

Mesures de consommation électrique et équivalent carbone

Les services convertissent de l'énergie finale, qui est une forme d'énergie commercialisée et directement consommable.¹ L'énergie finale est transformée à partir de ressources primaires. La Figure 1 comment l'énergie primaire est convertie en énergie finale qui est elle-même utilisée pour rendre un service. Dans notre cas, l'énergie finale est électrique, et le service rendu est le traitement d'informations.

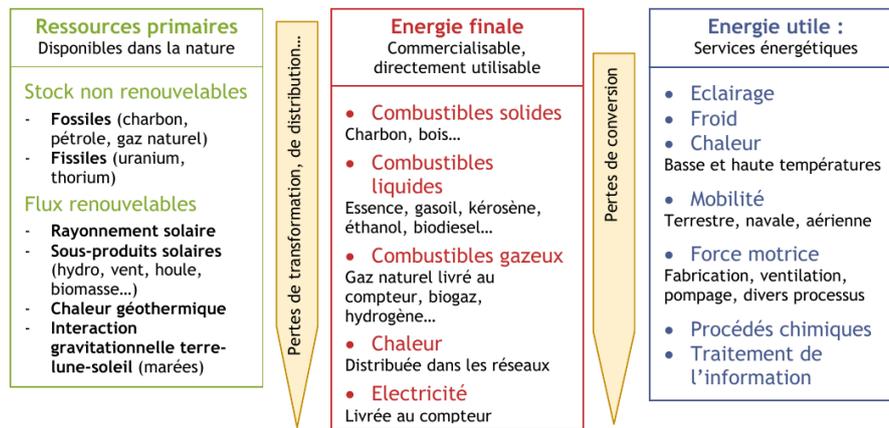


Figure 1 – Des ressources primaires au traitement de l'information. (Image B. Multon)

Dans cette séance, nous allons apprendre à mesurer l'énergie électrique nécessaire à l'exécution de systèmes de calculs numériques, et essayer appréhender la pollution induite par cette consommation d'énergie. Commençons par quelques rappels et des calculs concernant la puissance et l'énergie électrique.

1 Rappels ? Calculs de puissance et d'énergie

L'énergie caractérise le service énergétique rendu (travail, éclairage, ...). La calorie (4,18 J) est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C, 1g d'eau.

La puissance est le débit d'énergie qui a lieu lors d'une conversion, $P = \frac{dE}{dt}$ avec P la puissance en Watt² (W ou kW), E l'énergie (J ou kWh) et t le temps (s ou h).

La puissance caractérise le convertisseur d'énergie et plus particulièrement sa capacité à transformer plus ou moins vite l'énergie. Ainsi un moteur électrique de 20 kW transforme une même quantité d'énergie électrique deux fois plus rapidement qu'un moteur de 10 kW, il convertit deux fois plus vite l'énergie électrique qu'il reçoit en énergie mécanique et effectue donc un même travail plus rapidement.

Une transformation énergétique plus rapide nécessite un convertisseur plus puissant, donc plus cher, requérant plus de matières premières et consommant donc plus d'énergie grise, celle nécessaire à sa fabrication. En outre, vouloir réaliser plus rapidement un service énergétique requiert plus d'« énergie utile », par exemple : sur un trajet de 100 km une automobile dont la résistance à l'avancement serait de 400 N à 100 km/h consommerait une énergie de 40 MJ (soit 400.100.103 J) et une puissance mécanique de 11 kW (11 kWh en 1 heure) ; ce même déplacement à 130 km/h conduirait à une résistance à l'avancement de 650 N et requerrait 65 MJ et 23,5 kW (soit 18 kWh en 0,77 h).

QUESTION 1 ► Indiquez la puissance approximative de quelques appareils électriques que vous connaissez (bouilloire, four, ...).

¹<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/10110/10110-conversion-energie-et-efficacite-energetique-ensps.pdf>

²Du nom de James Watt (1736-1819), ingénieur écossais

Encart 1 Rappels : quelques notions physiques autour de l'électricité

Vous devez vous rappeler que $P = U.I$, et même que $U = R.I$, et peut-être aussi que $I = \frac{dQ}{dt}$. Mais très souvent, des gens appliquent cette formule sans avoir d'intuition permettant d'appréhender la tension U , l'intensité I , la résistance R , et Q la quantité de charge.

