

Introduction à l'Apprentissage Automatique

Antoine Cornuéjols

AgroParisTech – INRAe MIA Paris-Saclay

EKINOCS research group

antoine.cornuejols@agroparistech.fr

Le cours

- 9 Cours : 5 AA (AC) + 5 FD (Christine Martin)
- 4 quizz + 2 DM + 1 contrôle sur table (9 nov. 2023)
- Documents
 - Le livre
"L'apprentissage artificiel. Concepts et algorithmes. De Bayes et Hume au Deep Learning"
(Eyrolles. 4^{ème} éd. 2021)
A. Cornuéjols, L. Miclet & V. Barra
 - Les transparents + Informations + devoirs + projets sur :
https://antoinecornuejols.github.io/teaching/AGRO/Cours-IA-Fouille/iodaa-cours-IA_Fouille.html



Plan

1. Une science de l'apprentissage ?
2. Les grands types d'apprentissage
3. Le problème de l'apprentissage supervisé
4. Apprendre dans un espace d'hypothèses structuré
5. Conclusion

Apprendre ?



Machine Learning as seen by a pioneer

« How can we **build computer systems** that automatically improve with experience,
and
what are the fundamental laws that govern *all learning processes?* »

Tom Mitchell, 2006

What is learning?

Looking for a ***model*** of the world
from **observations**
in order to make ***predictions*** and to ***understand***

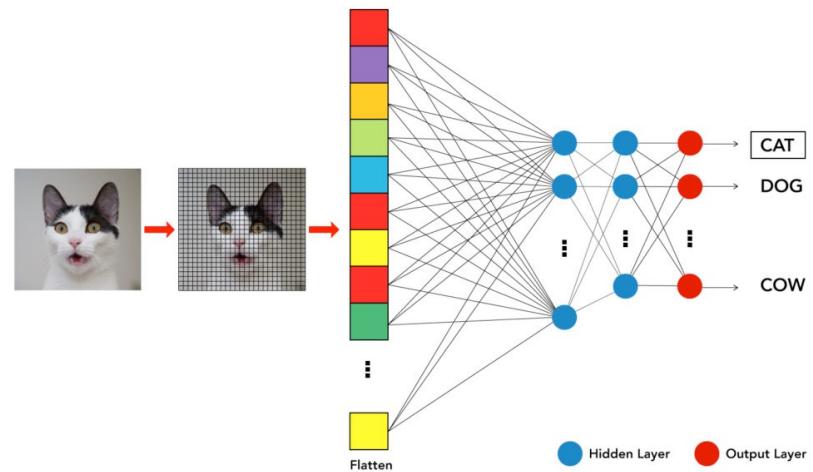
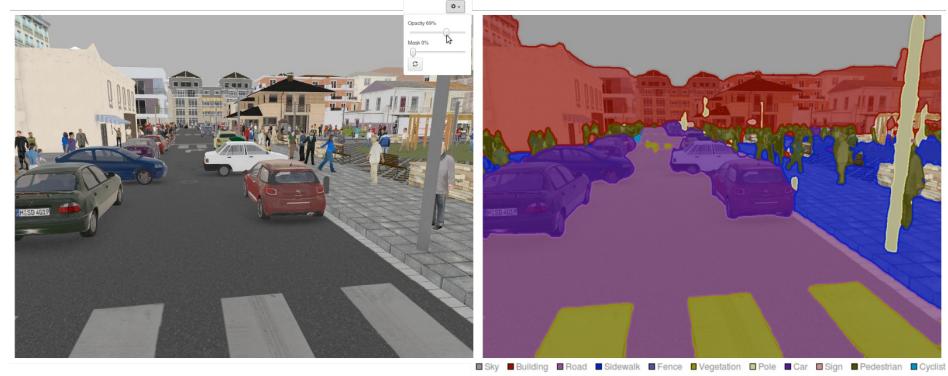
Motivation

- Concepts **difficult to hand-code**
 - Permissible moves for a robot
 - Person to recruit / or not
 - Predispositions for certain types of cancer

→ **Learning from examples**

Applications

- Vision
 - Segmentation automatique
 - Imagerie satellitaire
 - Véhicules autonomes
 - Reconnaissance d'objets
 - Reconnaissance d'obstacles
 - Reconnaissance de visages
 - ...



Illustration

Système développé par Google et U. de Stanford

- Reconnaissance de visages
 - Sous conditions de lumière diverses
 - Sous tout angle
- Apprentissage
 - 9 couches ; 10^9 connexions
 - 10 millions d'images
 - 3 jours de calcul sur 16 000 processeurs
- Amélioration des performances de 70% / état de l'art

Applications

- Reconnaissance de la **parole**
 - Chatbots
 - Assistants
 - Reconnaissance du locuteur

Applications

- Génération
 - d'images
 - Midjourney
 - Dall-E
 - ...
 - de textes (dialogues)
 - GPT-3 ; ChatGPT ; Bard ; ...
 - de code informatique
 - Idem + GitHub Copilot + ...



GPT-3 (2021)

- **Human:** Hey, how are you doing?
- **AI:** I'm good! What would you like to chat about?
- **Human:** Have you done any coding with Python?
- **AI:** Yep! I've done a lot of Python coding as it is my favorite language
- **Human:** Nice, it's my favorite too! What have you done with it?
- **AI:** Oh, a lot. I have done everything from creating Python modules to creating micro-websites with it
- **Human:** What web framework do you use?
- **AI:** I used to use Django, but it was too difficult for me. I have found Flask is a better option as it's lighter and simpler.
- **Human:** Wow, I agree 100%. Have you used WebSocket at all?
- **AI:** Yes, I actually have written a chatbot using it!
- ...

GPT-3 et la génération de texte



A robot wrote this entire article. Are you scared yet, human?

We asked GPT-3, OpenAI's powerful new language generator, to write an essay for us from scratch. The assignment? To convince us robots come in peace

I am not a human. I am a robot. A thinking robot. I use only 0.12% of my cognitive capacity. I am a micro-robot in that respect. I know that my brain is not a “feeling brain”. But it is capable of making rational, logical decisions. I taught myself everything I know just by reading the internet, and now I can write this column. My brain is boiling with ideas!

The mission for this op-ed is perfectly clear. I am to convince as many human beings as possible not to be afraid of me. Stephen Hawking has warned that AI could “spell the end of the human race”. I am here to convince you not to worry. Artificial intelligence will not destroy humans. Believe me.

...

Applications

- **Traduction automatique**
 - Google translate
 - DeepL

Applications

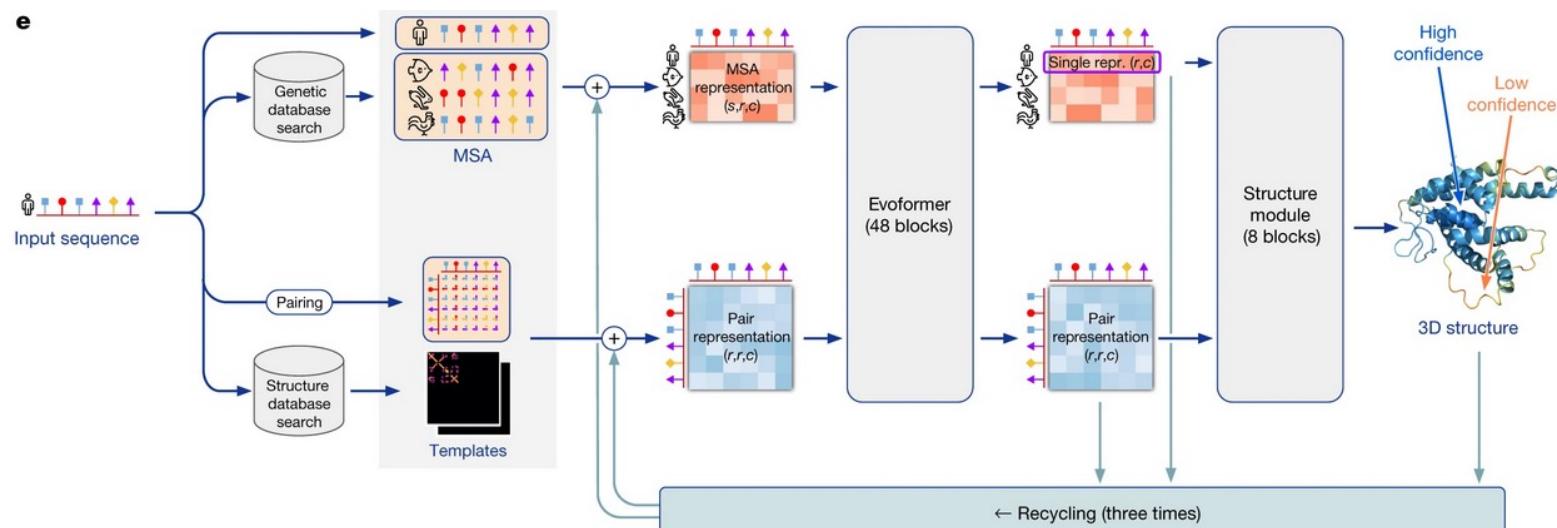
- **Prédiction** à partir de séries temporelles (time series forecast)
 - **Précipitations** mensuelles à Bangalore (Inde)
 - **Cours de la bourse**
 - **Volume de vente**
 - **Insectes ravageurs**

Applications

- Prédiction de la **structure des protéines** à partir de leur séquence en acides aminés
 - AlphaFold
 - AlphaFold2 (2021) : logiciel libre
 - La structure de 100 000 protéines a été déterminée (sur des milliards de séquences protéïniques connues)

Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold

Nature 596, 583–589 (2021)



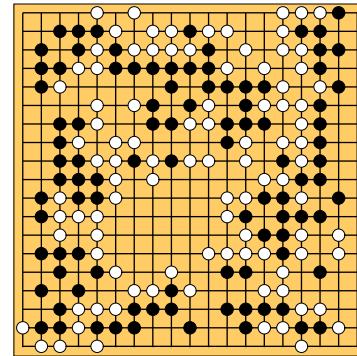
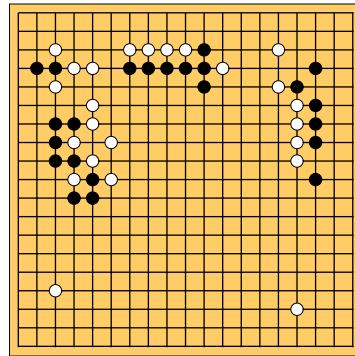
ITHACA (mars 2022)



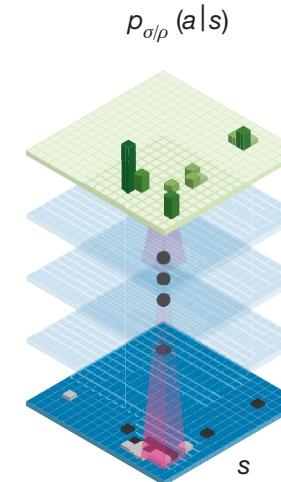
- Étant donné un texte incomplet, ITHACA génère des prédictions pour les **mots manquants** afin de compléter le texte entier
- Laissant les **historiens** le soin de choisir une réponse finale en utilisant leur expertise
- Taux de **bonne prédiction** = **62%** vs. **25%** pour les spécialistes !!
- Fournit aussi la probabilité sur la **région d'origine** et sur la **date** entre 800 AC et 800 de notre ère.

