Consommation électrique d'un data center

Candidat n° 21802

Ancrage au thème et motivation

- Plus de la moitié des *data center* français sont en zone urbaine
- 3 % de la consommation mondiale d'électricité
- Objectif : réduire leur consommation

Plan

1. Modélisation d'un data center
2. Grandeurs caractéristiques
3. Puissance consommée
4. Simulation d'un data center
5. Répartition optimale avec l'algorithme du gradient

Modélisation d'un data center

Modèles non retenus

- Ordinateur de bureau
  - Dangereux (230 V)
  - Grande inertie thermique
- Circuit équivalent
  - Grandeurs fonction de la température

Modélisation d'un data center

Dispositif retenu : Raspberry Pi

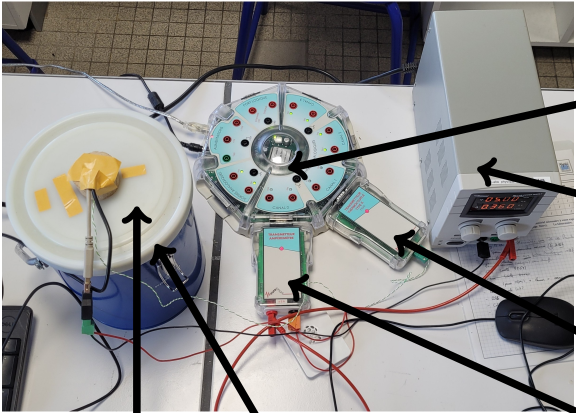
- Peu dangereux
- Réponse rapide aux perturbations

Grandeurs caractéristiques

- Masse volumique moyenne
- Capacité thermique massique moyenne
- Conductivité thermique moyenne

Grandeurs caractéristiques
Masse volumique

Dimensions $85{,}60\,\mathrm{mm} \times 53{,}98\,\mathrm{mm} \times 17{,}00\,\mathrm{mm}$
Masse $90{,}9\,\mathrm{g}$
Masse volumique moyenne $1{,}16 \times 10^3\,\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3}$



Carte Sysam

Alimentation

Thermocouple

Calorimètre

Raspberry Pi (dans le calorimètre)

Ampèremètre

Grandeurs caractéristiques

Capacité thermique

Protocole

1. Avant calculs (18,98 °C) intensité moyenne de 288 mA
2. Lancement des calculs à 1 min
3. Fin des calculs à 381,6 s. Pendant les calculs, on a
   - tension 5 V
   - intensité moyenne 381 mA
   - travail électrique 612 J
4. Thermalisation : sur les 100 dernières secondes, 20,63 °C

(1er principe) $\Delta U = W = C\Delta T$

Résultats

- Capacité thermique $C = 204\,\mathrm{J/K}$
- Capacité thermique massique $c = 4{,}5\,\mathrm{kJ}\cdot\mathrm{K}^{-1}\cdot\mathrm{kg}^{-1}$

Commentaires

- valeur élevée (ex. Silicium)
- pertes thermiques (10 min)

Grandeurs caractéristiques

Masse en eau du calorimètre (sans Raspberry Pi)

1. Le laboratoire est initialement à 20 °C
2. On met dans le calorimètre 200 g d'eau chaude à 52 °C
3. On mesure après thermalisation la température de l'eau : 47 °C

(1er principe) $\Delta U = C \Delta T$

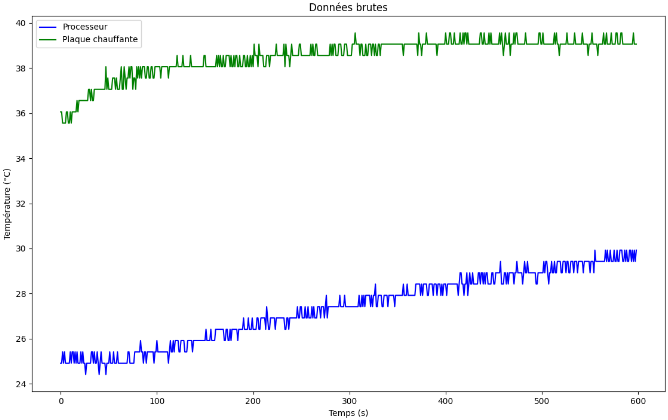
- Masse en eau 37 g
- Capacité thermique $1{,}7 \times 10^2$ J/K