On peut faire une analogie entre le courant électrique à travers un circuit et un courant d'eau dans un tuyau. Dans ce cas :

- On peut voir le flot d'électrons dans le circuit comme le flot d'eau dans un tuyau ;
- On peut voir l'intensité I de la même manière que le débit d'eau dans le tuyau ;
- On peut voir la tension U , aussi appelée *différence de potentiel*, comme la différence de hauteur entre les deux bouts du tuyau, amenant la gravité à déplacer
- On peut voir la résistance comme un rétrécissement du tuyau.

2 Mesures de puissance et d'énergie électrique

Il existe différents moyens de mesurer la puissance électrique consommée par un appareil. Vous allez en utiliser 2 : wattmètre et PDU.

Les différents appareils que nous allons considérer dans ce TP consomment différents niveaux d'énergie : Raspberry Pi, ordinateur fixe, ordinateur portable avec batterie en charge, ordinateur portable avec batterie chargée (si possible, téléphone en charge, écran plat, lampe, vidéoprojecteur (si possible)).

Appareil	Puissance estimée	Puissance mesurée	Énergie calculée
Raspberry Pi			
Ordinateur fixe			
Ordinateur portable, batterie en charge			
Ordinateur portable, batterie chargée			
Téléphone en charge			
Lampe			
Écran plat			
Vidéoprojecteur (si dispo)			

Table 1 – Puissance électriques consommées par différents appareils (numériques et non numériques)

QUESTION 2 ► Sans rien mesurer, ordonnez la liste des appareils par ordre croissant de la puissance que vous pensez nécessaire pour les faire fonctionner puis remplissez la première colonne de la Table 1 avec la puissance que vous estimez nécessaire.

QUESTION 3 ► Maintenant, notez la puissance électrique consommée par les différents appareils à l'aide d'un wattmètre (remplissez la troisième colonne de la Table 1).

QUESTION 4 ► Calculez l'énergie nécessaire au fonctionnement de chaque appareil pendant 1 heure, en supposant que la puissance soit constante (remplissez la quatrième colonne de la Table 1).

QUESTION 5 ► Pour certains appareils, ce n'est pas un problème de calculer l'énergie consommée en supposant la puissance constante, mais pour beaucoup d'appareils numériques, c'en est un. Par exemple, l'énergie consommée par des serveurs varie en fonction de la charge. Pendant 1mn, notez, toutes les 10s, la puissance instantanée consommée par un écran puis mettez-le en veille, tout en continuant de noter la puissance toutes les 10s ; puis éteignez-le (continuez de noter la puissance toutes les 10s pendant 30s).

QUESTION 6 ► Vous avez maintenant une liste de puissances instantanées pendant un certain laps de temps. Complétez le script Python ci-dessous pour qu'il calcule, à partir de cette liste, l'énergie consommée pendant ce laps de temps.

```
#!/usr/bin/env python

dt = 1.0 # or your time interval

filepath = 'mesures.txt'

with open(filepath) as fp:
    line = fp.readline()
    cnt = 1
    sum = 0
    while line:
        value_as_str = line.strip()
        value = int(value_as_str)
        cnt += 1
        sum = sum + value
        line = fp.readline()

    print("Sum : {}".format(sum))
```

(a) Script calculant l'énergie totale à partir d'une liste de puissances instantanées. À compléter.

```
#!/usr/bin/env python

import matplotlib.pyplot as plt

dt = 1.0 # or your time interval
filepath = 'mesures.txt'

with open(filepath) as fp:
    line = fp.readline()
    all_measurements = []
    while line:
        line = line.strip()
        print(line)
        value = int(line)
        all_measurements.append(value)
        line = fp.readline()

plt.plot(all_measurements)
plt.ylabel('Power (Watts)')
plt.show()
```

(b) Script Python affichant la courbes des mesures contenues dans le fichier mesures.txt

Figure 2 – Bouts de code Python à réutiliser, compléter, corriger...

Cette manière de calculer (fréquence de *sampling* faible + approximation en temps) est bien sûr trop approximative pour mesurer précisément l'énergie consommée par certains équipements. On utilisera donc par la suite un autre appareil de mesure, mais avant cela, intéressons-nous aux émissions de GES générées par la consommation électrique.

