

# La face cachée de l'intelligence artificielle

consommation énergétique des algorithmes de IAg

Rémi Emonet – 2025-11-10 – UEOS-TEDS

UJM FST / Lab. Hubert Curien



## 1. Impact environnemental du numérique ?

*... et autres activités*

## 2. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle (IA) ?

*Faire apprendre une machine à partir d'exemples*

## 3. Coût énergétique de l'IA générative ?

*Entraînement et utilisation*

## 4. Réduire l'impact environnemental de l'IA générative ?

*Pistes et défis*

# Attention : la mesure précise est complexe

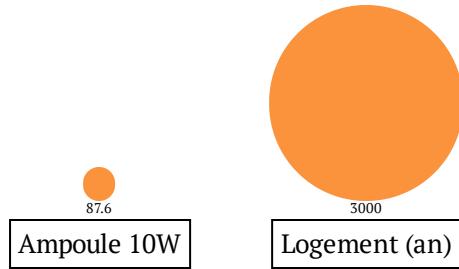
- les chiffres donnés sont des ordres de grandeur
- les sources varient sur leur date, leur méthodologie, leur précision
- les technologies évoluent rapidement

# Impact environnemental du numérique ?

... et autres activités

# Quelques Ordres de Grandeur (Énergie)

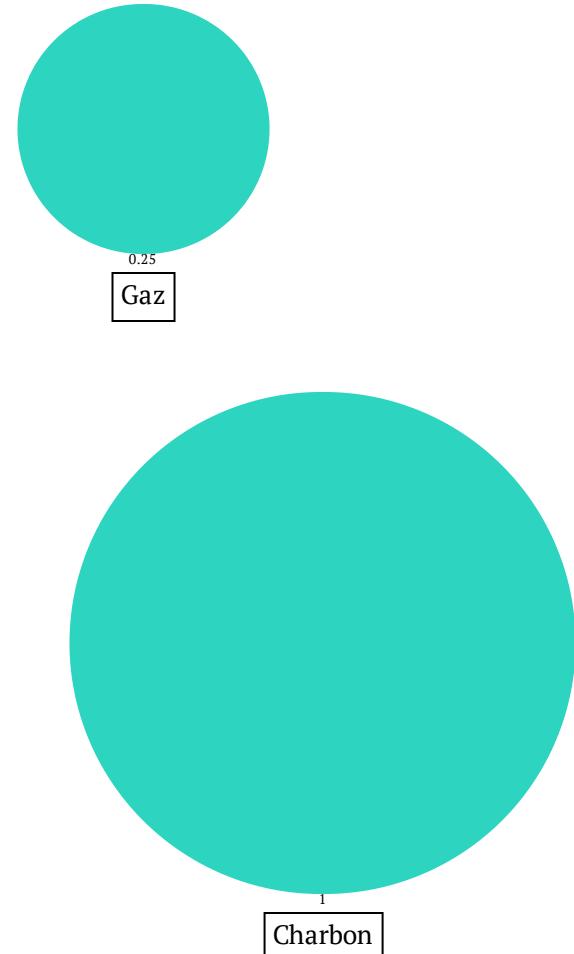
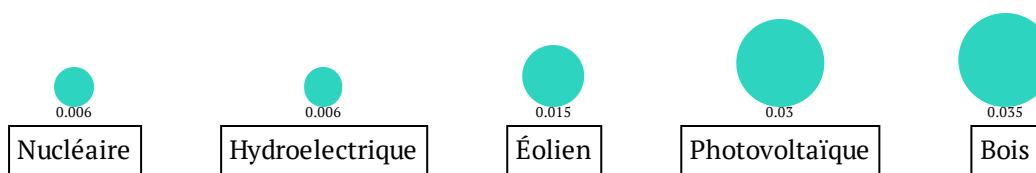
annuel, par personne, en kWh, en France



Production / consommation

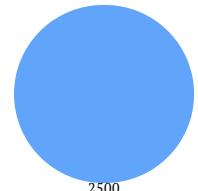
# Conversion kWh → Eq. CO<sub>2</sub>

kg Eq. CO<sub>2</sub> par kWh



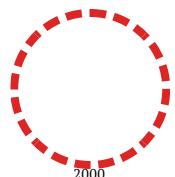
# Quelques Ordres de Grandeur (Eq. CO<sub>2</sub>)

annuel, en kg de CO<sub>2</sub>, par personne, en France

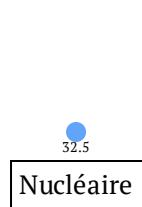


Logement (an)

