



**ECOLE MAROCAINE DES
SCIENCES DE L'INGENIEUR**

Membre de 
HONORIS UNITED UNIVERSITIES

Calculs énergétiques pour les applications informatiques

Chapitre 3

Importance de l'efficacité énergétique

- **Impact économique** : Réduction des coûts.
- **Impact environnemental** : Diminution des émissions de CO₂.

Impact économique :

- Les systèmes informatiques, notamment les serveurs et data centers, consomment d'énormes quantités d'énergie, ce qui engendre des coûts élevés pour les entreprises.
- Exemple : En 2022, un data center moyen consomme environ 1 à 2 % de la production mondiale d'électricité.

Exemples concrets :

- Un data center peut coûter des millions de dollars par an en électricité.
- Optimiser l'efficacité énergétique peut réduire ces coûts de 20 à 40 %.

Impact environnemental :

- La consommation énergétique est directement liée aux émissions de CO₂, car la production d'électricité repose encore largement sur des énergies fossiles (charbon, gaz).

Exemples concrets :

- Environ 200 millions de tonnes de CO₂ sont émises chaque année par les data centers.
- L'optimisation énergétique permet de réduire ces émissions et contribue à des objectifs de développement durable.

Consommation d'un data center vs un ordinateur personnel.

Consommation d'un data center :

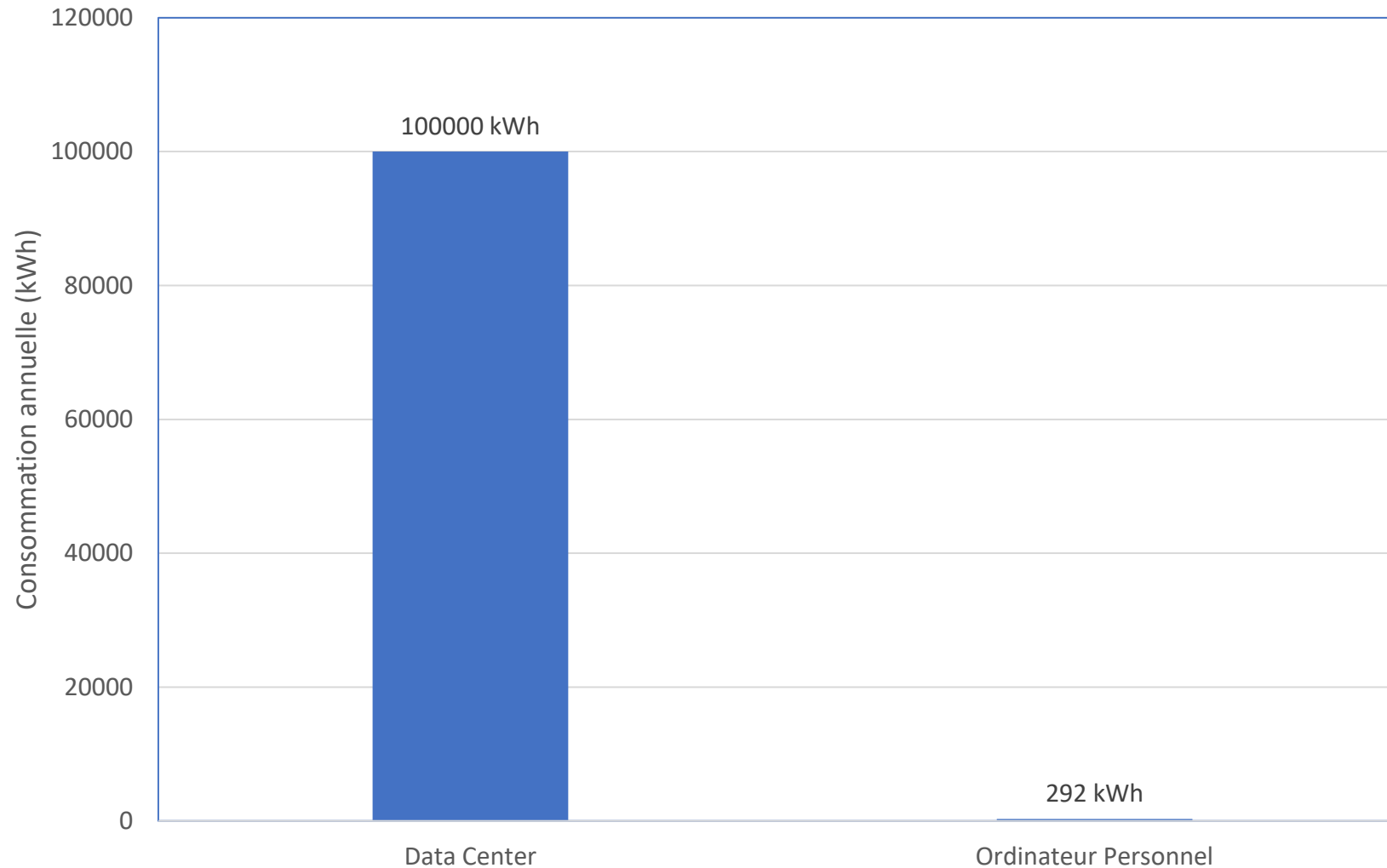
- Un data center typique consomme environ **100 MW** par an, ce qui équivaut à la consommation électrique d'une ville moyenne.
- Exemple : Le data center de Google à The Dalles (États-Unis) consomme environ **84 MW**, soit l'équivalent de 80 000 foyers.