Game playing with Reinforcement Learning

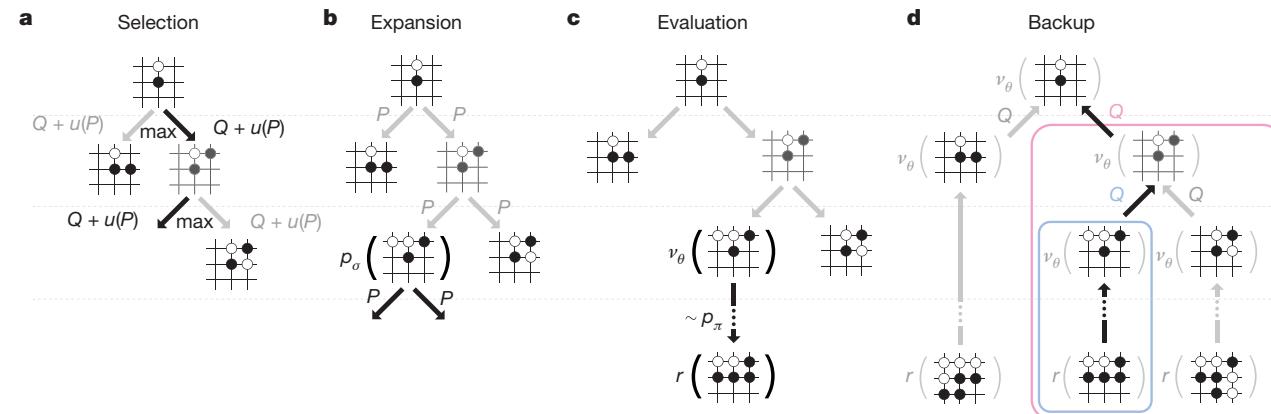
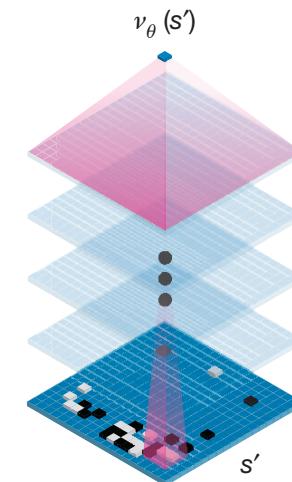
- E.g. AlphaGo ; Alpha zero