Protocole

1. Plaque chauffante
2. Mesure de la température aux deux extrémités
3. Diffusion thermique : lien entre les températures et la conductivité

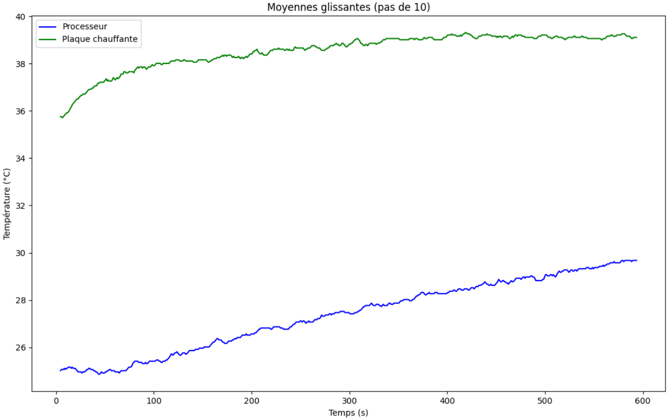
Grandeurs caractéristiques

Conductivité moyenne



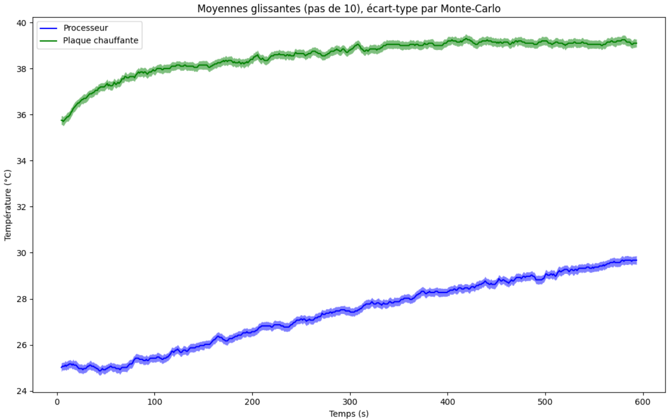
Grandeurs caractéristiques

Conductivité moyenne



Grandeurs caractéristiques

Conductivité moyenne

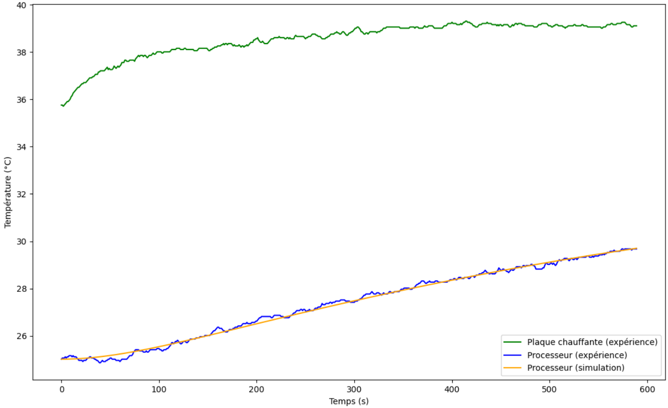


$$\sigma_{\text{moyen}} = 0{,}09\,^{\circ}\mathrm{C}$$

Grandeurs caractéristiques

Conductivité moyenne

$$D = \frac{\lambda}{\rho c} = 8{,}25 \times 10^{-8}\,\mathrm{m^2/s} \qquad \lambda = 2{,}13 \times 10^{-4}\,\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$$