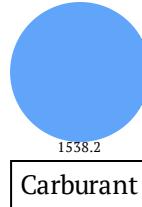
5  
Ampoule 10W



Objectif

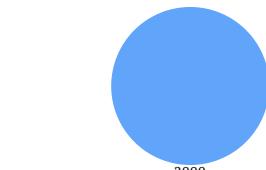


Nucléaire

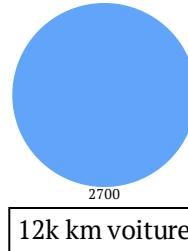


Carburant

## Transports



1 Vol Paris-New York (12k km)

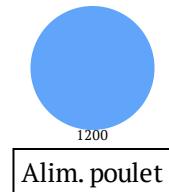


12k km voiture

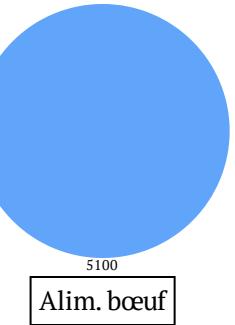


12k km train

## Alimentation



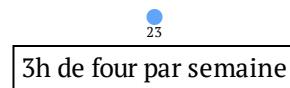
1200  
Alim. poulet



5100  
Alim. bœuf



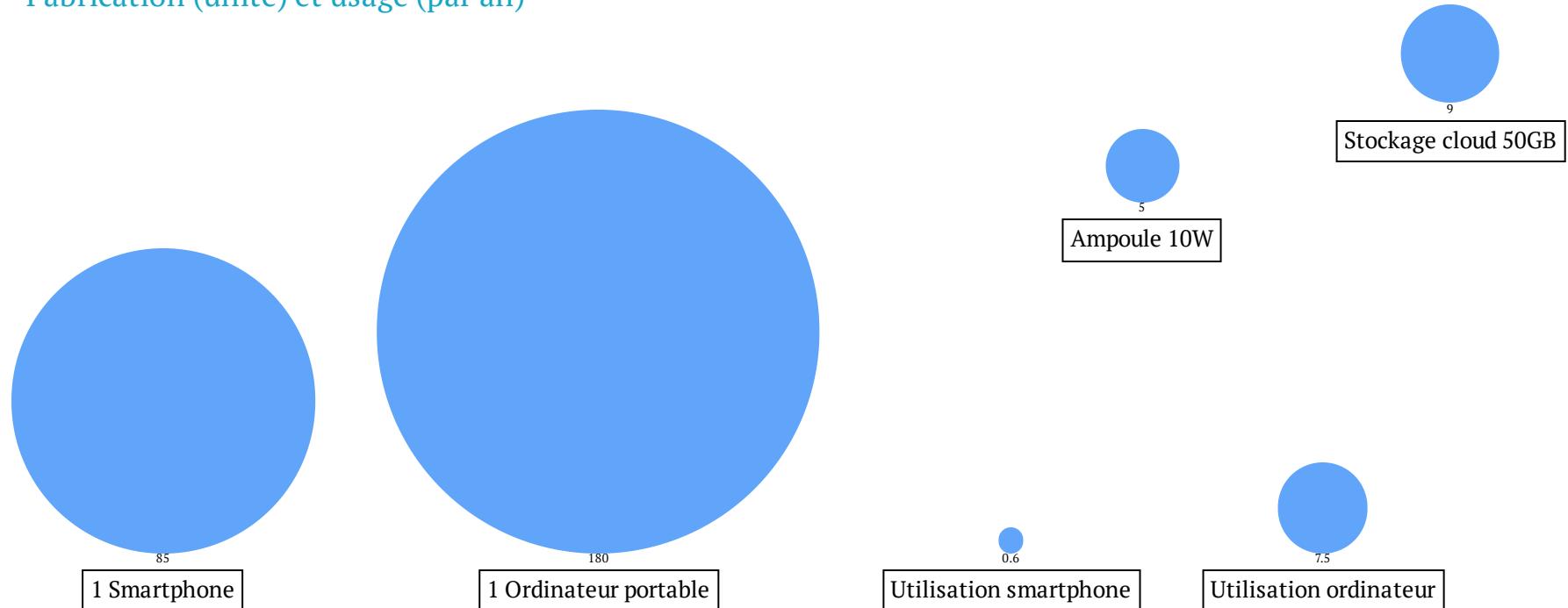
350  
Alim. végétarienne



23  
3h de four par semaine

# Impact du matériel numérique ?

Fabrication (unité) et usage (par an)



Ère du zettaoctet,  $1E = 1,000,000,000,000,000,000,000$  ( $10^{21}$ ) octets  
⇒ importance du débit, dominé par le streaming vidéo

## 1. Impact environnemental du numérique ?

*... et autres activités*

## 2. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle (IA) ?

*Faire apprendre une machine à partir d'exemples*

## 3. Coût énergétique de l'IA générative ?

*Entraînement et utilisation*

## 4. Réduire l'impact environnemental de l'IA générative ?

*Pistes et défis*

# Qu'est-ce que l'intelligence artificielle (IA) ?

Faire apprendre une machine à partir d'exemples



# Limites de la programmation classique

- complexité des programmes
  - tâche impossible à décrire
  - des « if » pour analyser une image ?

