

L'imagerie médicale : un calcul structuré

Jean Feydy, Imperial College London

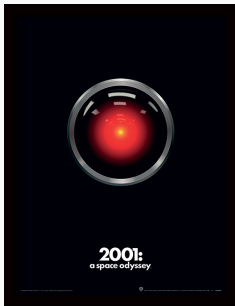
3ème colloque sur l'imagerie médicale à l'heure de l'IA,
Institut du Cerveau, Paris – le 14 octobre 2020.

Jean Feydy :

- **Recherche** en maths à Paris, informatique à Londres, Anatomie computationnelle, deep learning géométrique.
- **Enseignement** au M2 MVA et à l'ENS, Fondements mathématiques des sciences des données.
- Famille de **docteurs**, entre médecine générale et radiologie.

IA en médecine : grand décalage entre ce que l'on **sait**,
ce que l'on **espère**,
ce que l'on **crain**t.

L'intelligence artificielle : un concept très connoté



L'IA séduit, intrigue, protège ou menace... **Mais n'explique rien !**

Entre eux les chercheurs parlent toujours de **modèles** dont ils discutent les **hypothèses** et étudient les **propriétés**.

Profitons de cette journée d'échange pour lever le voile.

L'intelligence artificielle ?

Un bon **modèle** appliqué sur de bonnes **données**.

Quels modèles pour l'**imagerie médicale** ?

Au moins trois grands niveaux de description,
trois grandes manières de **calculer avec des images**
aux forces et faiblesses complémentaires.

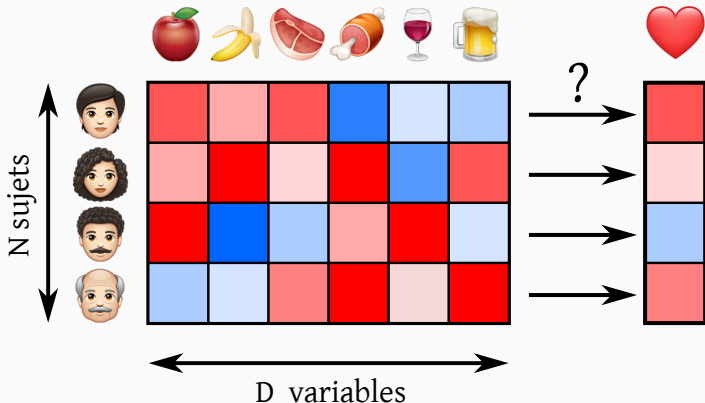
Quels développements pour les **années à venir** ?

Un rôle clé est tenu par les **puces électroniques**,
taillées sur mesure pour certains types de calculs.

En tant que médecin, comment **comprendre**
et **devenir acteur** de cette évolution ?

IA = données + modèle

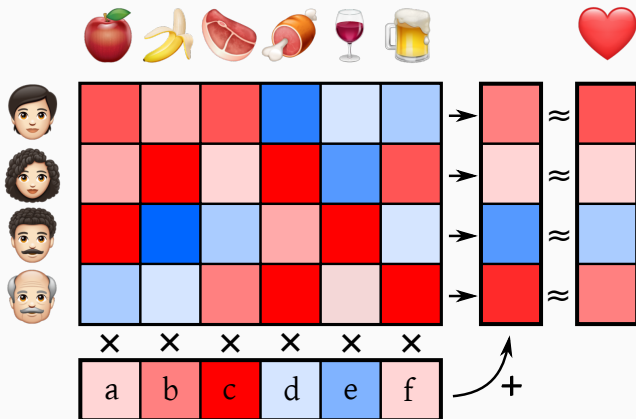
Qu'est-ce qu'un jeu de données?



Apprentissage supervisé = Régression.