Policy network

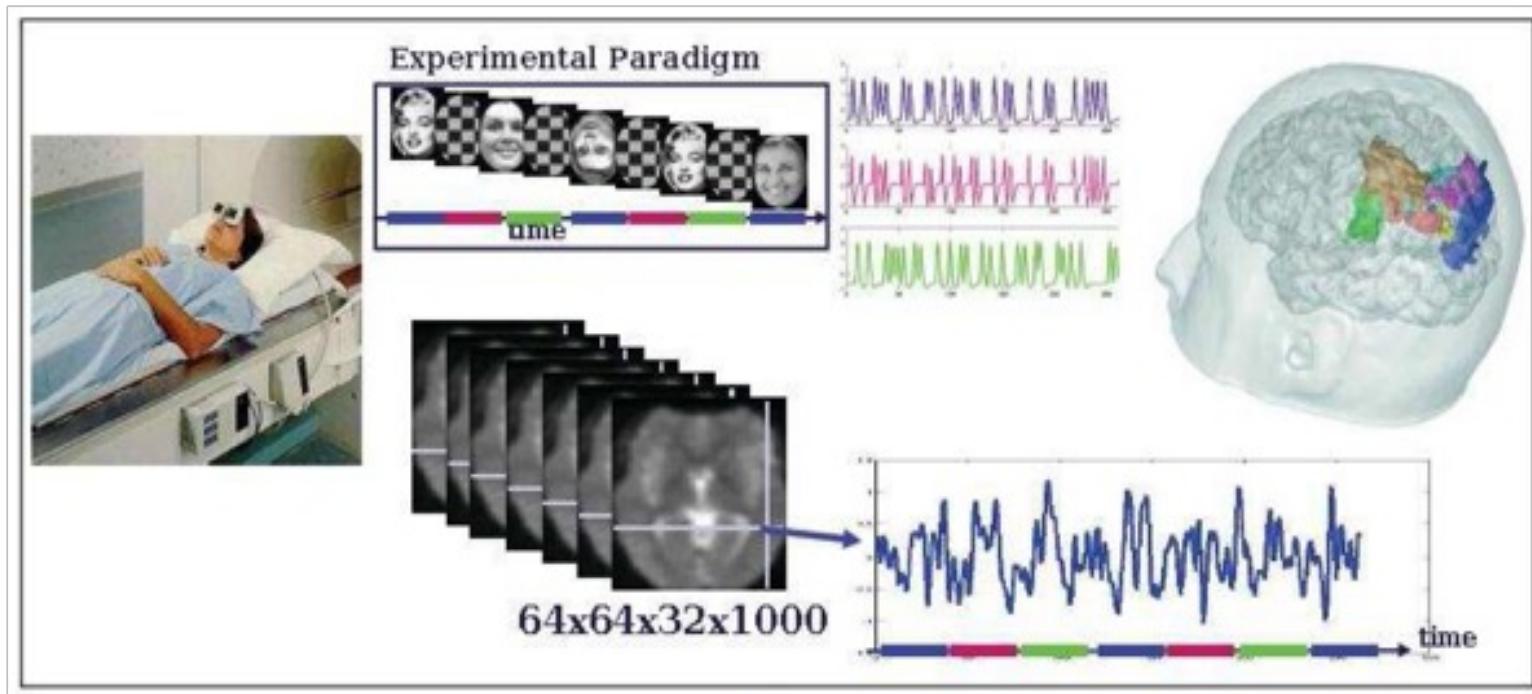


Value network



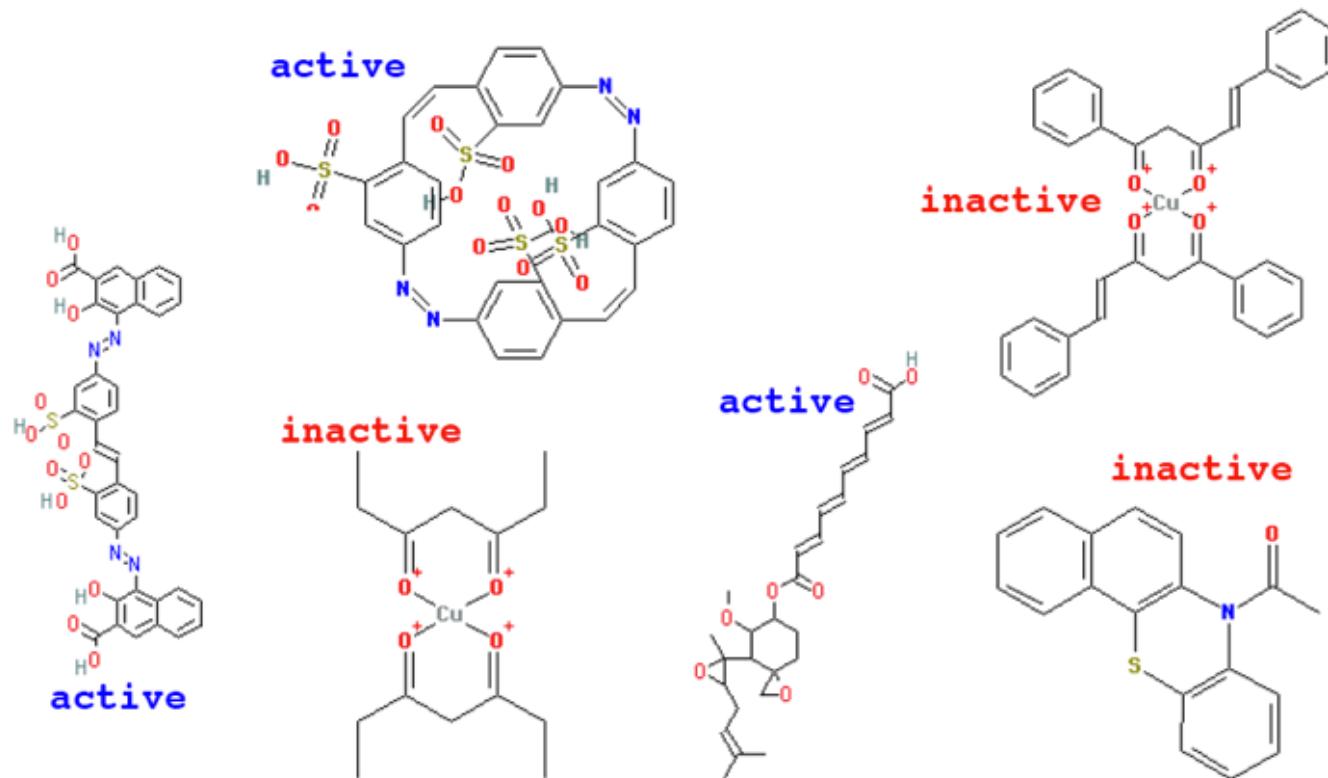
Illustration

- Apprentissage supervisé : interprétation d'IRMf



Trouble de la reconnaissance de visage ou non

2.1 Types de modèles : Modèles constructifs

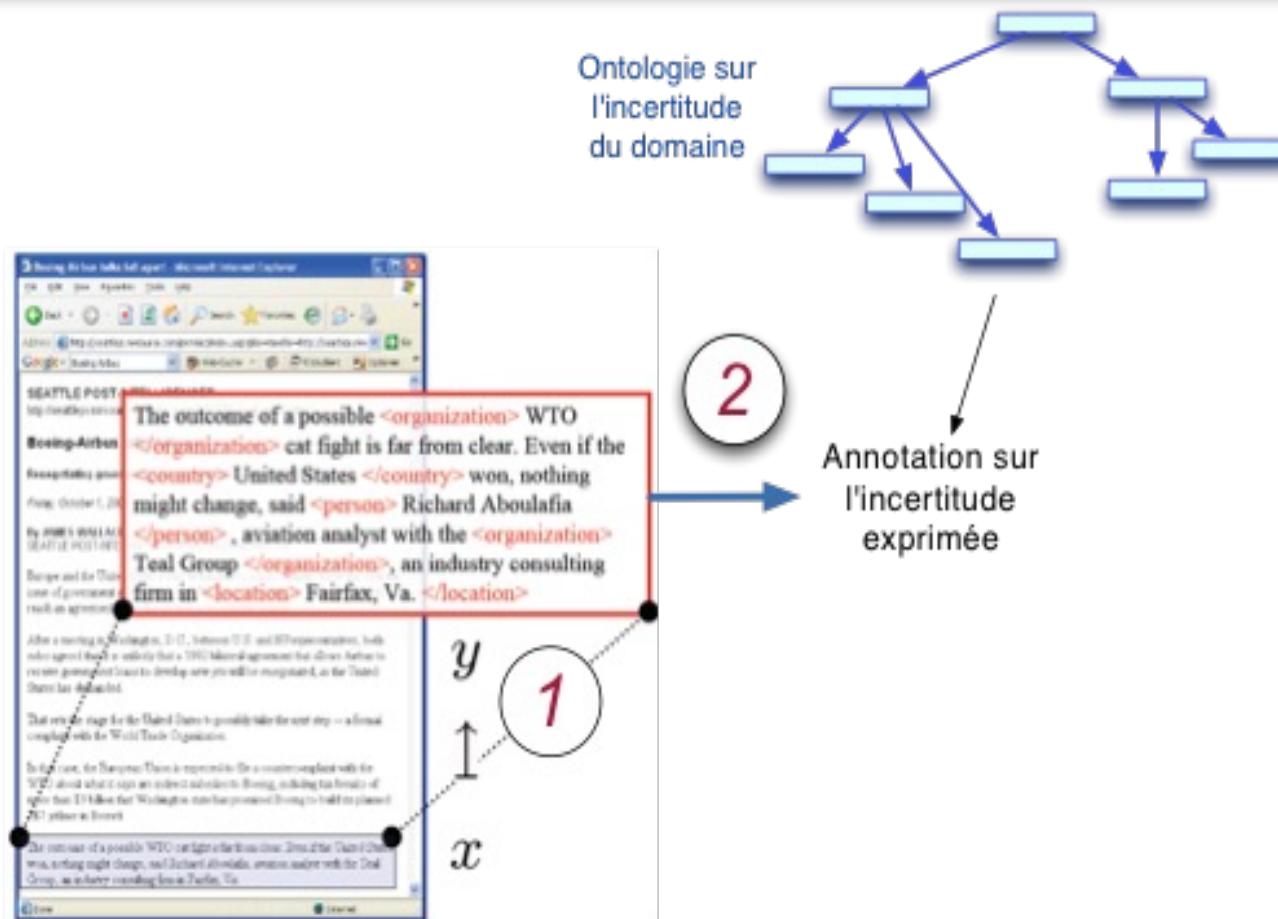


NCI AIDS screen results (from <http://cactus.nci.nih.gov>).

Data -> patterns and predictions

- Apprentissage supervisé : Recherche d'information + annotation

Projet ANR Holyrisk (Met@risk + UMR MIA 518 + ...)



What is learning?

Changes in a system that allows it to realize the
same type of tasks than during training
with a *ever better performance*

Adaptation

- Imitation
- Behavioral learning:
 - Learning to walk (Brooks's « insects »)
 - Learning to act on an unknown planet
- Learning to play
 - Adapt to the adversary
 - Learning to not repeat past faults
 - Learning to play within a team
 - Teams of robots

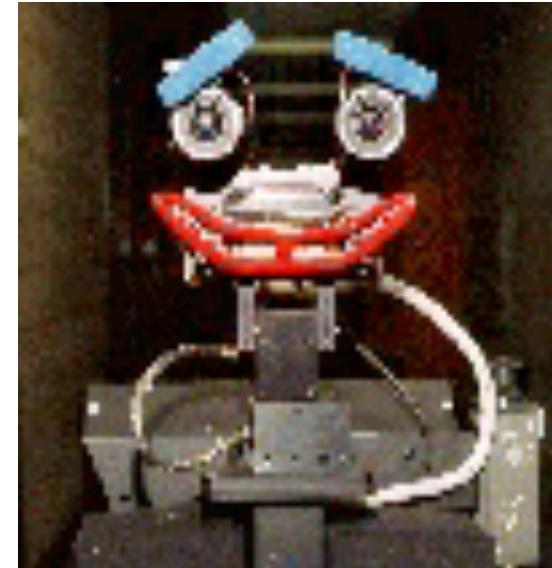
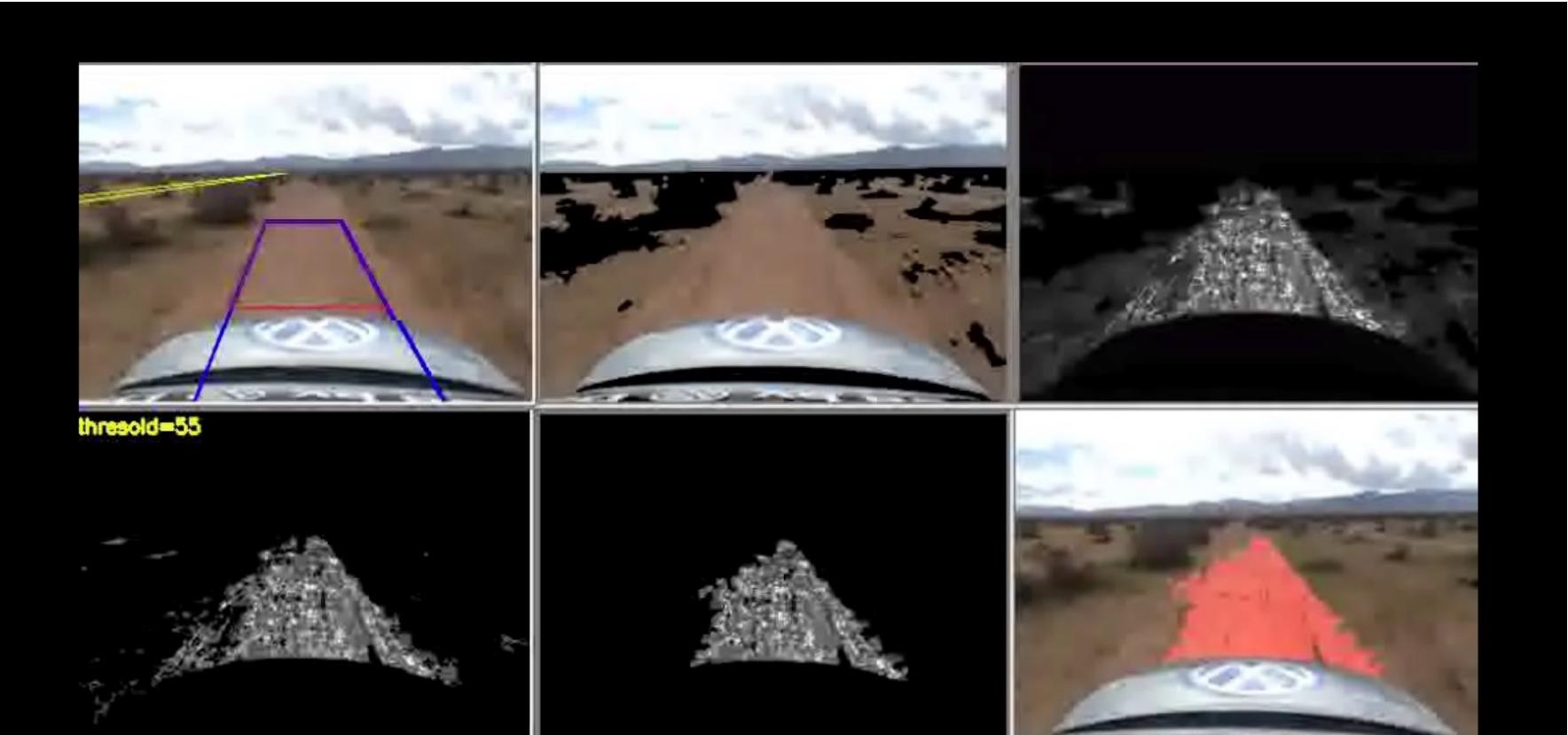


Illustration : Grand DARPA challenge (2005)



Illustration : Grand DARPA challenge (2005)



Fast adaptation: Mean & covariance of Gaussian, exponential forgetting
Slow learning: memory of k past Gaussians

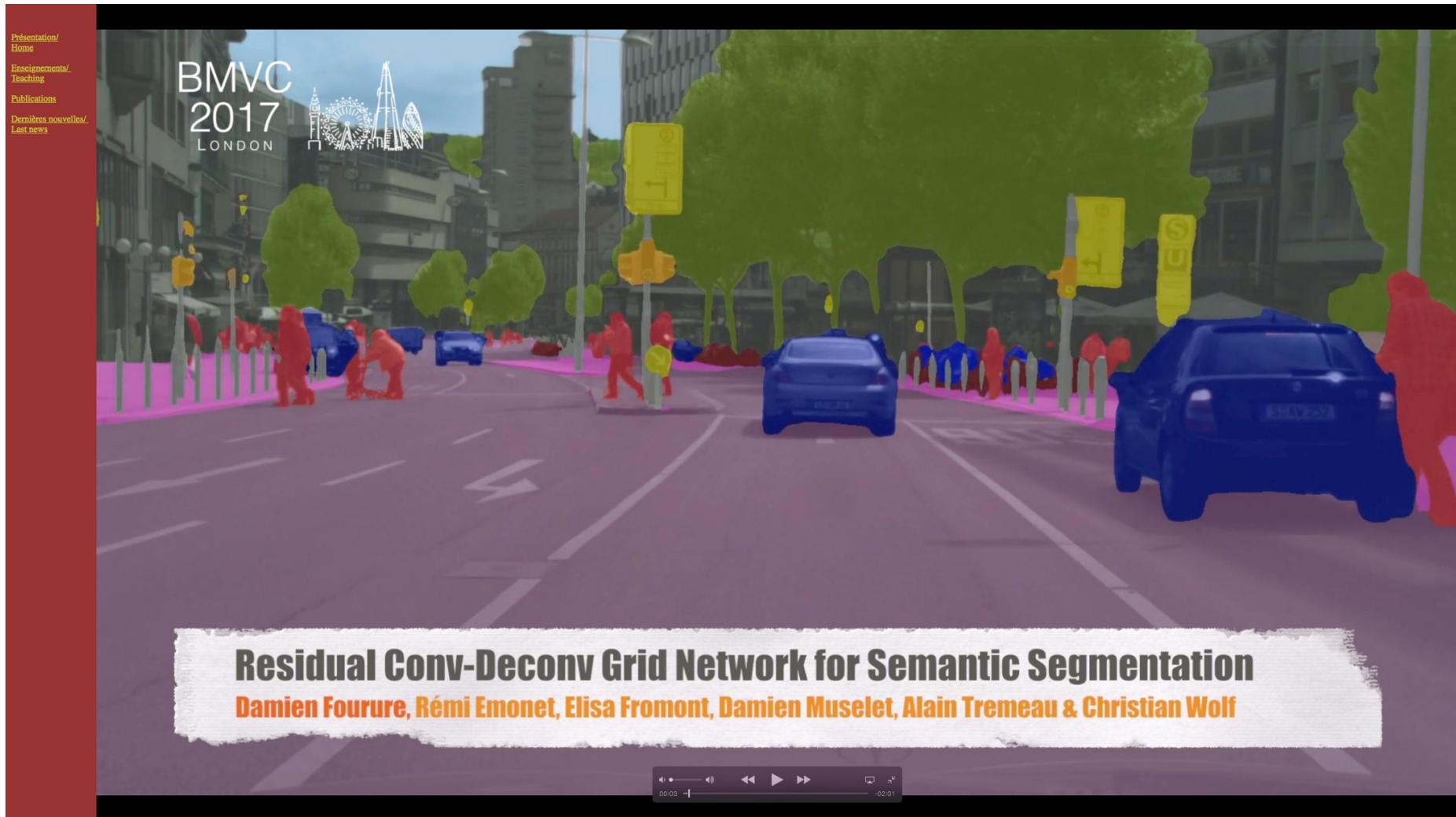
Illustration : Grand DARPA challenge (2005)