121	155	159	137	92	64	45	35	51	42	92	138	130	121	122	176	165	92	88	144	128	101	76	98	84	47	112	126	98	91	107	125	107	108	70													
81	126	128	101	93	143	123	133	128	142	148	134	129	155	185	107	74	149	114	143	114	166	137	131	149	115	99	109	129	118	139	145	163	131	103	137												
109	168	159	143	82	36	11	114	107	74	97	128	123	165	121	133	135	116	162	173	117	75	182	88	135	157	119	80	63	59	78	91	138	130	117	119												
134	160	159	143	82	36	11	114	107	74	97	128	123	165	121	133	135	116	162	173	117	75	182	88	135	157	119	80	63	59	78	91	138	130	117	119												
84	111	126	98	149	130	134	124	134	127	142	148	130	125	145	146	127	142	146	148	149	146	148	147	144	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134													
67	169	118	105	80	131	134	169	143	145	126	156	154	156	143	129	122	116	87	96	164	156	133	176	123	92	90	104	127	132	127	107	111	70	83	137	119	116										
128	152	137	102	142	152	142	152	171	164	148	80	125	71	61	99	138	145	126	165	164	165	163	131	152	86	114	124	93	76	81	78	64	96	99	104	143	144	146									
137	179	166	106	122	117	98	119	123	126	125	128	102	142	147	152	143	151	128	103	87	97	144	152	166	140	128	138	159	151	151	159	161	166	172	164	155	123	84	17								
262	157	168	153	158	156	158	166	181	172	184	180	169	96	83	133	93	83	67	98	130	147	146	176	184	157	127	165	158	168	155	101	95	47	43	137	137	137	137									
166	147	183	123	148	127	149	159	135	124	152	153	147	148	149	152	153	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152										
131	67	157	157	156	151	151	142	151	142	172	143	130	167	106	139	93	98	187	129	78	59	55	87	64	67	143	69	92	113	142	114	124	115	91	57	88	91	69	92	111							
132	180	154	138	108	179	151	105	128	54	67	82	89	137	84	85	108	113	94	94	93	78	73	61	161	26	127	131	76	52	61	79	125	72	55	79	83	78	118	87								
134	86	146	184	152	113	142	161	188	105	121	124	156	149	64	145	133	103	115	93	97	78	126	46	65	65	79	81	164	138	104	86	53	54	91	37	84	102	136	139	83							
131	295	176	108	87	107	150	54	63	61	84	89	121	129	137	144	80	72	87	73	84	115	164	160	74	71	50	71	87	103	113	63	99	139	152	142	136	116	108	74	78	99	79					
136	176	79	157	159	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156										
145	110	108	126	104	94	151	153	146	153	105	177	96	83	58	59	62	81	113	129	97	91	93	72	69	84	124	93	81	73	97	144	88	87	88	87	88	87	88	87	88	87						
92	117	113	74	130	158	81	74	54	55	65	72	75	75	95	92	125	105	134	91	81	79	101	108	77	122	79	133	78	57	86	97	105	96	47	55	69	95	99	106	106	106	106	106	106			
138	102	49	162	87	55	75	115	95	111	116	111	94	95	93	102	108	113	75	82	97	122	86	68	64	59	124	129	69	60	73	62	73	94	67	63	60	77	78	76	78	76	78	76	78	76	78	76
96	77	178	56	120	127	125	125	90	73	78	76	85	73	83	102	103	95	87	115	92	87	95	135	109	135	103	73	72	84	98	75	65	84	87	57	93	113	148	99	68	105	116	145	114			
83	155	155	118	128	63	95	121	99	80	81	87	86	108	108	108	108	108	108	93	62	54	62	162	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86					
141	42	66	72	108	157	162	162	88	77	59	63	122	119	159	141	79	81	68	75	65	84	89	137	132	132	132	75	69	94	81	76	71	66	69	91	97	129	129	94	52	103	84	91	71			
66	164	167	101	188	59	138	153	173	177	167	117	79	165	112	77	78	117	131	91	67	107	128	104	62	69	84	98	119	83	71	87	101	124	122	138	114	94	77	67	49	129	56	12				
95	143	95	128	179	102	173	119	79	116	128	155	93	86	77	88	145	136	137	114	69	81	89	75	88	105	118	112	68	76	108	114	74	83	73	77	72	63	129	133	84	96	127	72	55	138		
172	144	74	99	188	191	121	65	172	146	161	161	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151					
87	73	94	197	104	109	170	168	126	146	156	177	98	144	187	197	129	142	177	76	56	113	164	141	128	77	98	74	83	97	111	147	135	104	107	107	107	107	107	107	107	107	107	107				
61	112	195	125	70	92	153	178	117	96	128	153	189	185	115	75	147	145	147	148	137	103	113	177	74	89	94	93	91	86	101	83	102	93	107	102	93	121	124	79	90	130	137	130	137			
162	192	155	126	116	125	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126								
208	185	153	134	204	161	174	169	168	155	117	99	109	155	157	157	153	156	157	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156							
168	118	118	119	165	169	160	169	159	178	176	189	137	122	92	85	91	111	196	151	98	87	124	153	98	76	169	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153									
177	188	91	212	128	198	106	205	166	160	147	122	118	109	96	93	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113							
122	192	274	76	115	166	99	120	148	82	86	109	193	96	96	169	164	161	85	129	133	130	132	136	139	134	135	134	130	134	130	131	127	119	117	117	117	117	117	117	117	117	117					
204	102	74	156	181	71	115	158	52	85	113	123	126	82	159	150	77	119	135	122	92	123	86	178	168	116	104	149	105	116	99	133	128	108	102	117	95	108	136	137	137	137	137					
137	203	158	116	61	151	137	127	129	104	108	124	132	162	166	126	104	108	126	127	127	74	124	136	139	127	77	149	169	149	123	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135							
133	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132								
138	117	90	141	176	142	122	101	89	86	141	194	189	188	178	114	144	56	99	185	78	113	120	124	109	125	117	105	147	141	123	125	119	119	137	139	139	139	139	139	139							
73	153	153	152	66	128	106	95	111	91	195	133	112	166	134	173	163	201	160	78	121	105	97	128	108	126	122	120	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122								
163	162	85	84	73	87	141	124	117	69	139	116	104	115	166	111	126	106	172	129	123	107	144	160	111	141	146	141	146	141	146	141	146	141	146	141	146	141	146	141	146	141	146					
68	96	96	89	139	139	139	139	1																																							