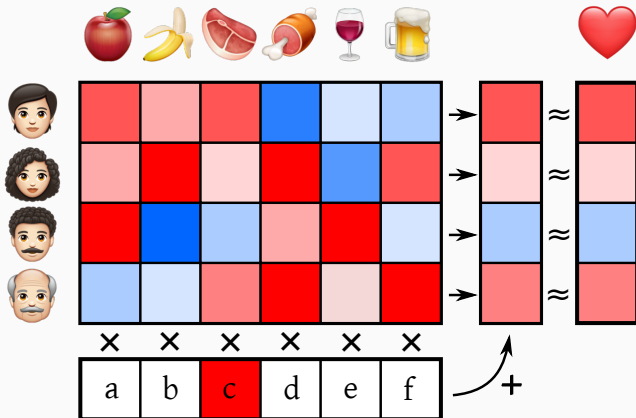
On cherche une formule $F(x_1, \dots, x_D)$ des D variables qui approche au mieux la quantité d'intérêt (♥).

Un modèle simple : la régression linéaire



On choisit les poids a, b, \dots selon la méthode des moindres carrés.
Premières applications en astronomie, avec plusieurs **centaines**
d'observations sur une **poignée de variables**.

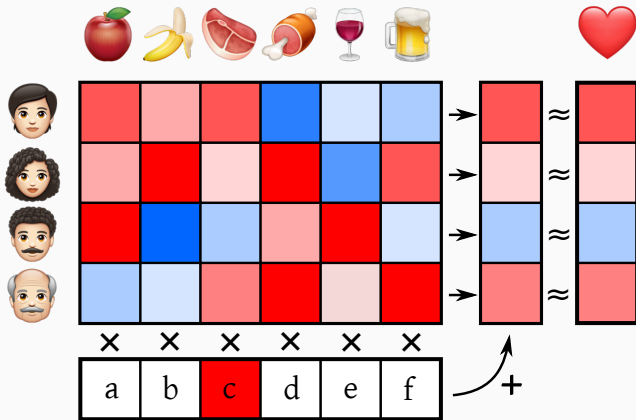
Problème : la médecine n'est pas l'astronomie



Avec **beaucoup d'information** sur peu de patients, on “découvre” vite des corrélations extravagantes.

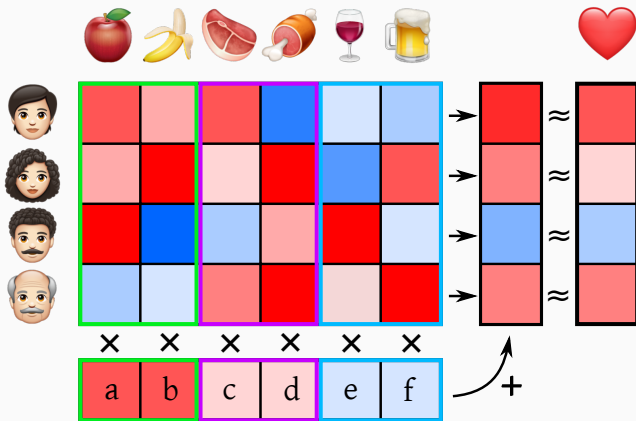
On parle d'**overfitting**.

Il faut régulariser la prise de décision



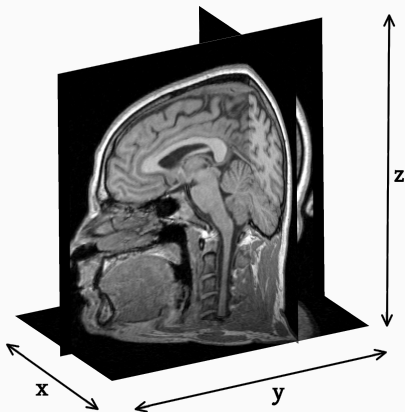
Un modèle **parcimonieux** n'utilisera que 5 ou 10 colonnes à la fois.
Utile pour l'analyse de **données tabulaires** (XGBoost, etc.)
ou l'**identification de sources** (Lasso, Elastic-Net, etc.).