Puissance consommée

1. Définition de la quantité de calcul
2. Mesure de la consommation du Raspberry Pi
3. Régression linéaire

Puissance consommée

Définition de la quantité de calcul

- Défini à une constante près (au repos, $K = 0$)
- Unité standard : *floating-point operation*
- Un calcul est une opération sur des flottants

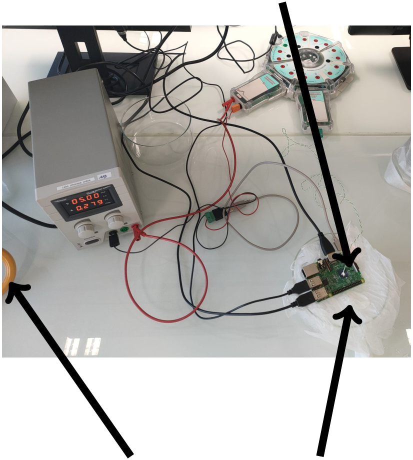
```
def calculs(n):
    for _ in range(n):
        a, b =60986.5150141834, 2831540.2372984355
        c = a ** (-b)
```

Puissance consommée

Dispositif expérimental

1. On modifie la température au processeur (glace, lampe de chantier)
2. On impose la quantité de calculs
3. On mesure l'intensité moyenne consommée

Raspberry Pi

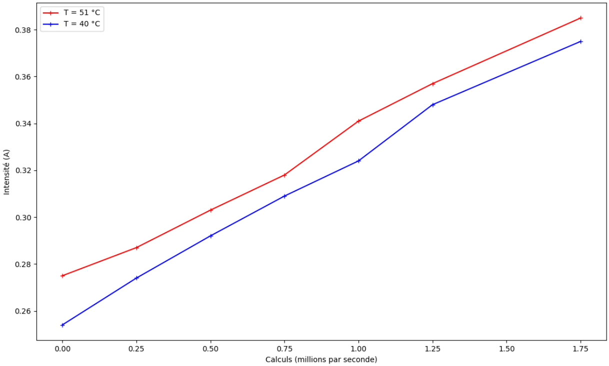


Lampe de chantier

Glace

Puissance consommée

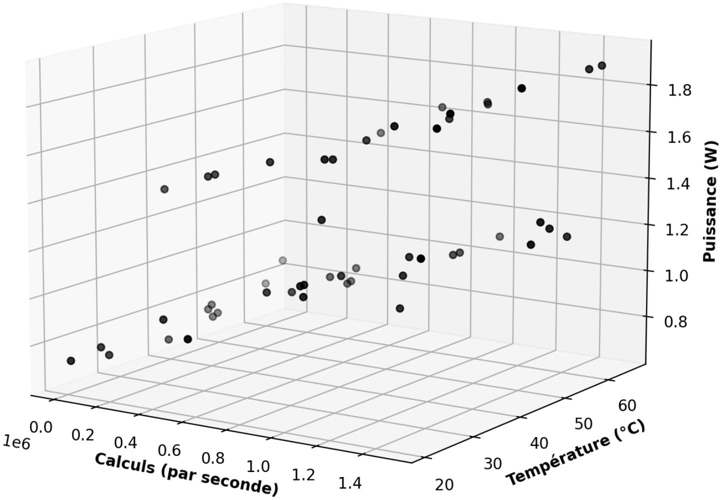
Résultats expérimentaux



Écart relatif : 4 %

Puissance consommée

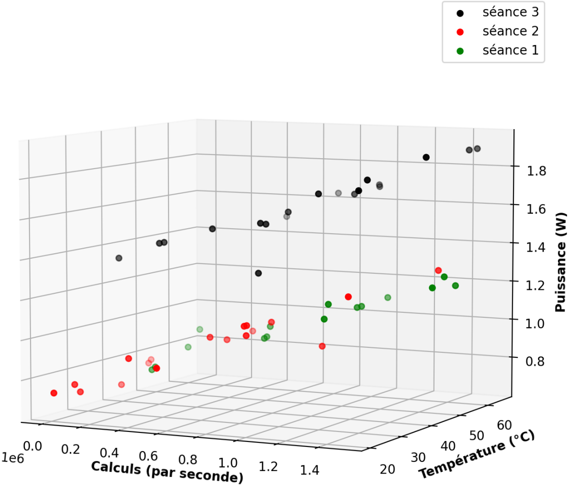
Résultats expérimentaux



Problème : on a « deux plans »