- ⇒ nécessité de programmer par l'exemple

# Création d'un jeu de données (pour la tâche Chat/NonChat)



, Chat



, Chat



, NonChat



, Chat



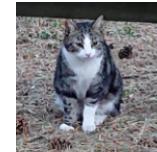
, NonChat



, NonChat



, Chat



, Chat

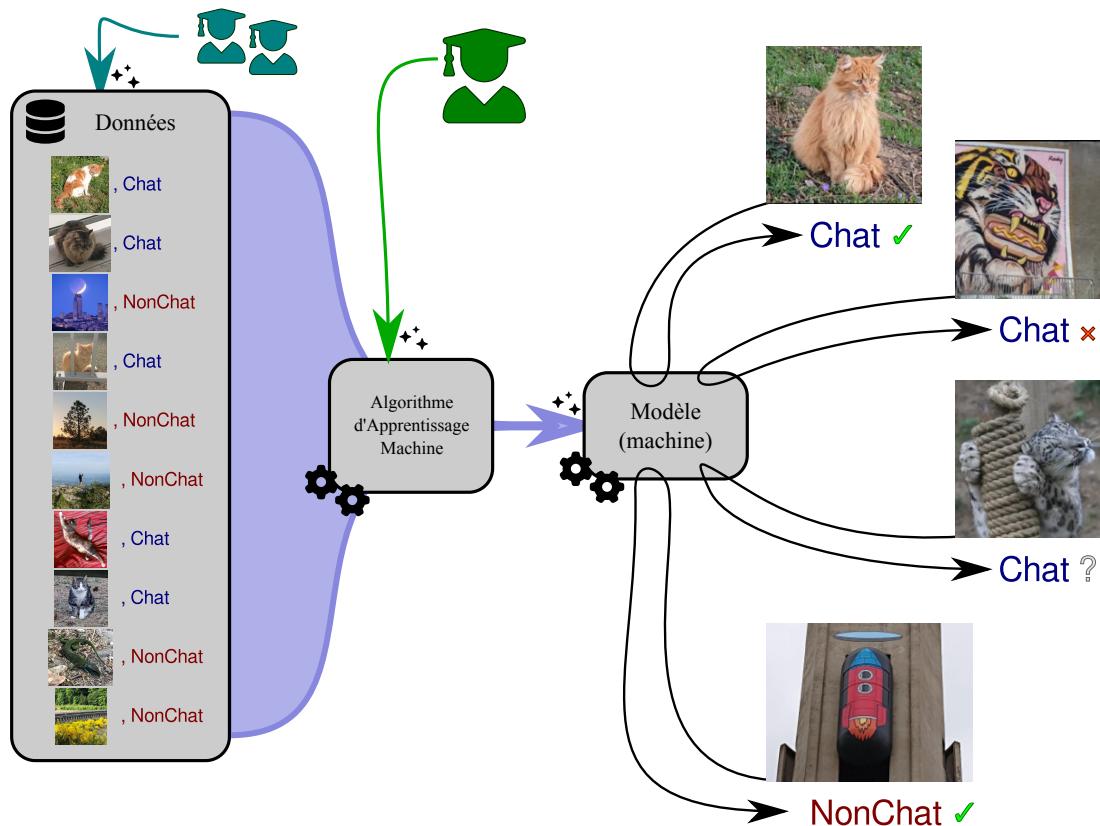


, NonChat

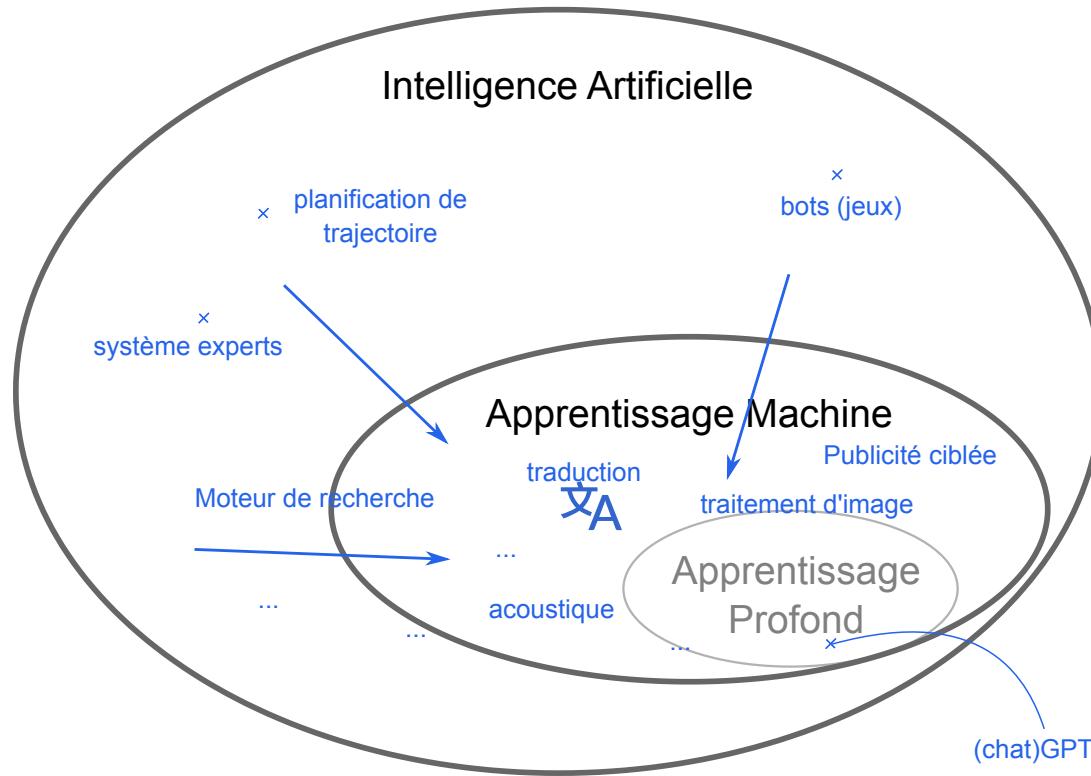


, NonChat

# Apprentissage automatique : principe global



# Terminologie



# Intelligence artificielle ? Le test de Turing

- interaction textuelles entre humain et machine