Consommation d'un ordinateur personnel :

- Un ordinateur classique consomme environ **50 à 150 W**, soit environ **0,1 kWh** pour une heure d'utilisation.
- Si un ordinateur est utilisé 8 heures par jour, il consomme environ 292 kWh par an, ce qui représente une quantité négligeable par rapport à la consommation massive d'un data center.

Consommation d'un data center vs un ordinateur personnel.

Comparaison de Consommation annuelle



Sources de consommation énergétique dans les systèmes informatiques



1. CPU : Modèle de consommation et états de puissance (C-states)

- **États de puissance (C-states) :**
 - Les **C-states** sont des états d'inactivité du CPU conçus pour économiser l'énergie.
 - **Exemple :**
 - C0 : État actif (exécution d'instructions).
 - C1, C2, C3 : États de sommeil progressifs où certaines parties du CPU sont désactivées.
 - C6 : État de sommeil profond où la consommation est minimale.

Sources de consommation énergétique dans les systèmes informatiques



2. GPU : Architecture et consommation spécifique

- Les GPU sont conçus pour des tâches hautement parallèles, comme le rendu graphique ou l'apprentissage automatique.
- **Consommation énergétique influencée par :**
 - **Charge de travail :** Plus la tâche est complexe (ex. : rendu 3D, calculs massifs), plus la consommation est élevée.
 - **Fréquence d'horloge et tension :** Similaires au CPU, elles augmentent la puissance.
 - **Mémoire dédiée :** Les GPU disposent souvent de mémoire vive dédiée (GDDR6), qui consomme aussi de l'énergie.
- **Exemple pratique :**
 - Une carte graphique haut de gamme (NVIDIA RTX 3090) peut consommer jusqu'à 350 W lorsqu'elle est pleinement sollicitée, contre 10 W en mode veille.

Sources de consommation énergétique dans les systèmes informatiques



3. Stockage : SSD vs HDD, consommation en lecture/écriture

- **HDD (Disque dur classique) :**
 - Consomme de l'énergie pour faire tourner les disques mécaniques et déplacer les têtes de lecture/écriture.
 - Consommation typique : 6 à 10 W en activité, 1 à 3 W en veille.
- **SSD (Solid State Drive) :**
 - Pas de parties mobiles, donc une consommation énergétique plus faible.
 - Consommation typique : 2 à 4 W en activité, moins de 1 W en veille.
- **Exemple pratique :**
 - Un serveur utilisant uniquement des SSD peut économiser des centaines de kilowattheures par an par rapport à un serveur basé sur des HDD.

Méthodes de mesure de l'empreinte énergétique

1. PowerAPI : Mesure logicielle de la consommation énergétique

- **Définition :**
 - Une bibliothèque logicielle permettant de mesurer en temps réel la consommation énergétique des logiciels.
- **Cas d'utilisation :**
 - Profilage d'applications pour identifier les sections les plus énergivores du code.
 - Comparaison de l'efficacité énergétique entre différentes implémentations d'un même algorithme.