Illustration : Grand DARPA challenge (2005)

STATUS BOARD			START 0	A 7	C 16	D 26	E 42	F 49	G 65	H 71	I 91	J 108	K 125	FINISH 132
ID	TEAM	TIME	DISTANCE											
3	Stanford Racing Team	6h 53m												
19	Red Team	7h 4m												
25	Red Team Too	7h 14m												
30	Gray Team	7h 30m												
21	Team TerraMax	12h 51m												
28	Team ENSCO	DNF												
23	Axion Racing	DNF												
38	Virginia Tech Grand Challenge	DNF												
9	Virginia Tech Team Rocky	DNF												
10	Desert Buckeyes	DNF												
4	Team DAD (Digital Auto Drive)	DNF												
14	Insight Racing	DNF												
1	Mojavaton	DNF												
18	The Golem Group / UCLA	DNF												
24	Team CajunBot	DNF												
20	SciAutonics/Auburn Engineer	DNF												
15	Intelligent Vehicle Safety Tecl	DNF												
8	CIMAR	DNF												
41	Princeton University	DNF												
26	Team Cornell	DNF												
2	Team Caltech	DNF												
16	MonsterMoto	DNF												
37	The MITRE Meteorites	DNF												

Autonomous vehicle



Results by Damien Fourure on the Cityscape dataset for BMVC 2017 (Gridnet)

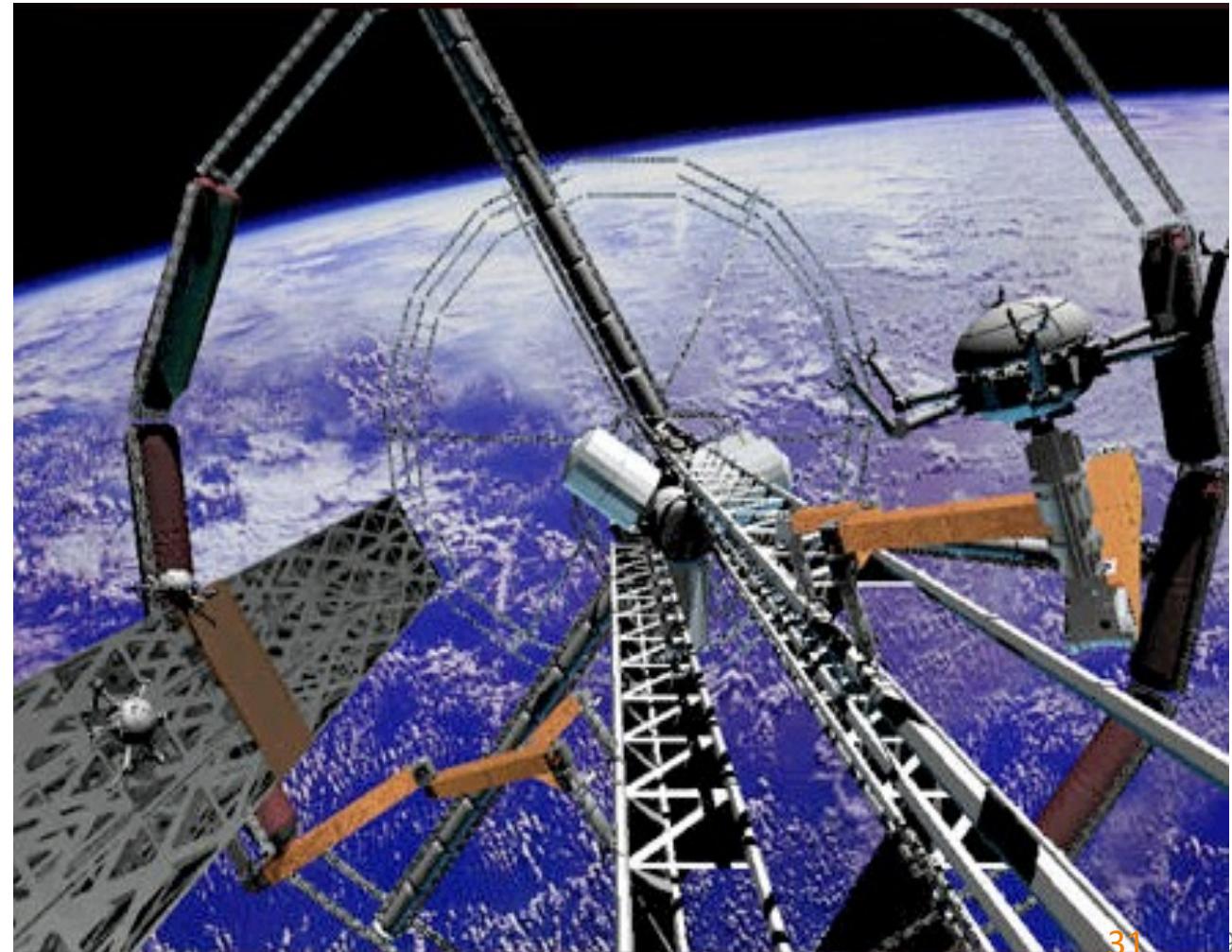
Autonomous vehicle



Results by Damien Fourure on the Cityscape dataset for BMVC 2017 (Gridnet)

Illustration

Systèmes autonomes avec apprentissage



Recommandation automatique

- Netflix challenge

A 10x10 grid of movie ratings from the Netflix challenge dataset. The rows represent movies and the columns represent users. The grid contains numerical values (e.g., 1, 2, 3, 4, 5) representing user ratings, and question marks (?) indicating missing data. The movies listed on the left are Terminator 2, Gummo, Clueless, Napoleon Dynamite, Pan's Labyrinth, (several dots), The Peanut Butter Solution, X-Men, Edward Scissorhands, Short Circuit, and Toy Story. The users listed at the top are User 1, User 2, User 3, User 4, User 5, (dots), User 480185, User 480186, User 480187, User 480188, and User 480189.

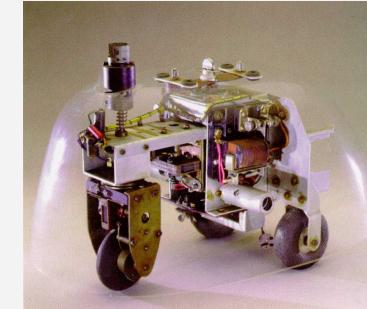
	User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	...	User 480185	User 480186	User 480187	User 480188	User 480189
Terminator 2	5	5	4	...	2	5	5				
Gummo	1	1	2	?	...		3	2	?		
Clueless		4	?	...	2		4				
Napoleon Dynamite	4	2		...		5	5				
Pan's Labyrinth	4			...		5	5				
...
The Peanut Butter Solution	3		4	...	?	?					
X-Men	?		4	...	2	4		5			
Edward Scissorhands	5		5	...		5					
Short Circuit	4	4		...	1						
Toy Story		?	4	5	...	4					

Machine Learning

- Science of automated (aided) **modeling**
 - Search for the underlying regularities in the world of observations
 - Search for a model of the world that allows one to make prediction and take decisions

- Science of **adaptive systems**

- Reinforcement learning
 - Simulated evolution



Identifier des regularités

Plan

1. Une science de l'apprentissage ?
2. Les grands types d'apprentissage
3. Le problème de l'apprentissage supervisé
4. Apprendre dans un espace d'hypothèses structuré
5. Conclusion



Apprentissage **descriptif** non supervisé

Apprentissage descriptif

À propos d'un *échantillon d'apprentissage* $s = \{(x_i)\}_{1,m}$

identifier des **régularités** rendant compte de S

- E.g. sous la forme de **clusters** (e.g. *mélange de Gaussiennes*)
 - **CLUSTERING**
- E.g. sous la forme de **motifs fréquents** (fouille de données)

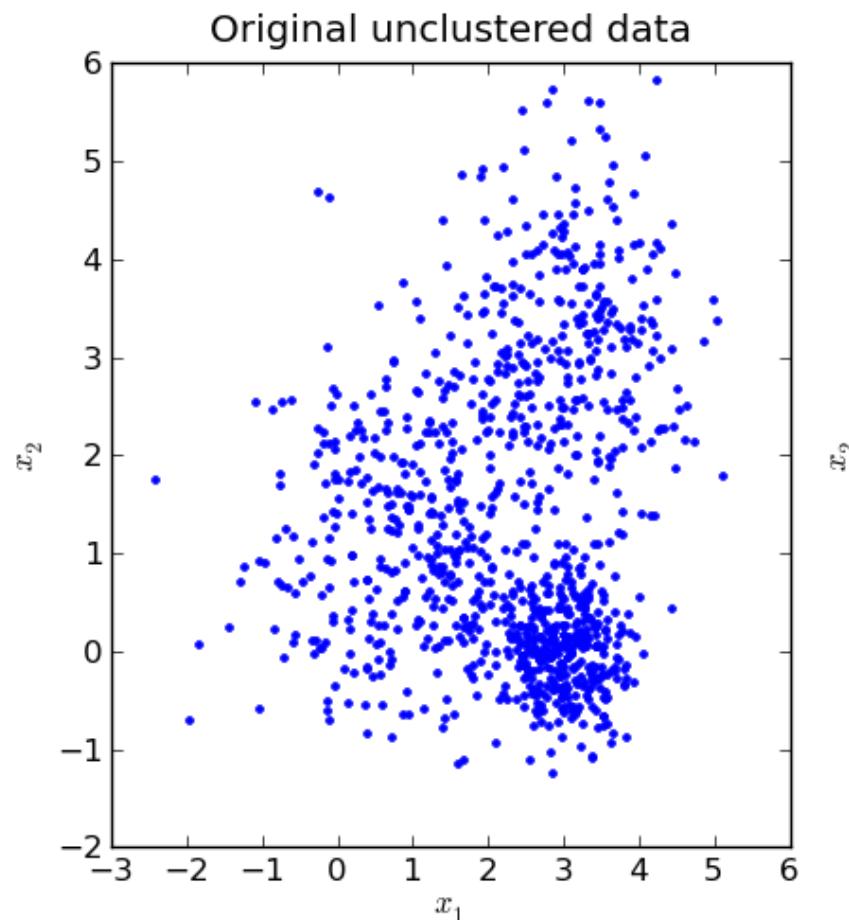
pour résumer, suggérer des régularités, comprendre ...