- l'humain arrive-t-il à savoir qu'il interagit avec une machine ?

Calcul de la somme

ChatGPT 3.5 ▾

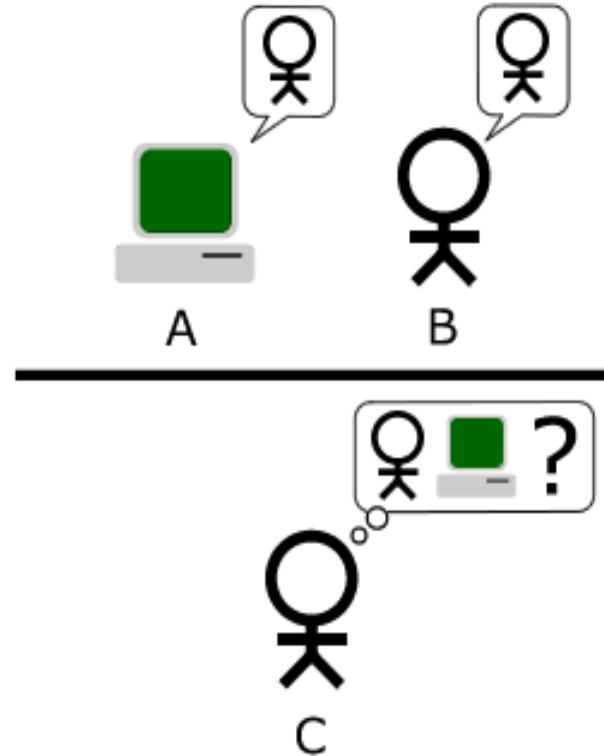
You  
peux-tu m'expliquer comment calculer la somme de 123 et 321

ChatGPT  
Bien sûr ! Pour calculer la somme de 123 et 321, il vous suffit d'additionner ces deux nombres. Voici comment vous pouvez le faire :

$123 + 321 = 444.$

Donc, la somme de 123 et 321 est égale à 444. Si vous avez d'autres questions ou si quelque chose n'est pas clair, n'hésitez pas à demander !