Il faut régulariser la prise de décision



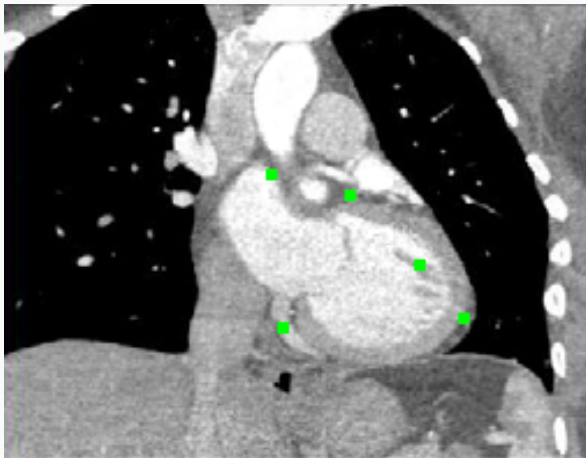
Un modèle **structuré** pourra utiliser la **géométrie des données**.
On pense au regroupement des aliments en **grandes familles**,
à la **classification hiérarchique ATC** des médicaments, etc.

En imagerie médicale, la régularisation est incontournable



Chaque pixel est une colonne de notre tableau !
On observe donc plusieurs **millions de variables**
sur quelques **milliers de patients**.

Comment agréger l'information donnée par un scanner ?

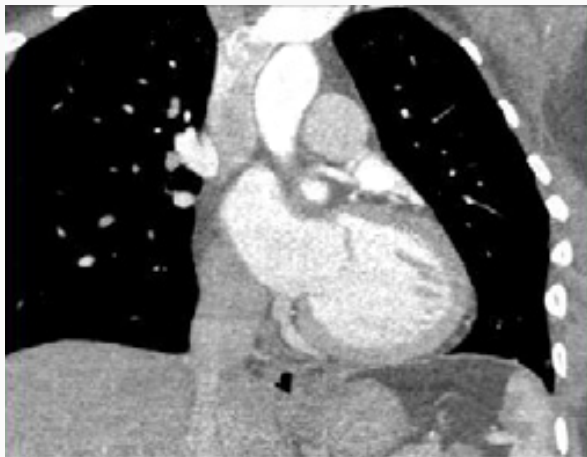


Une bonne lecture ne dépend pas de seulement 5 ou 10 pixels.

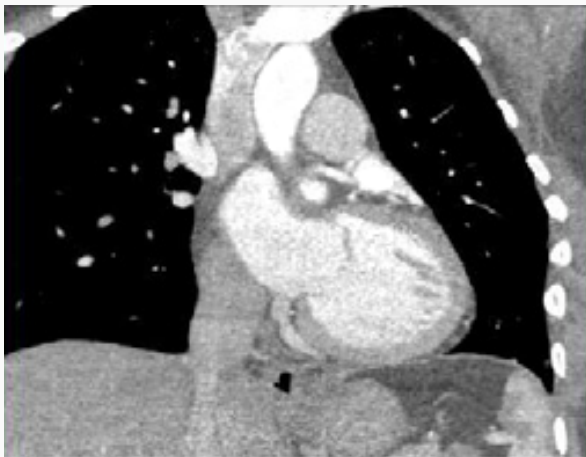
Il faut donc apprendre à **regrouper les pixels** de manière pertinente.

Que lit-on sur une radio?

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]