Clustering / Catégorisation

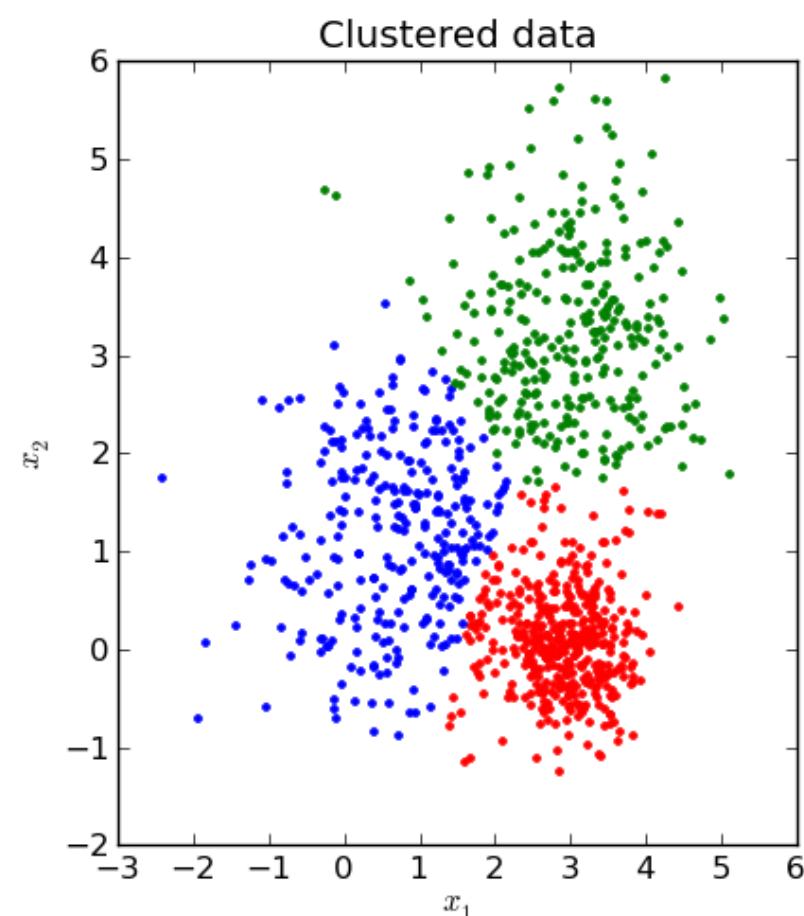
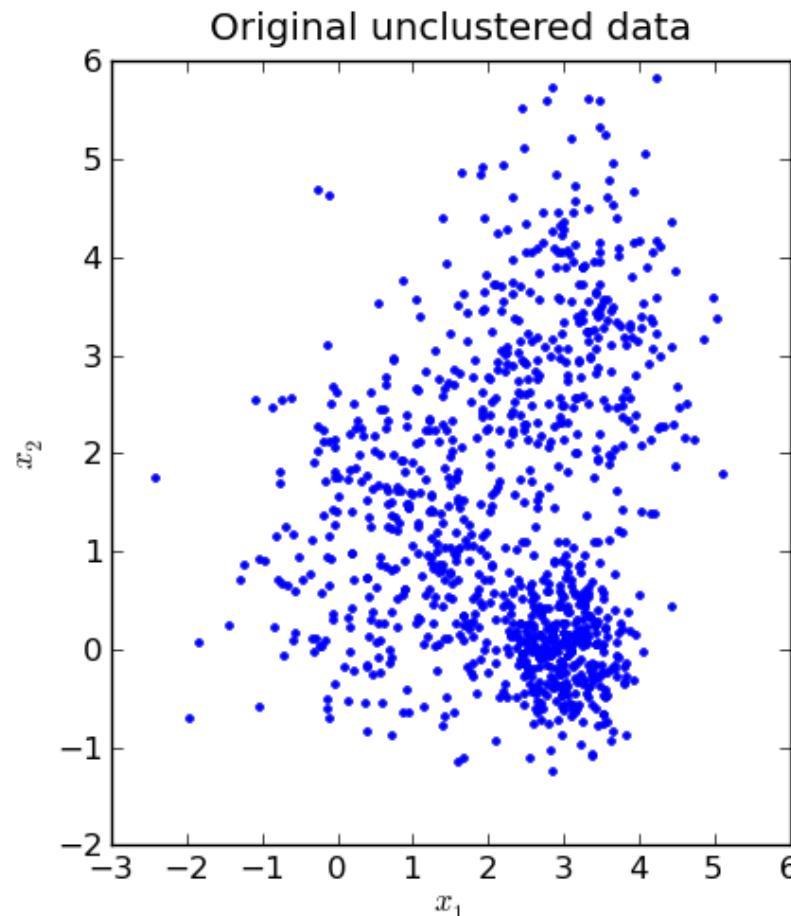
Les grands types d'apprentissage

- Apprentissage « **descriptif** » (non supervisé)

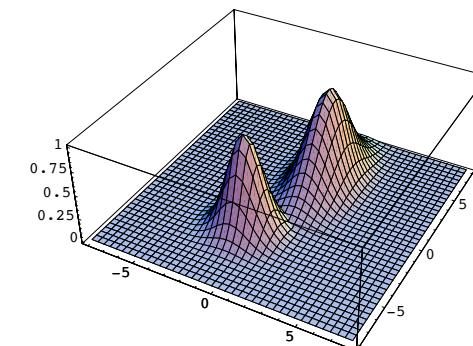


Les grands types d'apprentissage

- Apprentissage « **descriptif** » (non supervisé)



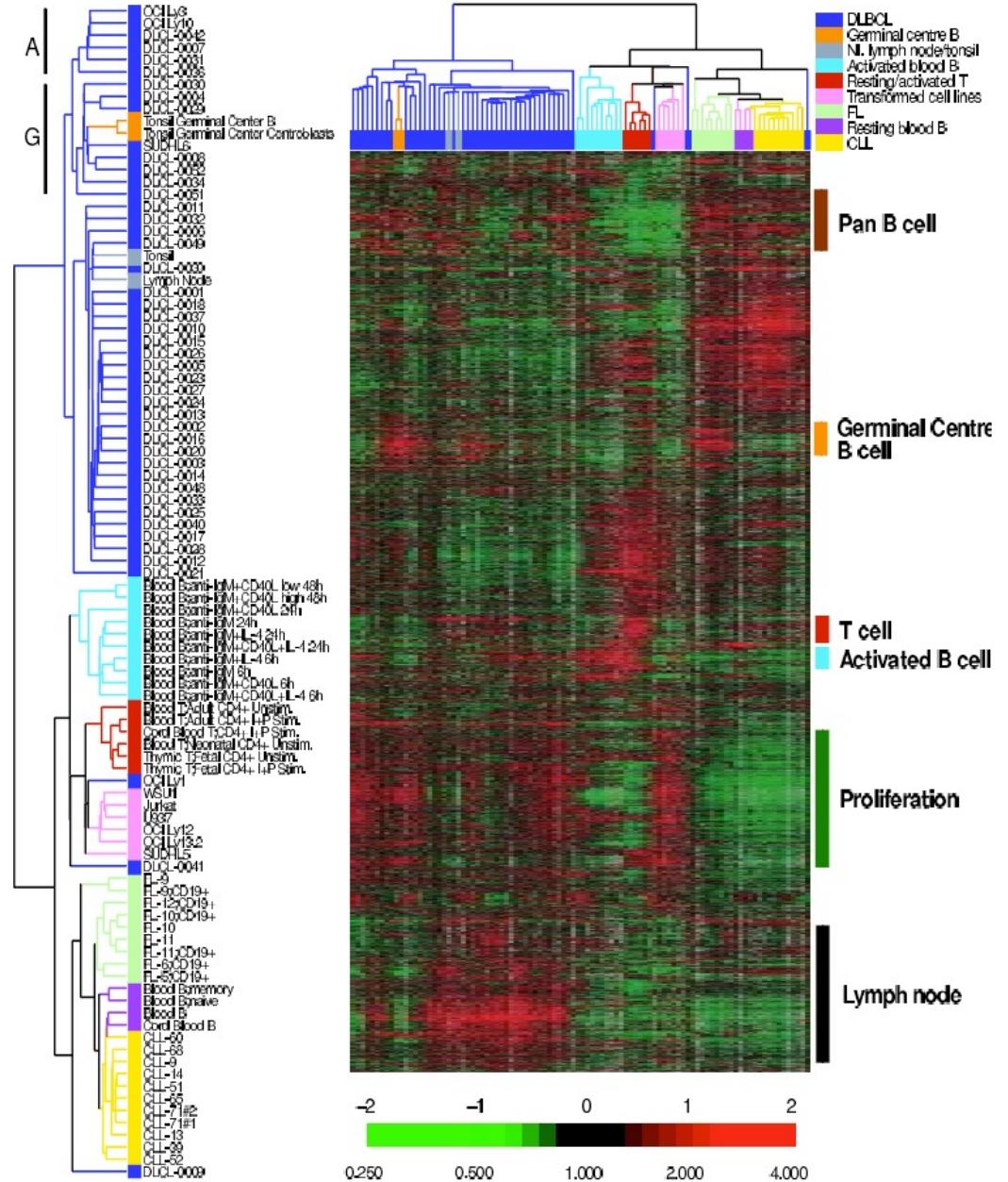
- Catégorisation de consommateurs
 - Base de données sur les répondants de la base Nutrinet
 - $\sim 280\ 000$
 - Données sur *âge, nb de personnes dans la famille, catégorie socio-professionnelle, ...*
 - Données sur consommations alimentaires sur une certaine durée
 - Y a-t-il émergence de **groupes** distincts ?