Message ChatGPT...  
ChatGPT can make mistakes. Consider checking important information.



# Intelligence ? Zoom sur chatGPT ?

- Modèle de language : apprendre à prédire le mot manquant

Saint-Étienne appelée « Sainté » en langage familier, est une commune française située au sud-ouest de Lyon (60 km environ) et le quart-sud-est de la France, en région Auvergne-Rhône-Alpes. C'est le chef-lieu du département de la Loire. Avec 174 082 habitants en 2020, elle est la 13e commune la plus peuplée de France (2016) et la 2e commune d'Auvergne-Rhône-Alpes. Saint-Étienne Métropole constitue par sa population (400 813 habitants en 2020) la 3e métropole régionale après la métropole de Grenoble Alpes et la métropole de Lyon. La commune est par ailleurs au cœur d'une vaste aire urbaine de plus de 520 640 habitants en 2017, la dix-septième de France par sa population, regroupant 117 communes.

- Des quantités de données
  - tout **wikipedia**
  - **et 100× plus** avec le web, des livres, etc
- La partie *chat* : faire un agent conversationnel
  - InstructGPT
  - étiquetage manuel d'interactions (~100k)

# Défis et difficultés de l'apprentissage automatique

- concevoir des algorithmes d'apprentissage
- prouver que ces algorithmes marchent
- évaluer ces algorithmes
- défis divers
  - biais des données
  - interprétabilité/explicabilité
  - adaptation/transfert
  - attaques et manipulation
  - *efficacité en données*
  - *efficacité en calcul/énergie*
- choix sociétaux et législation

# Et la génération d'image ?

- Données
  - des paires (image, description textuelle)
  - e.g. LAION-5B: **5 milliards d'images**
- Modèles
  - e.g. DALL·E 2:  
modèle propriétaire d'OpenAI
  - e.g. Midjourney:  
modèle propriétaire
  - e.g. Stable Diffusion:  
modèle open-source très populaire



## 1. Impact environnemental du numérique ?

*... et autres activités*

## 2. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle (IA) ?

*Faire apprendre une machine à partir d'exemples*

## 3. Coût énergétique de l'IA générative ?

*Entraînement et utilisation*

## 4. Réduire l'impact environnemental de l'IA générative ?

*Pistes et défis*

# Coût énergétique de l'IA générative ?

Entraînement et utilisation

# Entraînement et Inférence

## Inférence

- utilisation du modèle
- phase de génération
- utilisateurs finaux
- volume d'utilisation