Méthodes de mesure de l'empreinte énergétique

2. CodeCarbon : Suivi de l'impact carbone pendant le développement logiciel

- **Définition :**
 - Une bibliothèque Python qui suit la consommation énergétique et calcule l'impact carbone d'un programme pendant son exécution.
- **Principe de fonctionnement :**
 - Intégration directe dans le code (une ligne suffit pour commencer).
 - Mesure la consommation énergétique en temps réel et fournit un rapport sur les émissions de CO₂.
- **Cas d'utilisation :**
 - Comparaison de l'impact énergétique de différents modèles d'IA.

Atelier : Exploration des sources de consommation énergétique



- **Objectif :** Analyser et détailler une source de consommation énergétique dans les systèmes informatiques.
- **Instructions :**
 - Chaque groupe choisit une source
 - Expliquer comment cette source consomme de l'énergie et identifier ses facteurs d'influence.

Comprendre les Ordres de Grandeur

Énergie :

- $1 \text{ kWh} = 3,600,000 \text{ J}$
- $1 \text{ Wh} = 3,600 \text{ J}$

Puissance :

- $1 \text{ kW} = 1,000 \text{ W}$
- $1 \text{ mW} = 0.001 \text{ W}$

La Loi de Joule en Informatique

$$Q = I^2 \times R \times t$$

Loi fondamentale de la dissipation thermique

Variables :

- Q : Chaleur (Joules)
- I : Courant (Ampères)
- R : Résistance (Ohms)
- t : Temps (secondes)

Ordres de Grandeur

- CPU : 0.5-2A
- GPU : 1-3A
- R \approx 1-10 Ω

Exemple Concret : Processeur en Charge

$$I = 1.5A, R = 2\Omega, t = 1h$$

$$Q = (1.5A)^2 \times 2\Omega \times 3600s = 16200J$$

Cette chaleur nécessite un système de refroidissement!

Équation Fondamentale de l'Énergie



$$E = P \times t$$

Relation énergie-puissance-temps

Unités Courantes

- E : Joules (J) ou Wh
- P : Watts (W)
- t : secondes ou heures

Exemple (Calcul Détaillé)

Scénario : Processeur à 65W pendant 2h

En Joules :

$$\begin{aligned} E &= 65 \text{ W} \times 2 \text{ h} \times 3600 \text{ s/h} \\ &= 468000 \text{ J} \end{aligned}$$

En Watt-heures :

$$\begin{aligned} E &= 65 \text{ W} \times 2 \text{ h} \\ &= 130 \text{ Wh} \end{aligned}$$

Équation de l'Empreinte Carbone



$$\text{Empreinte CO}_2 = \text{Consommation énergétique} \times \text{Facteur d'émission}$$

Unités Courantes

- Empreinte CO₂ : (kg CO₂)
- Consommation énergétique : (kWh)
- Facteur d'émission : (kg CO₂ / kWh)

Exemple

Si un serveur consomme 2000 kWh par an et que le facteur d'émission de l'électricité est de 0,5 kg CO₂ par kWh, l'empreinte carbone du serveur sera :

$$2000\text{kWh} \times 0,5\text{kg CO}_2/\text{kWh} = 1000\text{kg CO}_2$$

Facteur d'émission : Dépend de la source d'énergie (charbon, gaz, renouvelable, etc.).

Modèle de consommation CPU :

$$P = C \times V^2 \times f$$

Unités Courantes

- P est la puissance consommée par le CPU (en watts).
- C est la capacitance du transistor du processeur (en farads).
- V est la tension appliquée au processeur (en volts).
- f est la fréquence de fonctionnement du processeur (en hertz).

Exemple (Calcul Détaillé)

Si un processeur fonctionne à une tension de 1,2 V, une fréquence de 2 GHz (2×10^9 Hz), et une capacitance de 10 nF (10×10^{-9} F), la consommation énergétique sera calculée comme suit :

$$P = 10 \times 10^{-9} \times (1,2)^2 \times 2 \times 10^9$$

$$P = 10 \times 10^{-9} \times 1.44 \times 2 \times 10^9$$

$$P = 28.8 \text{ W}$$

Donc, la puissance consommée par le CPU dans cet exemple serait de 28.8 watts.