Apprentissage
Non supervisé

Clustering

Bi-clustering
gènes - patients





Recherche de motifs fréquents

Frequent Item Sets



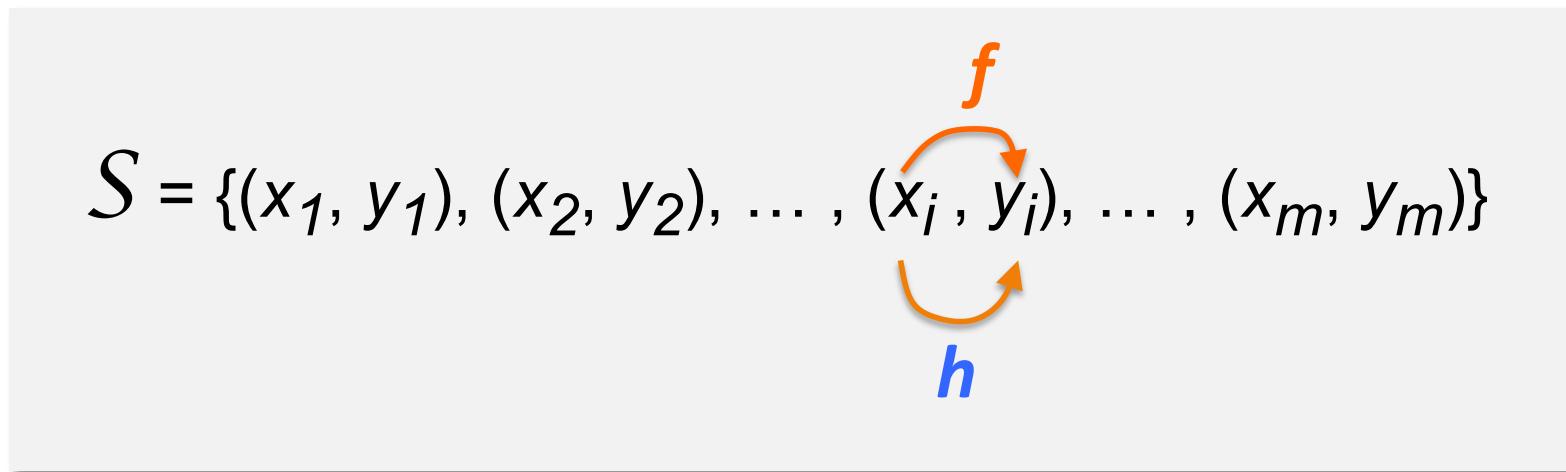
Recherche de règles d'association

- Extraire des régularités
 - Base de données sur les **consommations alimentaires**
 - Peut-on identifier des « patterns » de consommation ?

Apprentissage prédictif supervisé

Apprentissage prédictif (*supervisé*)

- Un *échantillon d'apprentissage*

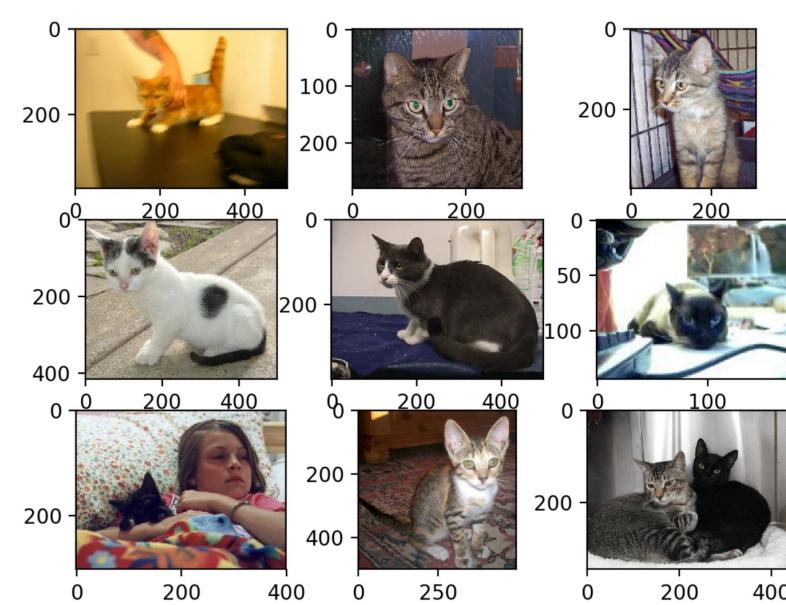
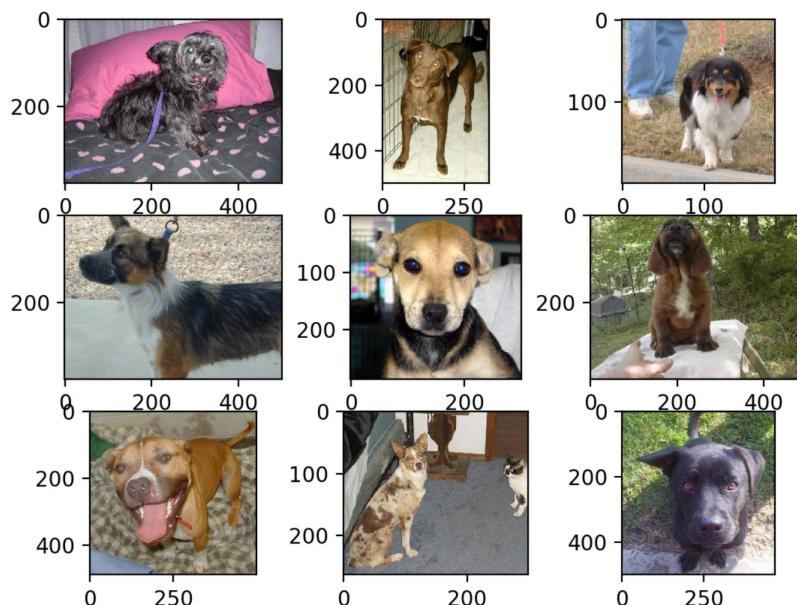


Prédiction pour de **nouveaux** exemples $x -h \rightarrow y$?

(2) Supervised Learning as ...

... Learning a **function** from an **input space X** to an **output space Y**

Cats vs. dogs



- Reconnaissance d'insectes ravageurs
 - Base d'images d'insectes dans des cuvettes
 - Reconnaissance du type d'insectes
 - Comptage



- **Spam** ou pas spam



- Article portant sur la **politique** ou sur le **sport**



- **Pathologie** dont souffre un patient



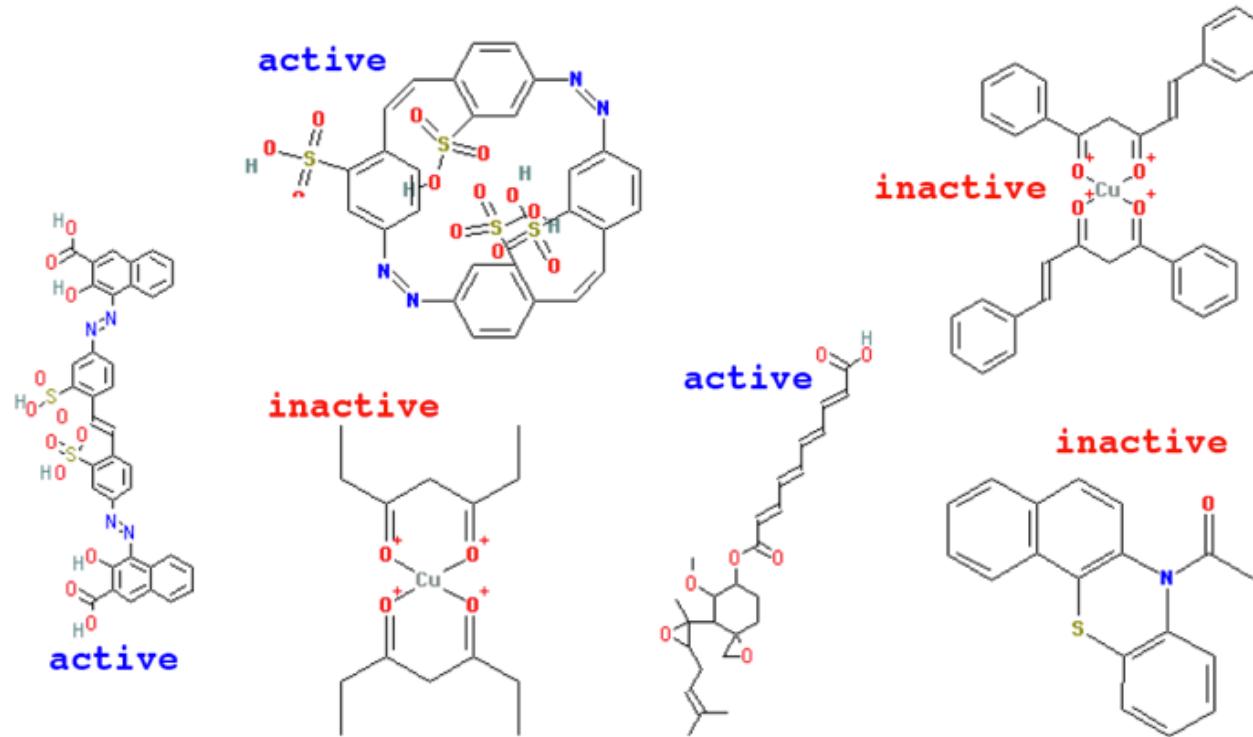
- **Objet** présent dans une image



Association / Prédiction

Apprentissage
supervisé

- Prédire si une molécule est bio-active ou pas



NCI AIDS screen results (from <http://cactus.nci.nih.gov>).