Puissance consommée

Résultats expérimentaux



Sans doute une erreur systématique (par exemple : placement du thermomètre, calculs au repos différents)

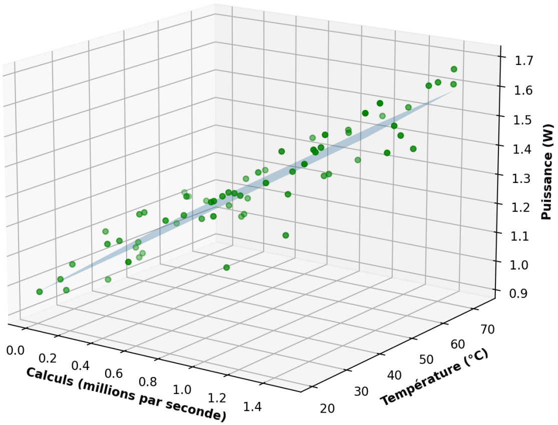
Puissance consommée

Régression linéaire

- Allure de plan
$$P = a \times T + b \times K + c$$
- Régression linéaire avec `np.linalg.lstsq`
  - $a = 1{,}8 \times 10^{-3}\,\mathrm{W/K}$
  - $b = 3{,}6 \times 10^{-7}\,\mathrm{W}$/calcul par seconde
  - $c = 0{,}94\,\mathrm{W}$

Puissance consommée

Régression linéaire



Écart relatif : 3 %

Simulation d'un data center

Hypothèses

- Carcasse de l'ordinateur : pavé uniforme
- Source thermique : pavé centré sur la carcasse
  - Puissance volumique uniforme
- Air ambiant
  - Pas de convection (seulement la diffusion)
  - Conductivité dépendant de la température
  - Masse volumique dépendant de la température
- Salle isolée

Simulation d'un data center

Principe de l'aglorithme

- Temps et espace (1D) discrétisés
- Température : tableau `numpy` `T[x, t]`
- Équation aux dérivées partielles

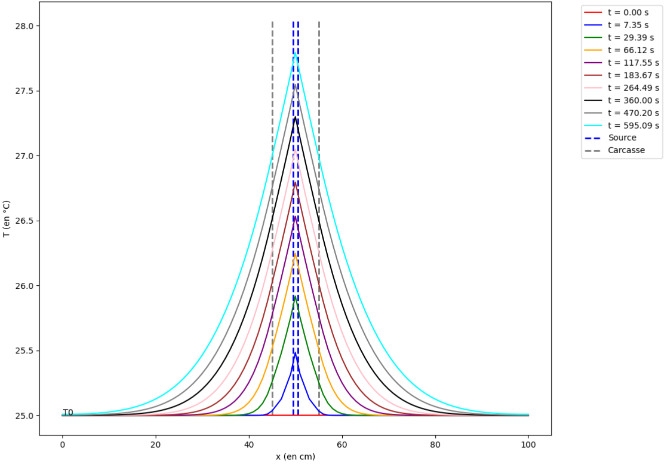
$$\frac{\partial T}{\partial t} = D(x)\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + P_c(x) \quad \text{où} \quad P_c(x) = \frac{P_v}{\rho c}$$

- Traduction informatique

```
T[xi, ti+1] =T[xi, ti] +(t_e /(x_e**2)) *D(xi)
    (T[xi+1, ti] -T[xi, ti] +T[xi-1, ti])
    + P_c(xi) *t_e
```