3 Émissions de gazs à effets de serre

L'électricité est obtenue par transformation d'une source d'énergie primaire, typiquement combustion d'énergie fossile ou turbinage actionnée par le vent ou l'eau. Dans chaque pays, ces moyens de production d'électricité sont différents et ont des émissions de gazs à effet de serre très différents. En France, les émissions de CO2 moyens correspondant à chaque kWh produit sont trouvables sur rte.fr : <https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-co2>.

QUESTION 7 ► Remplissez la table ci-dessous (la deuxième colonne correspond aux mesures faites précédemment)

Appareil	Puissance observée	Éq. CO2 pour 1h de fonctionnement	Eq. CO2 pour une utilisation mensuelle typique (que vous estimerez)
Raspberry Pi			
Ordinateur fixe ;			
Ordinateur portable, batterie en charge			
Ordinateur portable, batterie chargée			
Téléphone en charge			
Lampe			
Vidéoprojecteur (si dispo)			

QUESTION 8 ► Calculez l'équivalent carbone des mêmes appareils pour l'Allemagne, la Pologne et la Suède en vous basant sur les chiffres trouvés là : <http://www.electricitymap.org>.

QUESTION 9 ► À combien de kilomètres parcourus en voiture correspond, en terme d'émission de CO2, le fonctionnement de tous les ordinateurs fixes de la salle pendant un mois ? Considérez qu'une voiture

émet environ 120g d'eq.CO2 par km, et prenez des hypothèses quant au nombre d'heures d'activité des machines.

4 Utilisation d'un PDU

Afin de pallier aux limitations du wattmètre dont nous disposons (fréquence de sampling trop faible, pas d'enregistrement possible), on va utiliser un *Power Distribution Unit*. Cette grosse multiprise permet d'observer la puissance instantanée consommée sur chacune de ses prises.

Le PDU doit être connecté à un serveur DHCP qui lui attribue une adresse IP. Une fois cela fait, on pourra interroger le PDU avec un navigateur web ou des requêtes snmp.

Vous disposez de 4 PDU dans la salle : un par îlot. Il faut qu'une adresse IP soit attribuée à chacun, dans le même sous-réseau que vos machines. Pour cela, on va faire simple : débranchez le câble ethernet d'une des machine et branchez sur le port Ethernet 10-100 du PDU puis branchez le PDU.

QUESTION 10 ► Le premier groupe de l'îlot qui arrive à cette question branche le PDU.

QUESTION 11 ► Assurez-vous que le PDU a bien une adresse IP attribuée : sur le PDU, appuyez sur 'Menu' -> 'Network' -> 'dhcp'. Notez son adresse IP (aussi dispo via /var/log/syslog du serveur DHCP).

4.1 Interroger le PDU

Pour avoir accès aux infos du pdu, vous pouvez vous connecter via un navigateur web à l'adresse du PDU (elle est accessible via le menu Network du PDU).

QUESTION 12 ► Allez visiter la page web offerte par le PDU. Branchez une machine sur une des prises et observez sa consommation via 'Status' -> 'Outlet'. Au besoin, rechargez la page web.

QUESTION 13 ► Pas très pratique de devoir passer par l'interface web. Lisez l'encart 2 puis interrogez, via un terminal, le PDU sur la consommation instantanée de la prise sur laquelle vous avez branché quelque chose. Assurez-vous que la réponse est cohérente avec ce que la page web affichait, et aussi avec ce que vous espériez trouver.

Encart 2 Interroger le PDU

Pour demander la puissance instantanée consommée par une prise, il faut demander au PDU via une requête SNMP ^a. Via ces requêtes, on peut demander la valeur de certaines variables à l'objet distant. Ces variables identifiées par une série de nombres séparées par des points (comme une adresse IP quoi), que l'on appelle OID (*Object Identifier*).