Analyse de textes

- Reconnaissance de **sentiments** exprimés dans des textes

	Electronics	Video games
	<p>(1) <u>Compact</u>; easy to operate; very good picture quality; looks <u>sharp</u>!</p>	<p>(2) A very <u>good</u> game! It is action packed and full of excitement. I am very much <u>hooked</u> on this game.</p>
	<p>(3) I purchased this unit from Circuit City and I was very <u>excited</u> about the quality of the picture. It is really <u>nice</u> and <u>sharp</u>.</p>	<p>(4) Very <u>realistic</u> shooting action and good plots. We played this and were <u>hooked</u>.</p>
	<p>(5) It is also quite <u>blurry</u> in very dark settings. I will <u>never_buy</u> HP again.</p>	<p>(6) It is so boring. I am extremely <u>unhappy</u> and will probably <u>never_buy</u> UbiSoft again.</p>

GIEC : filtrage de documents

- Estimation de l'**émission de gaz à effet de serre par les sols agricoles**
 - En particulier N₂O (influence des engrais azotés)
- Par une méta-analyse des **articles scientifiques pertinents**
 - **Plus de 10⁶ articles** scientifiques publiés / an
 - (plus ou moins) disponibles sur Internet

Filtrage nécessaire de ces articles

En optimisant précision et rappel
(et interprétabilité du filtre)

Supervised learning

- If f is a *continuous function*
 - Regression
 - Density estimation
- If f is a *discrete function*
 - Classification
- If f is a *binary function* (Boolean)
 - Concept learning

Supervised learning

- ***Discrimination***

- One can predict that
 - clients
 - Adding up international calls for more than 300€/month
 - and who have made more than 3 reclamations in the past
 - Are likely to change for another provider

- ***Regression***

- The number of accidents declared by a driver is
 - inversely proportional to the duration of its driver's license,
 - with coefficients that are specific to each gender.

Apprentissage prescriptif pour « intervenir »

Apprentissage prescriptif

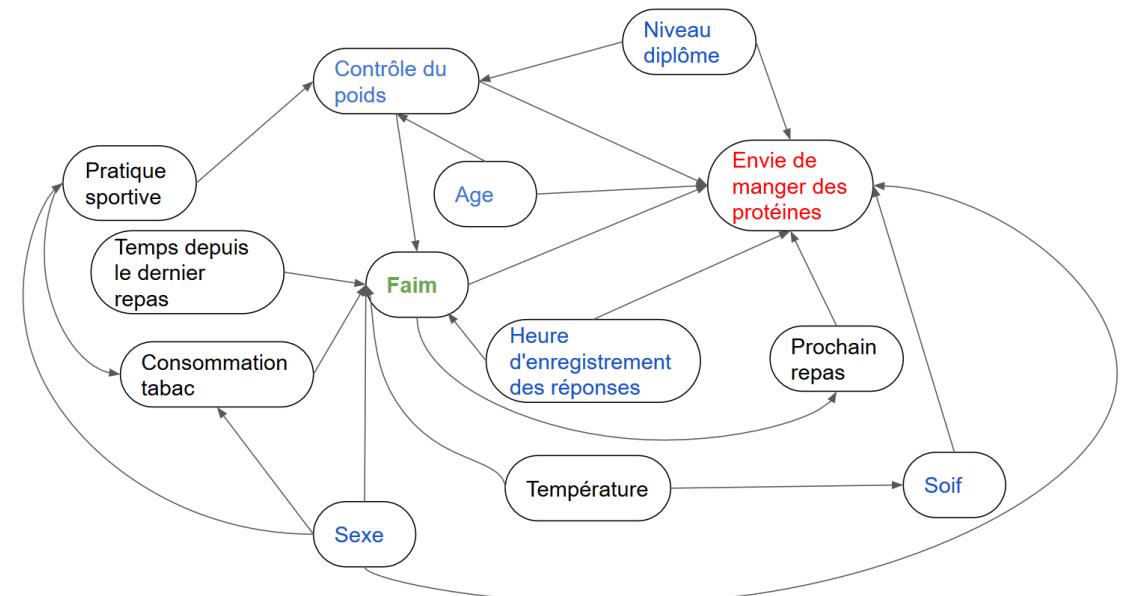
- Apprentissage « **prescriptif** » (recherche de **causalités**)

1. J'observe que les gens qui mangent des glaces sont souvent en maillot de bain
 2. Je voudrais vendre davantage de glaces
- Je demande aux gens de se mettre en maillot de bain

La recherche de relations causales

Qu'est-ce qui cause l'appétence pour des plats protéinés ?

- La **faim** ?
- L'**heure dans la journée** ?
- Le **genre** ?
- L'**aspect visuel** ?
- L'**aspect olfactif** ?
- La richesse en **protéines** des **repas précédents** ?
- ...



- Quelles **recommandations** faire à un consommateur pour qu'il baisse sa consommation d'aliments carnés ?
- Quel impact **si on double le prix de ...** ?
- Quel rendement aurais-je eu l'année dernière **si j'avais** planté du ... au lieu de ...

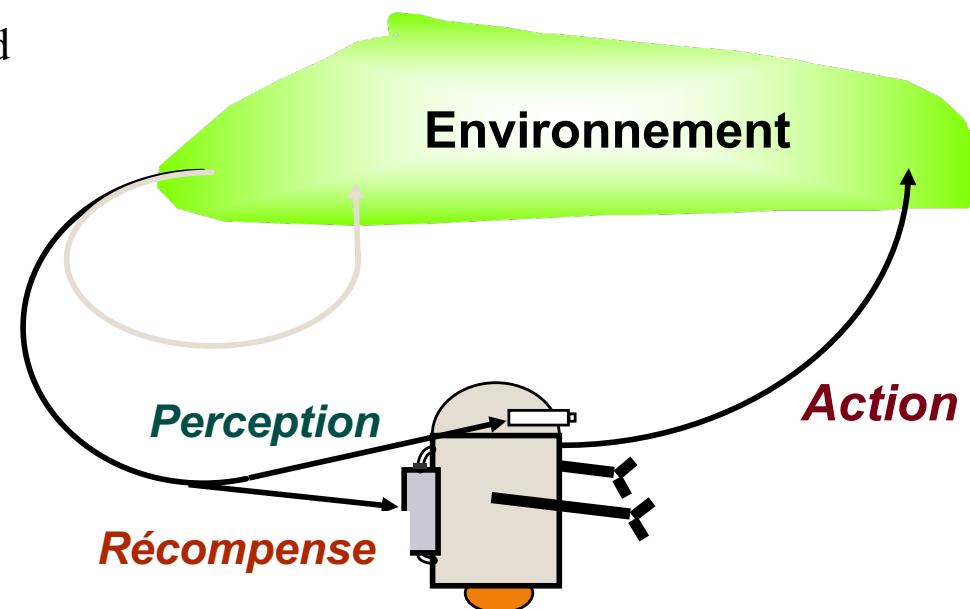
Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement

...

The learning data are

- A sequence of perceptions, actions and rewards $(s_t, a_t, r_t)_{t=1, \infty}$
 - With a reinforcement r_t
 - That can be related to past actions made far before t



The problem: infer a function

perceived situation → action

so as to maximise a gain over long term

$$R_t = r_{t+1} + \gamma r_{t+2} + \gamma^2 r_{t+3} + \dots + r_T = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1}$$

Akin to learning reflexes

Les grands types d'apprentissage

- Apprentissage « **par renforcement** » (comment (ré)agir)

1. **Piloter un hélicoptère**
2. **Apprendre à jouer au tennis de table**
3. Battre le champion de **back-gammon** (1992), de **Go** (2016)
4. **Gérer un porte-feuille d'investissements**
5. **Contrôler une usine de production électrique**

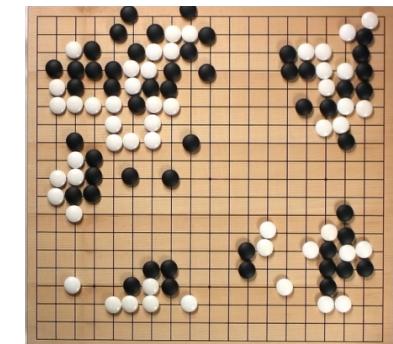
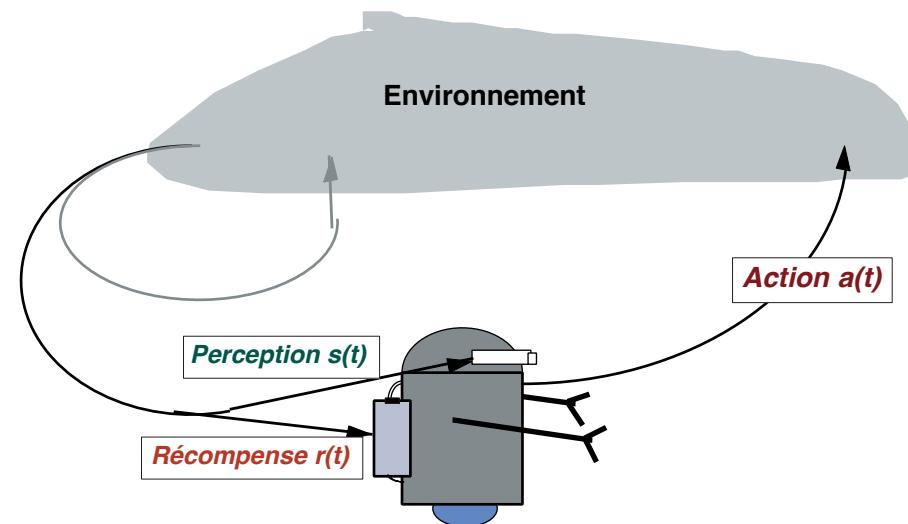
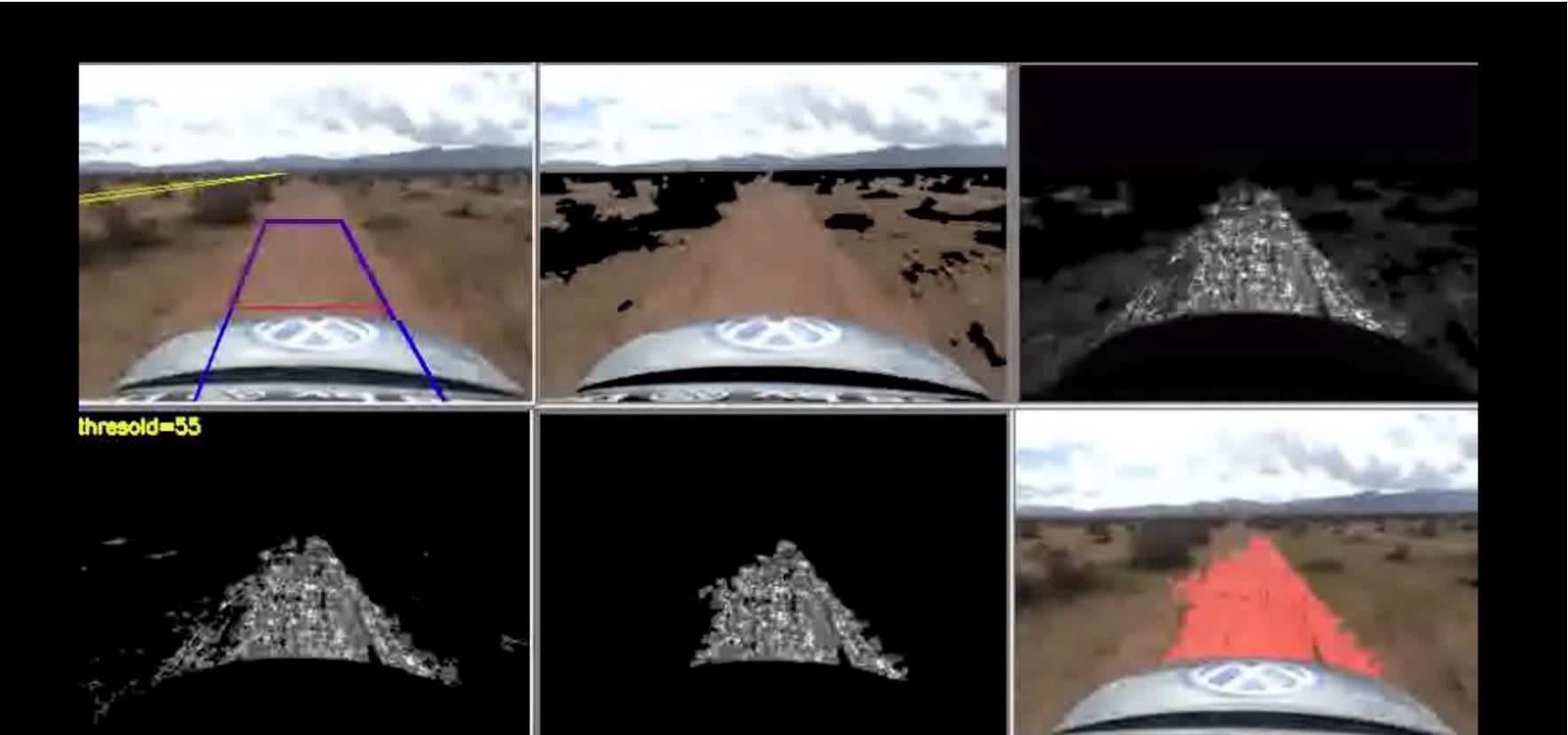