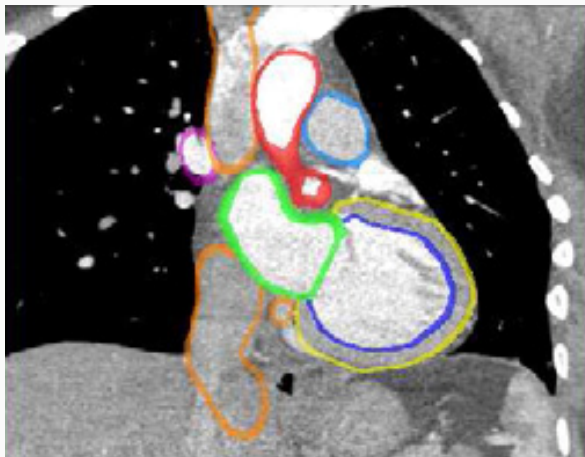
1. Pixels



Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

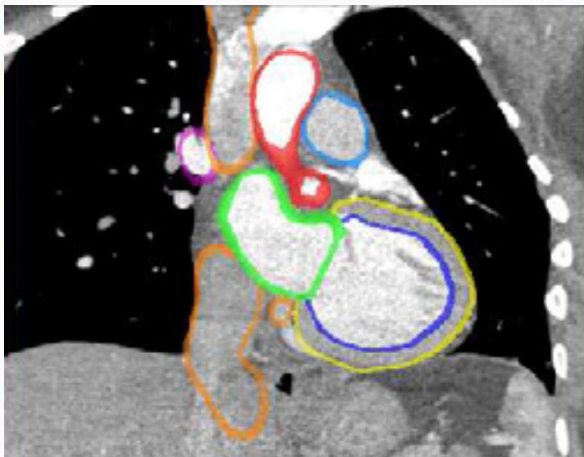
2. Anatomie



Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

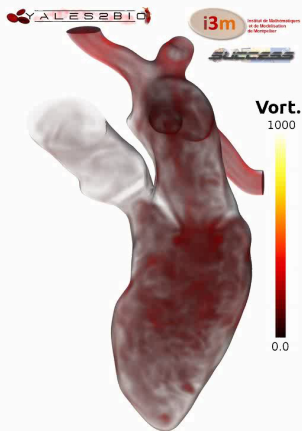


Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



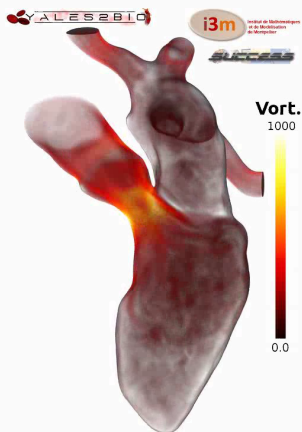
Time: 0 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



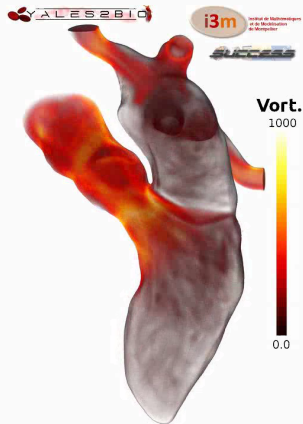
Time: 100 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



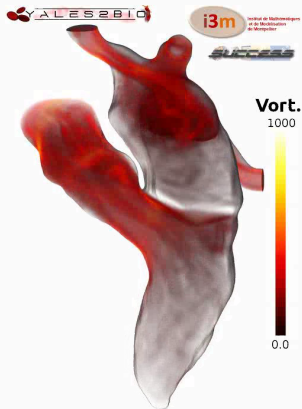
Time: 200 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



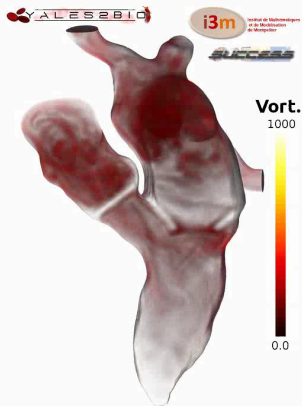
Time: 300 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



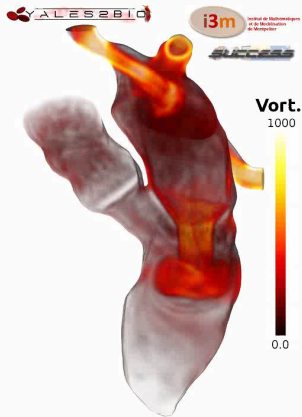
Time: 400 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



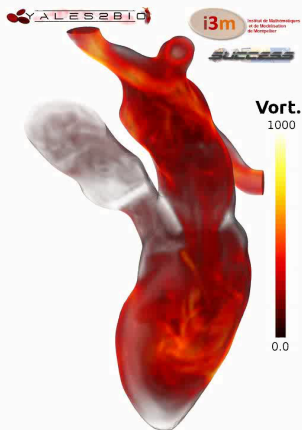
Time: 500 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



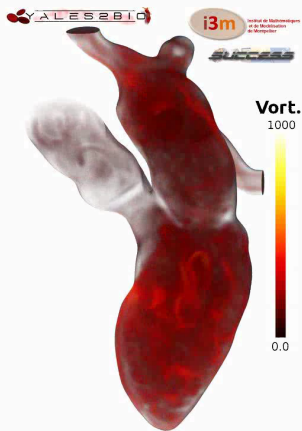
Time: 600 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



