maison, les appareils suivants sont en fonctionnement :

- un téléviseur de  $200 \text{ W}$  ;
- un ventilateur de  $150 \text{ W}$  ;
- 4 lampes de  $60 \text{ W}$  chacune.

Détermine la puissance totale consommée dans cette maison.

### Activité d'application 3

- 1) Un étudiant passe un aspirateur de puissance 1300 W dans sa chambre, pendant 8 minutes. Calculer, en joules, l'énergie transférée à cet appareil pendant la durée du nettoyage. Exprimer ensuite ce résultat en kWh.
- 2) Ce même étudiant révise son chapitre de sciences physiques pour le prochain contrôle pendant 1 heure et 30 minutes. Pour cela, il s'éclaire avec une lampe de bureau de 60 W. Calculer, en kWh, l'énergie transférée à cette lampe pendant cette révision. Exprimer ensuite ce résultat en joules.
- 3) Calculer le prix de cette séance de nettoyage et de révisions sachant que le prix d'un kilowattheure est de 0,0926 €.

### Activité d'application 4

Pour décorer sa maison à l'approche du nouvel an, une famille a décoré l'extérieur de sa maison avec deux guirlandes de 160 ampoules chacune. Cela lui coûte environ 3 € par jour pour 4 heures de fonctionnement quotidien.



- 1) Calculer l'énergie transformée par les lampes chaque jour, sachant que le prix du kilowattheure est de 0,0926 €.
- 2) En déduire la puissance transformée par l'ensemble des lampes.
- 3) Calculer la puissance d'une lampe en supposant qu'elles sont toutes identiques.
- 4) Quelle somme aura déboursé cette famille pour cet éclairage si celui-ci décore sa maison durant 3 semaines ?

## Corrigé de l'activité d'application

1 a- L'expression de la puissance électrique consommée par un appareil électrique est :  $P=U.I$

b- La puissance électrique consommée par le réchaud  $P = 220 \times 3,63 = 798,6W$

## Corrigé de l'activité d'application 2

220 V est la tension nominale ; 600 W est la puissance nominale.

### Puissance consommée dans une installation électrique

La puissance totale consommée dans une installation électrique est égale à la somme des puissances consommées par chaque appareil en fonctionnement.

### Corrigé de l'activité d'application

La puissance totale consommée dans cette maison est :  $P = 200 + 150 + (4 \times 60) = 590 W$ .

# Énergie électrique

2.1. Définition et expression L'énergie électrique consommée par un appareil est égale au produit de sa puissance nominale par la durée de fonctionnement.

$E = P \cdot \Delta t$   $P$  : Puissance en W et  $\Delta t$  : Durée de fonctionnement.

2.2. Unités - Si  $\Delta t$  est exprimée en seconde, alors E est en Joule(J) - si  $\Delta t$  est exprimée en heure, alors E est en Wattheure (Wh )

## Activité d'application

Un fer à repasser de puissance  $P = 600 \text{ W}$  fonctionne pendant une demie ( $\frac{1}{2}$ ) heure.

- Donne l'expression de l'énergie consommée par un appareil électrique.
- Détermine l'énergie électrique consommée par le fer à repasser en wattheure puis en joule.

## Corrigé de l'activité d'application

a- L'expression de l'énergie consommée par un appareil électrique est :  $E = P \cdot \Delta t$

b- l'énergie électrique consommée par le fer à repasser est :  $E = 600 \times \frac{1}{2} = 300 \text{ Wh}$  ou  $E = 600 \times 1800$

$E = 1080000 \text{ J}$  (car  $\frac{1}{2}$  heure = 1800 s).

Pour décorer sa maison à l'approche du nouvel an, une famille a décoré l'extérieur de sa maison avec deux guirlandes de 160 ampoules chacune. Cela lui coûte environ 3 € par jour pour 4 heures de fonctionnement quotidien.

1) Calculer l'énergie transformée par les lampes chaque jour, sachant que le prix du kilowattheure est de 0,0926 €.

$$E = 3 \text{ €} / 0,0926 \text{ €} = 32,40 \text{ kWh}$$

2) En déduire la puissance transformée par l'ensemble des lampes.

$$E = P \cdot t \text{ donc } P = E / t = 32,40 \text{ kWh} / 4 \text{ h} = 8,1 \text{ kW} = 8100 \text{ W}$$

3) Calculer la puissance d'une lampe en supposant qu'elles sont toutes identiques.

$$\text{On a en tout } 2 \times 160 = 320 \text{ lampes}$$

$$\text{La puissance d'une lampe est de } 8100 / 320 = 25,31 \text{ W} \approx 25 \text{ W}$$

4) Quelle somme aura déboursé cette famille pour cet éclairage si celui-ci décore sa maison durant 3 semaines ?

$$3 \text{ semaines} = 21 \text{ jours}$$

$$3 \text{ €} \times 21 \text{ jr} = 63 \text{ € de dépensés}$$

### Exercice 1

1) Un élève passe un aspirateur de puissance 1300 W dans sa chambre, pendant 8 minutes. Calculer, en joules, l'énergie transférée à cet appareil pendant la durée du nettoyage. Exprimer ensuite ce résultat en kWh.

$$8 \text{ minutes} = 8 \times 60 \text{ s} = 480 \text{ s}$$

$$E = P \cdot t = 1300 \cdot 480 = 624\,000 \text{ J}$$

$$E = 624\,000 / 3,6 \times 10^6 = 0,17 \text{ kWh}$$

2) Ce même élève révise son chapitre de sciences physiques pour le prochain contrôle pendant 1 heure et 30 minutes. Pour cela, il s'éclaire avec une lampe de bureau de 60 W. Calculer, en kWh, l'énergie transférée à cette lampe pendant cette révision. Exprimer ensuite ce résultat en joules.

$$1 \text{ h } 30 \text{ min} = 1,5 \text{ h}$$

$$60 \text{ W} = 0,06 \text{ kW}$$

$$E = P \cdot t = 0,06 \text{ kW} \times 1,5 \text{ h} = 0,09 \text{ kWh}$$

$$E = 0,09 \times 3,6 \times 10^6 = 324\,000 \text{ J}$$

3) Calculer le prix de cette séance de nettoyage et de révisions sachant que le prix d'un kilowattheure est de 0,0926 €.

$$\text{Le coût sera de } (0,17 + 0,09) \text{ kWh} \times 0,0926 \text{ €} = 0,024 \text{ €} = 2,4 \text{ cts}$$