Efficacité énergétique d'un data center (PUE) :

$$PUE = \frac{\text{Energie totale}}{\text{Energie des equipement IT}}$$

- **PUE** (Power Usage Effectiveness) mesure l'efficacité énergétique d'un centre de données.
 - **Énergie totale** : l'énergie totale consommée par l'ensemble du data center, incluant non seulement les serveurs, mais aussi le refroidissement, l'éclairage, et d'autres équipements auxiliaires.
 - **Énergie des équipements IT** : l'énergie consommée uniquement par les serveurs et autres équipements informatiques (ordinateurs, équipements de stockage, etc.).
-
- Un **PUE** de 1,0 indique une efficacité parfaite, où toute l'énergie consommée est utilisée exclusivement pour les équipements informatiques, et aucune énergie n'est utilisée pour les besoins de refroidissement, d'éclairage ou autres systèmes.

Exemple (Calcul Détaillé)

- Si un data center consomme au total 500 kWh d'énergie et que l'énergie consommée par les équipements IT est de 400 kWh, le PUE sera :

$$PUE = \frac{500 \text{ kWh}}{400 \text{ kWh}} = 1,25$$

Efficacité carbone d'un data center (PUE) :

$$CUE = \frac{\text{Émissions de CO}_2 \text{ totales}}{\text{Energie des équipement IT}}$$

CUE (proche de 0) signifie que le centre de données est plus efficace

- **CUE** (Carbon Usage Effectiveness) est une mesure utilisée pour évaluer l'efficacité des centres de données en termes de leur empreinte carbone.
 - **Émissions totales de CO₂** : Mesure des émissions de carbone générées par l'énergie utilisée (par exemple, si l'électricité provient du charbon, les émissions seront élevées).
 - **Énergie des équipements IT** : l'énergie consommée uniquement par les serveurs et autres équipements informatiques (ordinateurs, équipements de stockage, etc.).
-
- Un centre de données utilise 10 000 kWh pour ses équipements informatiques. L'électricité qu'il utilise génère 0,5 kg de CO₂ par kWh.

Exemple (Calcul Détaillé)

Emissions totales de CO₂ = 10000 kWh × 0,5 kg CO₂/kWh = 5000 kg de CO₂

$$CUE = \frac{5000 \text{ kg CO}_2}{10000 \text{ kWh}} = 0,5$$

Efficacité énergétique d'un data center (PUE) :

$$\text{FLOPS} = \text{cœurs} \times \text{fréquence} \times \frac{\text{FLOP}}{\text{cycle}}$$

Unité	Signification	Nombre d'opérations
1 FLOP	1 opération par seconde	1
1 GFLOP (Gigaflop)	1 milliard d'opérations par seconde	10^9
1 TFLOP (Teraflop)	1 trillion d'opérations par seconde	10^{12}
1 PFLOP (Petaflop)	1 quadrillion d'opérations par seconde	10^{15}
1 EFLOP (Exaflop)	1 quintillion d'opérations par seconde	10^{18}

Efficacité énergétique d'un data center (PUE) :

$$\text{FLOPS} = \text{cœurs} \times \text{fréquence} \times \frac{\text{FLOP}}{\text{cycle}}$$

- **Cœurs** : Cela correspond au nombre de cœurs dans le processeur.
- **Fréquence (en Hz)** : C'est la vitesse d'horloge du processeur, mesurée en hertz (Hz).
- **FLOP / Cycle** : Cette valeur correspond au nombre d'opérations en virgule flottante (FLOP) qu'un cœur peut effectuer en un seul cycle d'horloge.

Exemple (Calcul Détaillé)

- Calcul des FLOPS pour un processeur Intel Core i7-9700K
- Caractéristiques :
 1. **Nombre de cœurs** : 8
 2. **Fréquence** : 3,6 GHz
 3. **FLOP par cycle** : 16

$$\begin{aligned}\text{FLOPS} &= 8 \times 3,6 \times 10^9 \times 16 \\ \text{FLOPS} &= 460,8 \times 10^9 = 460,8 \text{ GFLOPS}\end{aligned}$$

Atelier : Discussion sur l'Empreinte Énergétique des Logiciels



- **Objectif** : Permettre aux étudiants de comprendre et d'échanger sur les outils et méthodes de mesure de l'empreinte énergétique des logiciels.
- **Instructions** :
 - **Recherche** : Chaque groupe choisit un outil de mesure énergétique parmi ceux présentés (par exemple, CodeCarbon, PowerAPI).
 - **Analyse** : Discutez des fonctionnalités principales de l'outil, ses avantages et ses limites.
 - **Étude de cas** : Imaginez un scénario d'utilisation concret de l'outil (par exemple, mesurer l'impact énergétique d'un algorithme d'apprentissage automatique, d'une API web, ou d'un système embarqué).