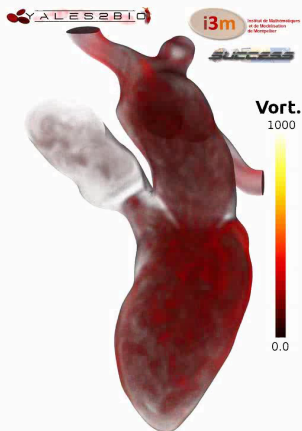
Time: 700 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



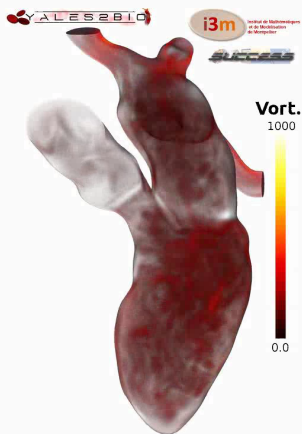
Time: 800 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



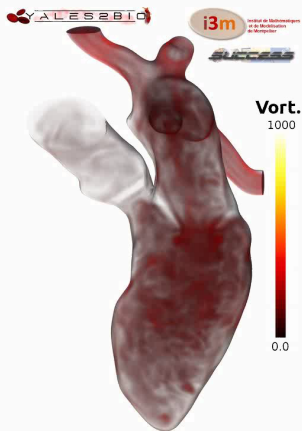
Time: 900 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



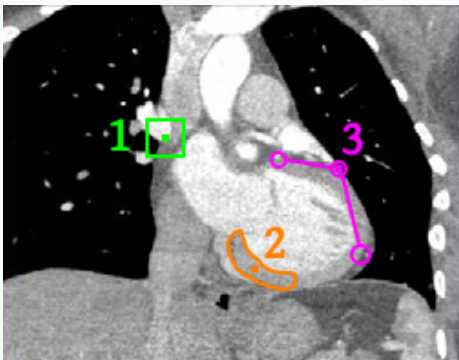
Time: 0 ms

Une image : trois niveaux d'analyse [EPW11, Man11]

1. Pixels

2. Anatomie

3. Fonction



En simplifiant beaucoup, chaque niveau de description correspond à une manière de **regrouper les pixels**.

1er niveau : grille de pixels

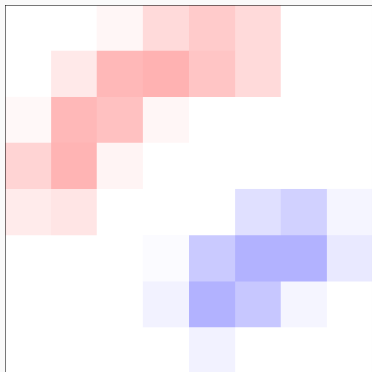


Tableau $N_x \times N_y \times N_z$ de pixels.

Images et volumes **bitmap** :

- .bmp, .png, .jpg
- Standard en **radiologie**.

- + Structure mémoire ordonnée.
- + Voisinages explicites.
- + **Convolutions** rapides.
- Analyse de **texture**.
- **Segmentation** des tissus.
- **Détection** de motifs.

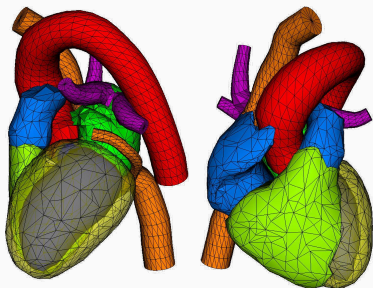
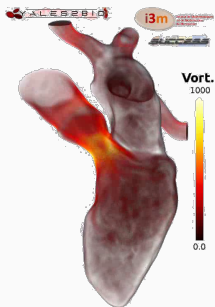


Tableau $N_{\text{points}} \times 3$ de coordonnées (x, y, z) .