## Entraînement

- création du modèle
- phase d'apprentissage
- données massives

# Impact de l'entraînement

tonnes Eq. CO<sub>2</sub>

- Entraînement GPT-3 ≈ 500 t Eq. CO<sub>2</sub>

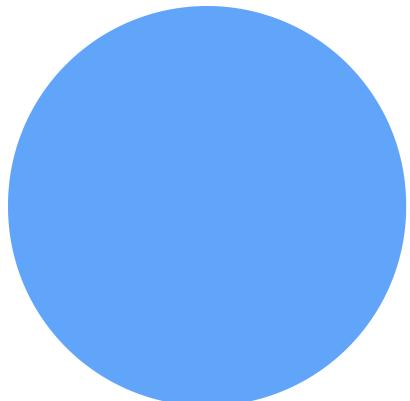
502  
Entraînement GPT-3



2277000  
Production (annuelle) Nucléaire France

# Coût de l'entraînement

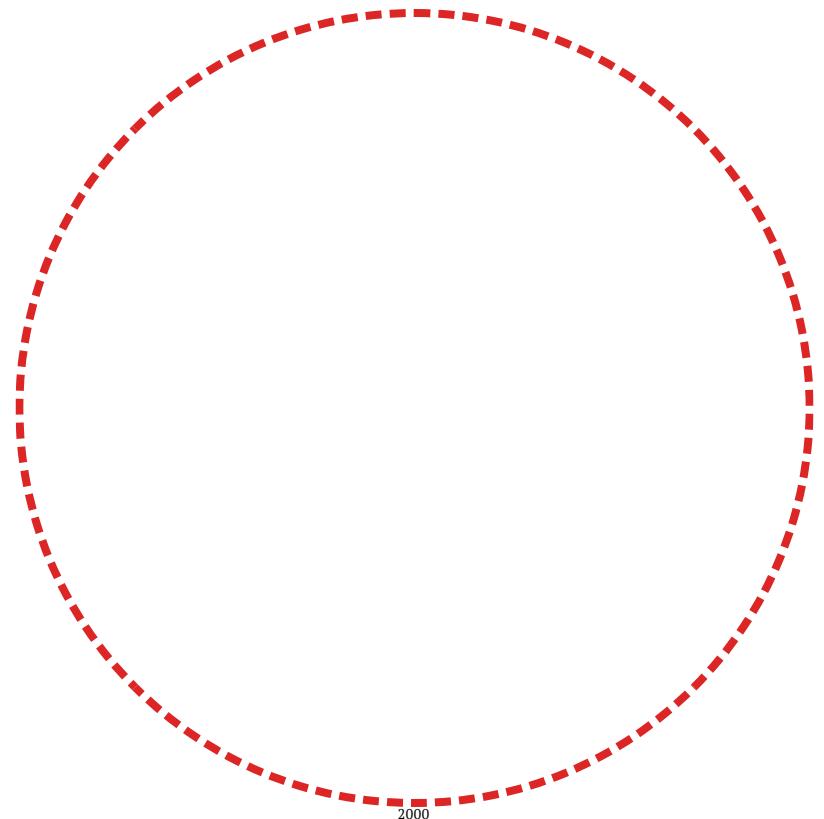
tonnes Eq. CO<sub>2</sub>



Entraînement GPT-3



Électricité annuelle 1000 personnes



Objectif 1000 personnes

# L'exemple de Llama

transparence sur les coûts, deux version 8B et 70B

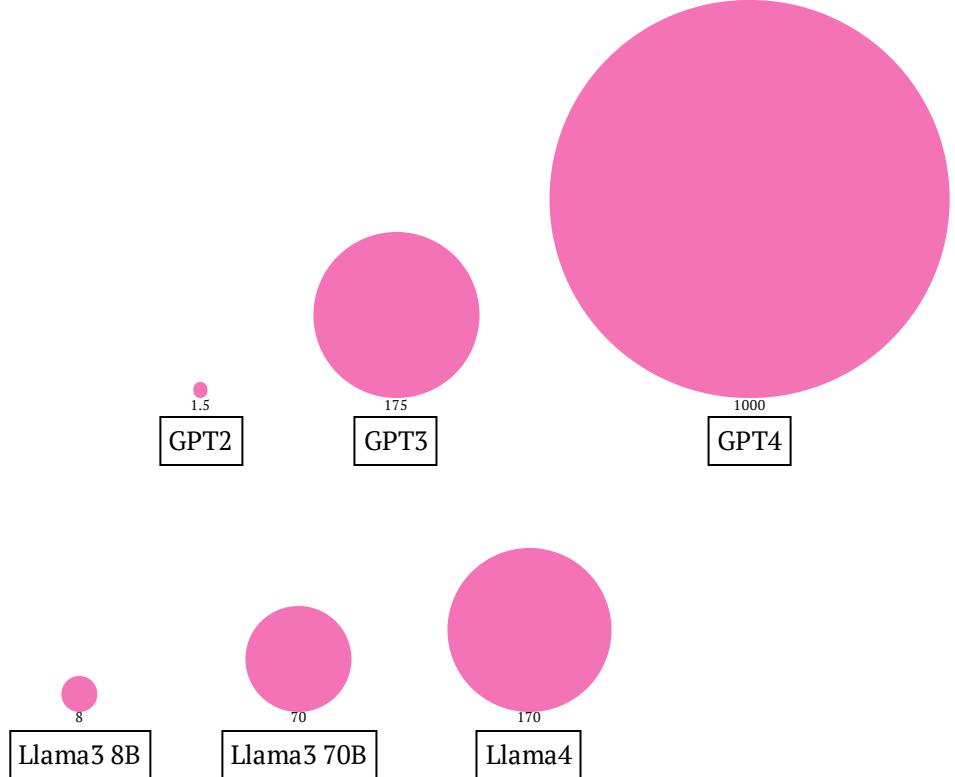
- ■ 8 milliards de paramètres (8B) ou 70 milliards (70B)
- Jeu de données
  - 15T "tokens" (parties de mots)
  - soit  $15 \times 10^{12}$
- coût (en t Eq CO<sub>2</sub>)
  - matériel (GPU)
  - calcul
  - **climatisation**