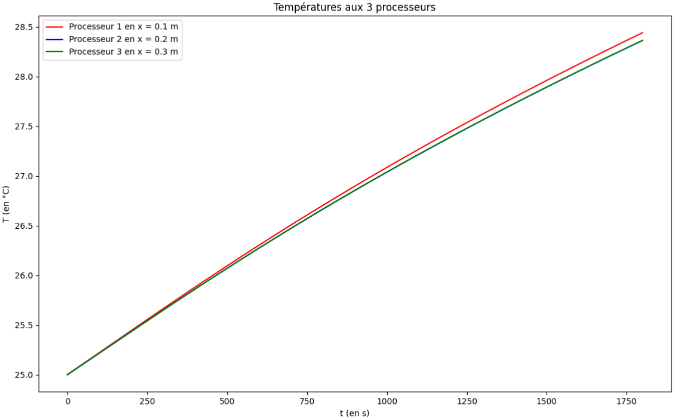
Simulation d'un data center

Ordinateur seul et puissance constante



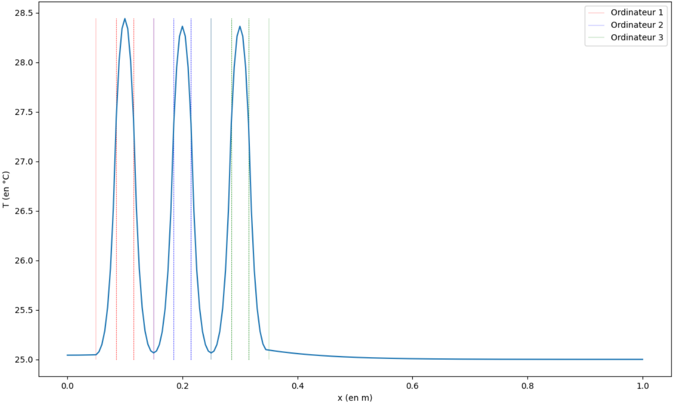
Simulation d'un data center

Ordinateurs multiples et dépendances



Simulation d'un data center

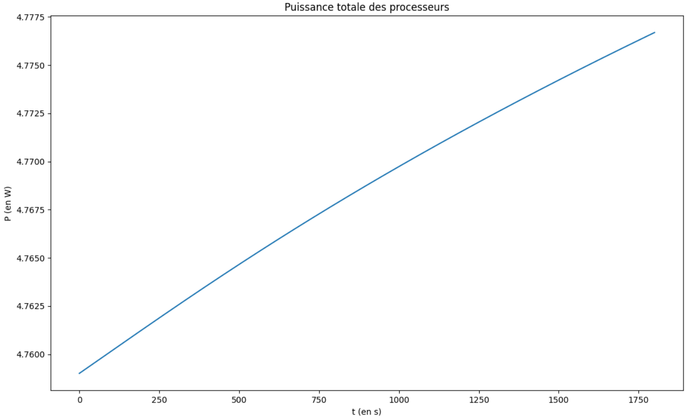
Ordinateurs multiples et dépendances



Après 1 h de calculs

Simulation d'un data center

Ordinateurs multiples et dépendances



Énergie consommée en 1 h : 16 kJ

Pour trouver un minimum d'une fonction f :

- Calcul du gradient au point M, $\nabla f(M)$
- Test d'arrêt : fin si $||\nabla f(M)|| < \varepsilon$
- Nouveau point $M \leftarrow M - \alpha \times \nabla f(M)$

Coordonnées réduites : $\frac{x_i}{L}$ et $\frac{K_i}{K}$ pour avoir $f : [0,1]^{2n} \rightarrow \mathbb{R}$

Répartition optimale

Résultats qualitatifs

- Calculs très longs (15 min pour 4 ordinateurs à 1D)
- Répartition spatiale régulière, en donnant plus de calculs aux ordinateurs les plus au centre