Nuages de points (\pm triangles) :

- .svg
 - Standard pour le **jeu vidéo**.
- + Représentation compacte.
+ Géométrie de haute précision.
+ **Facile à déformer**.
- **Visualisation 3D**.
→ **Atlas anatomiques**.
→ Analyse des **formes**.



Mesh volumique,
graphe d'interactions.

Modèle physique, biologique :

- Éléments finis, réseaux.
 - Standard pour la CAD.
- + **Connaissance** a priori.
- + **Robuste** au bruit.
- + Comportement **réaliste**.
- Interprétation **physiologique**.
- **Inférer** ce qui est invisible.
- **Simuler** une intervention.

En imagerie médicale, on doit combiner une méthode de **régression statistique** avec un **modèle pertinent**.

On peut travailler avec :

1. Une **grille de pixels** 2D ou 3D.
2. Un **tableau de coordonnées** (x, y, z) .
3. Un **réseau d'interactions** complexes.
4. Les trois à la fois !

Dans tous les cas, il s'agit de définir une grosse **formule structurée** :

$$\text{image} \xrightarrow{F} F(\text{image}) \simeq \text{diagnostic}$$

On parle d'**architecture** de calcul paramétrique
 \simeq **modèle** à fitter \simeq **réseau** à entraîner.

Quelle mise en pratique ?

Un point sur les grandeurs mises en jeu

Un scan 3D est composé de 10^6 à 10^8 pixels.

Prendre une décision complexe sur ce volume de données requiert donc environ $1000 \cdot 10^7 = 10^{10}$ **opérations** arithmétiques.

Jusqu'en 2010, la vitesse des cœurs de calcul **augmentait** chaque année...

Mais elle **plafonne** aujourd'hui aux alentours de 10^9 opérations à la **seconde**.
C'est trop **lent**.

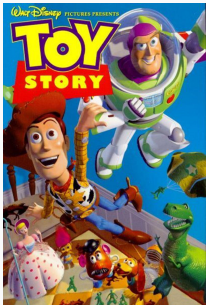
Heureusement, le **coût unitaire** d'un processeur a par contre grandement **diminué**.

Aujourd'hui, l'achat d'une **carte graphique** permet de se procurer “**1,000 processeurs pour 1,000€**”.

Quelle aubaine !

Avec $1,000 \cdot 10^9 = 10^{12}$ opérations à la seconde, ces puces fournissent enfin de la **puissance de calcul** nécessaire à l'optimisation de modèles complexes.

Les cartes graphiques ont révolutionné la 3D



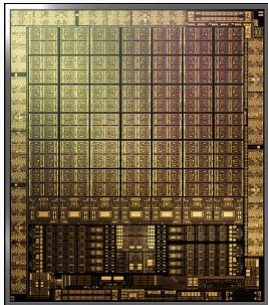
1995



Aujourd'hui

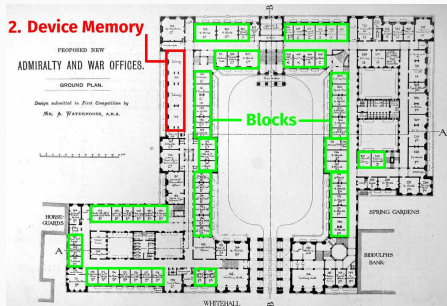
Jeux vidéos : des millions de **triangles texturés**, traités en temps réel.

Sous le capot : une organisation au nanomètre



4,000 cœurs
dans un GPU récent.

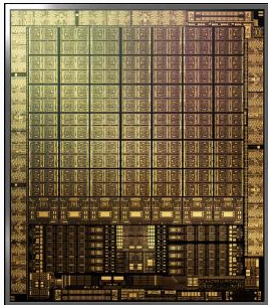
12



4,000 employés
au ministère de la Marine.

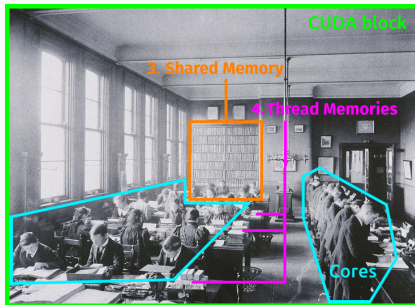
Un grand défi : réduire les **embouteillages** en mémoire.