Voici quelques exemples d'OID :

- 1.3.6.1.4.1.318.1.1.12.3.3.1.1.2.\${PORT} Lecture de la position du port : 1 (sous tension) ou 2 (prise coupée)
- 1.3.6.1.4.1.318.1.1.12.3.3.1.1.4.\${PORT} Écriture de la position du port : 1 (sous tension) ou 2 (prise coupée)
- 1.3.6.1.4.1.318.1.1.26.9.4.3.1.6.\${PORT} Ampérage du port en 10xA
- 1.3.6.1.4.1.318.1.1.26.9.4.3.1.7.\${PORT} Puissance instantané du port en W
- 1.3.6.1.4.1.318.1.1.26.9.4.3.1.11.\${PORT} Consommation en 10xkW/h depuis le dernier reset (origine)

<PORT> désigne la numéro de la prise.

Le format d'une requête SNMP typique vous pouvez utilise est celui-ci :
`snmpget -v1 -c public <PDU_IP_ADDRESS> <OID>`

Donc pour connaître la puissance instantanée consommée sur la prise numéro 10, vous tapez dans un terminal :
`snmpget -v1 -c public 192.168.1.10 1.3.6.1.4.1.318.1.1.26.9.4.3.1.7.10`

^ahttps://en.wikipedia.org/wiki/Simple_Network_Management_Protocol

Pour interroger le PDU à intervalles régulier (par exemple, toutes les seconde), vous allez utiliser la commande `watch`. Par exemple, la commande

```
watch -n 1 snmpget -v1 -c public 192.168.1.10 1.3.6.1.4.1.318.1.1.26.9.4.3.1.7.<PORT>
```

effectue la requête snmp `snmpget -v1 -c public 192.168.1.10 1.3.6.1.4.1.318.1.1.26.9.4.3.1.7.<PORT>` toute le secondes. Utilisez `man watch` pour des détails.

QUESTION 14 ► Enregistrez pendant une minute la consommation de votre machine grâce à la commande `watch` ci-dessus, en redirigeant la sortie vers un fichier.

QUESTION 15 ► Utilisez votre script pour calculer l'énergie consommée pendant cette minute.

QUESTION 16 ► Calculer l'équivalent GES pour l'alimentation de votre machine pendant cette minute.

1 Annexe 1 : En savoir plus sur les PDU

Différentes sortes de PDU existent. On vous les décrit ci-dessous, en utilisant les termes anglais pour que vous puissiez, si nécessaire, rechercher facilement des infos sur ces équipements par la suite.

Basic PDU une grosse multiprise convertissant une alimentation à haut ampérage en plusieurs alimentations à bas ampérage.

Monitored PDU permet de contrôler, à distance ou via un écran situé sur le PDU, la puissance instantanée consommée par l'ensemble des appareils branchés ;

Switched PDU permet d'éteindre/allumer à distance chaque prise ;

Switched metered-by-outlet PDU permet en plus d'accéder à distance à la consommation de chacune des prises ;

2 Annexe 2 : En savoir plus sur les gaz à effets de serre

Le pouvoir de réchauffement global (PRG) d'un gaz se définit comme le "forçage radiatif" (c'est à dire la puissance radiative que le gaz à effet de serre renvoie vers le sol), cumulé sur une durée variable. Cette valeur dépend du spectre d'absorption du gaz et de son temps de vie dans l'atmosphère. Elle est mesurée en comparaison au CO₂. Ce pouvoir de réchauffement global est une représentation simplifiée de la réalité:

- la concentration des gaz dans l'atmosphère évolue et conditionne leur pouvoir de réchauffement ;
- les spectres d'absorption de deux gaz peuvent se recouvrir partiellement ainsi les pouvoirs de réchauffement de deux gaz sont interdépendants (parfois négligé dans les calculs) ;
- le temps de vie dans l'atmosphère peut varier suivant les conditions atmosphériques

Le GIEC1 a défini des équivalents d'émissions de CO₂ pour 5 groupes de gaz à effet de serre, méthane, NO_x, CFC, HFC, SF₆.

Les émissions de GES des systèmes énergétiques prennent place lors de la fabrication, du transport ou de l'utilisation. Prenons le cas particulier de la combustion. Lors de celle-ci, les GES à prendre en compte sont les produits de la combustion (CO₂, HC imbrûlés, N₂O ...). Mais pour une source de type biomasse, il ne faut pas tenir compte du CO₂ émis à la combustion qui est censé être absorbée par des puits de carbone.