Entraînement GPT-3

# Stockage des modèles

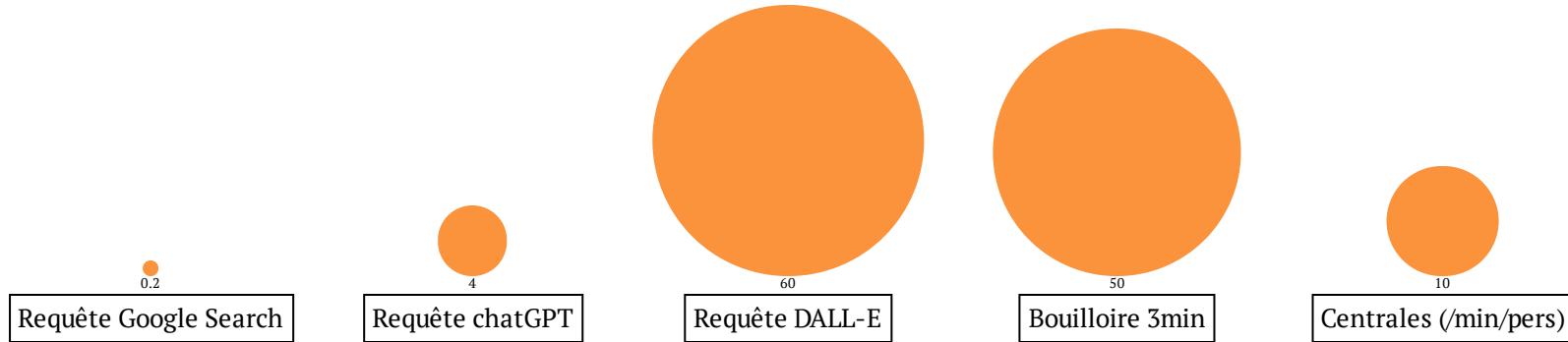
- Dépend du nombre de paramètres
  - GPT-2 : 1,5 milliards de paramètres (1.5B)
  - GPT-3 : 175 milliards de paramètres (175B)
  - GPT-4 : 1 trillion de paramètres (1000B)
  - GPT-5 : ...
- Exemple de Llama3
  - estimation de taille
    - 8B : ~60 Go
    - 70B : ~500 Go
  - compression possible
    - 8B : 5Go, voir 2Go
    - 70B : similaire



# Coût énergétique de l'inférence

Wh par requête

- 1 requête chat GPT = 10 requêtes Google Search



## 1. Impact environnemental du numérique ?

*... et autres activités*

## 2. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle (IA) ?

*Faire apprendre une machine à partir d'exemples*

## 3. Coût énergétique de l'IA générative ?

*Entraînement et utilisation*

## 4. Réduire l'impact environnemental de l'IA générative ?

*Pistes et défis*

# Réduire l'impact environnemental de l'IA générative ?

Pistes et défis

# Pistes pour réduire l'impact

- Coté modèles / algorithmes / entraînement :
  - Optimiser les algorithmes d'entraînement
  - Réutiliser des modèles pré-entraînés
  - Réduire la taille des modèles
  - Réduire la quantité de données d'entraînement
- Coté infrastructure :
  - Utiliser des sources d'énergie renouvelable
  - Utiliser le matériel de l'utilisateur
  - Améliorer l'efficacité matérielle
- Coté usage :
  - Réduire le nombre de requêtes
  - Réduire la taille des réponses
- Exemples :
  - Mélange d'experts
  - Distillation de modèles
  - Quantification et compression

## 1. Impact environnemental du numérique ?

*... et autres activités*

## 2. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle (IA) ?

*Faire apprendre une machine à partir d'exemples*

## 3. Coût énergétique de l'IA générative ?

*Entraînement et utilisation*

## 4. Réduire l'impact environnemental de l'IA générative ?

*Pistes et défis*

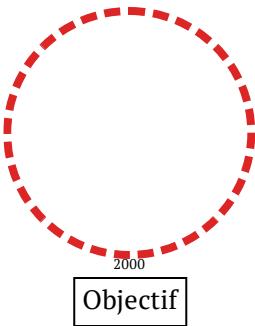
# Conclusions

# Conclusions (par an et/ou personne)

Entraînement GPT-4 (pour 1M personne)

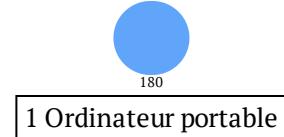
10 Requêtes ChatGPT par jour

1000 Requêtes ChatGPT par jour



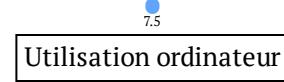
Objectif

2000



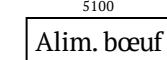
1 Ordinateur portable

180



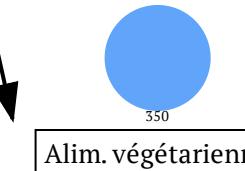
Utilisation ordinateur

7.5



Alim. bœuf

5100



Alim. végétarienne

350

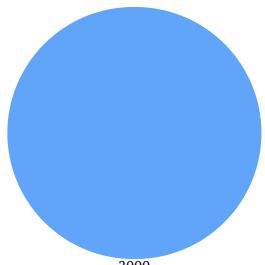
# Merci !

!!! Augmentation en continue !!!

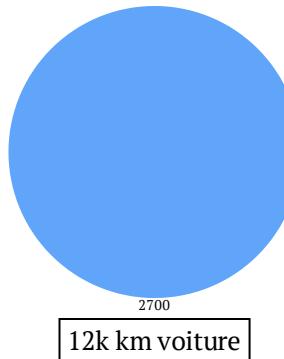


150

1000 Requêtes ChatGPT par jour



2000



2700

12k km train

30