Sous le capot : une organisation au nanomètre



4,000 cœurs
dans un GPU récent.

12



4,000 employés
au ministère de la Marine.

Un grand défi : réduire les **embouteillages** en mémoire.

Un écosystème de développement complet

Le fabricant de puces Nvidia soutient la recherche avec :

- D'excellentes **cartes graphiques** – les GPUs.
- Une collection de **drivers** pour le langage de programmation C++ qui gèrent les problèmes de **trafic mémoire** :
l'environnement **CUDA**, les bibliothèques **cuBLAS**, **cuDNN**, etc.

Ces outils restent très techniques et sont **difficiles d'accès**.

Heureusement, des logiciels “Python” de **haut niveau** sont maintenant disponibles pour permettre aux chercheurs de se **concentrer sur leurs modèles**.

Un écosystème de développement complet

Graphisme : Imprimante + Driver + **Photoshop** \implies Dessins

Un écosystème de développement complet

Graphisme : Imprimante + Driver + **Photoshop** \implies Dessins

**Données
tabulaires :** GPU + **cuBLAS** + **PyTorch**
TensorFlow \implies Réseaux de neurones
“**classiques**”

Un écosystème de développement complet

Graphisme : Imprimante + Driver + **Photoshop** \implies Dessins

**Données
tabulaires :** GPU + **cuBLAS** + **PyTorch**
TensorFlow \implies Réseaux de neurones
“**classiques**”

**Grilles
de pixels :** GPU + **cuDNN** + **PyTorch**
TensorFlow \implies Réseaux de neurones
convolutifs

Un écosystème de développement complet

Graphisme : Imprimante + Driver + **Photoshop** \implies Dessins

Données tabulaires : GPU + **cuBLAS** + **PyTorch** / TensorFlow \implies Réseaux de neurones **“classiques”**

Grilles de pixels : GPU + **cuDNN** + **PyTorch** / TensorFlow \implies Réseaux de neurones **convolutifs**

Nuages de points : GPU + **CUDA** + **?** \implies Réseaux de neurones **géométriques**

Un écosystème de développement complet

Graphisme : Imprimante + Driver + **Photoshop** \Rightarrow Dessins

Données tabulaires : GPU + **cuBLAS** + **PyTorch** / TensorFlow \Rightarrow Réseaux de neurones **“classiques”**

Grilles de pixels : GPU + **cuDNN** + **PyTorch** / TensorFlow \Rightarrow Réseaux de neurones **convolutifs**

Nuages de points : GPU + **CUDA** + **KeOps** \Rightarrow Réseaux de neurones **géométriques**

Conclusion

1. “IA” = bonnes **données** + bon **modèle**. Il n’y a **pas de miracle**.
2. **Image médicale** = “texture” + “forme” + “physiologie”.
Chaque composante peut être traitée à l’aide
de **structures de calcul** appropriées.
3. Les outils Python de haut niveau nous le font souvent oublier...
Mais **sous le capot**, nos méthodes reposent sur des puces
qui **favorisent** plus ou moins certaines **méthodes**.

Pour **comprendre** la révolution actuelle
et **anticiper** les évolutions à venir,
il faut donc dépasser l’idée d’IA en “**boîte noire**”.

sites.google.com/view/masterclassiaimagerie



Mes TPs sont en ligne : www.jeanfeydy.com/Teaching/

Documentation en ligne :

⇒ www.kernel-operations.io ⇐

Thèse de doctorat, en introduction au domaine :

Analyse de données géométriques, au-delà des convolutions.

www.jeanfeydy.com/geometric_data_analysis.pdf

Merci pour votre attention.

Avez-vous des questions ?

-  Olivier Ecabert, Jochen Peters, and Matthew Walker.
Segmentation of the heart and great vessels in ct images using a model-based adaptation framework.
Medical Image Analysis, (15):863–876, 2011.
-  Tomaso Mansi.
A statistical model for quantification and prediction of cardiac remodelling : Application to tetralogy of fallot.
IEEE transactions on medical imaging, 2011.