Illustration : Grand DARPA challenge (2005)



Illustration : Grand DARPA challenge (2005)



Fast adaptation: Mean & covariance of Gaussian, exponential forgetting
Slow learning: memory of k past Gaussians

C'est quoi des données ?

Les données : organisation et types

Identifiant	Genre	Age	Niveau études	Marié ?	Nb enfants	Revenu	Profession	A prospector ?
I_21	M	43	Bac+5	Oui	3	55 000	Architecte	OUI
I_34	M	25	Bac+2	Non	0	21 000	Infirmier	NON
I_38	F	34	Bac+8	Oui	2	35 000	Chercheuse	OUI
I_39	F	67	Bac	Oui	5	20 000	Retraitee	NON
I_58	F	56	CAP	Oui	4	27 000	Ouvrière	NON
I_73	M	40	Bac+3	Non	2	31 000	Commercial	OUI
I_81	F	51	Bac+5	Oui	3	75 000	Chef d'entreprise	OUI

Les données : organisation et types

Identifiant	Genre	Age	Niveau études	Marié ?	Nb enfants	Revenu	Profession	A prospector ?
I_21	M	43	Bac+5	Oui	3	55 000	Architecte	OUI
I_34	M	25	Bac+2	Non	0	21 000	Infirmier	NON
I_38	F	34	Bac+8	Oui	2	35 000	Chercheuse	OUI
I_39	F	67	Bac	Oui	5	20 000	Retraitée	NON
I_58	F	56	CAP	Oui	4	27 000	Ouvrière	NON
I_73	M	40	Bac+3	Non	2	31 000	Commercial	OUI
I_81	F	51	Bac+5	Oui	3	75 000	Chef d'entreprise	OUI

Exemple
(*example, instance*)

Descripteur
Attribut
(*feature*)

Étiquette
(*label*)

Les données

- **Vectorielles**

- Séquences

- Structurés

- Temporelles

- Spatiales

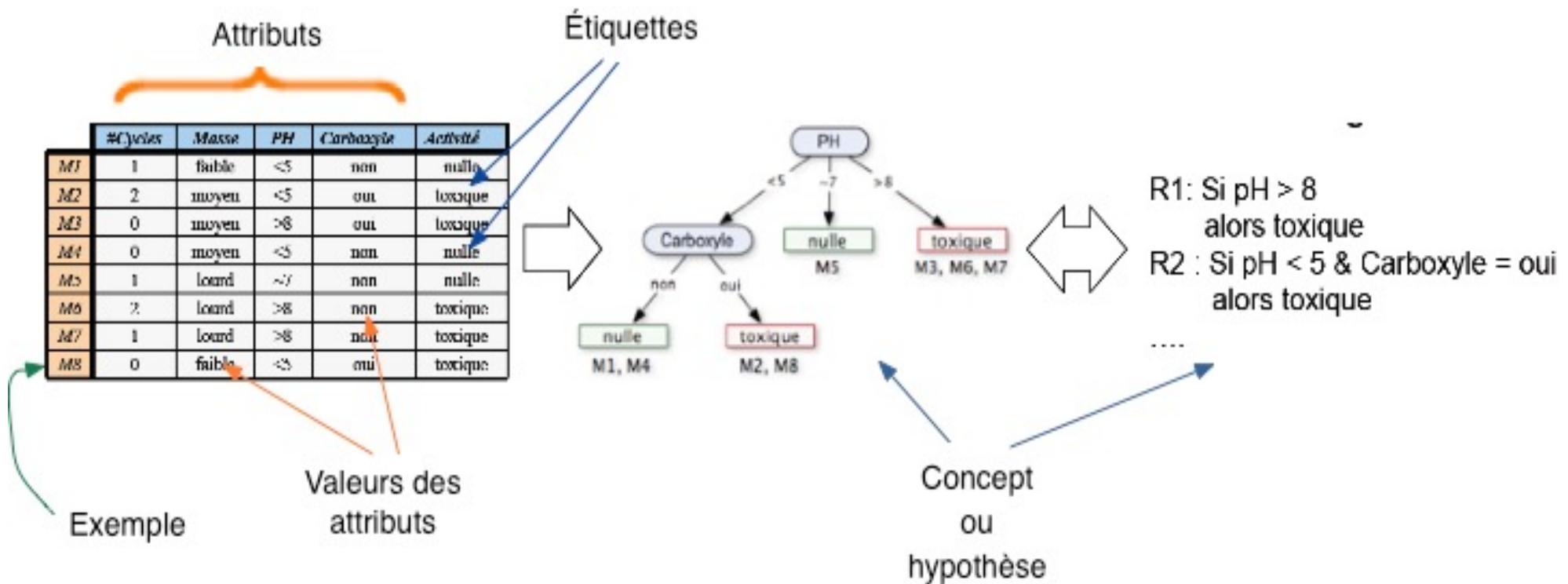
Identifiant	Genre	Age	Niveau études	Marié ?	Nb enfants	Revenu	Profession	A prospector ?
I_21	M	43	Bac+5	Oui	3	55 000	Architecte	OUI
I_34	M	25	Bac+2	Non	0	21 000	Infirmier	NON
I_38	F	34	Bac+8	Oui	2	35 000	Chercheuse	OUI
I_39	F	67	Bac	Oui	5	20 000	Retraitée	NON
I_58	F	56	CAP	Oui	4	27 000	Ouvrière	NON
I_73	M	40	Bac+3	Non	2	31 000	Commercial	OUI
I_81	F	51	Bac+5	Oui	3	75 000	Chef d'entreprise	OUI

Exemple
(*example, instance*)

Descripteur
Attribut
(*feature*)

Étiquette
(*label*)

Induction supervisée



Les données

- Vectorielles

La protéine « sp|P00004|CYC_HORSE » est activée par ...

- Séquences

- Structurés

- Temporelles

- Spatiales

```
1 ttcagttgt aatgaatgga cgtgccaaat agacgtgccg ccggccgctcg attcgcactt  
61 tgcttcgtt ttgccgtcg tttcacgcgt ttagttccgt tcggttcatt cccagttctt  
121 aaataccgga cgtaaaaata cactctaacg gtcccgcgaa gaaaaagata aagacatctc  
181 gtagaaatat taaaataaat tcctaaagtc gttggttct cgttcacttt cgctgcctgc  
...  
4021 agaacacgccc gaggctccat tcatacgacc acttcgtcgt cttaatcccc tccctcatcc  
4081 gccatggcgg tgcaaaaaat aaaaagaact c
```

```
DEVICE=eth0  
BOOTPROTO=none  
ONBOOT=yes  
IPADDR=192.168.0.X  
NETMASK=255.255.255.0  
GATEWAY=192.168.0.254  
search exemple.com namserver  
192.168.0.254
```

Les données

- Vectorielles

Logique du 1^{er} ordre :

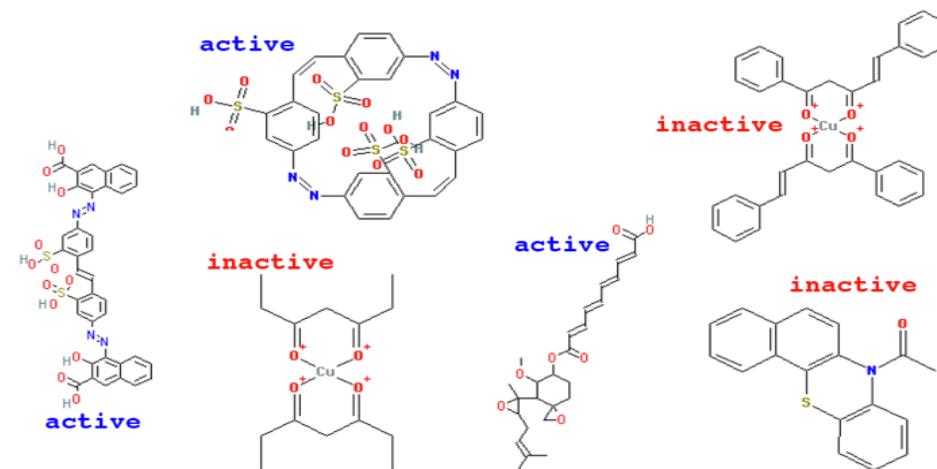
bloc(B1) & surtable(B2) & au-dessus(B1,B2) & ...

- Séquences

- Structurés

- Temporelles

- Spatiales

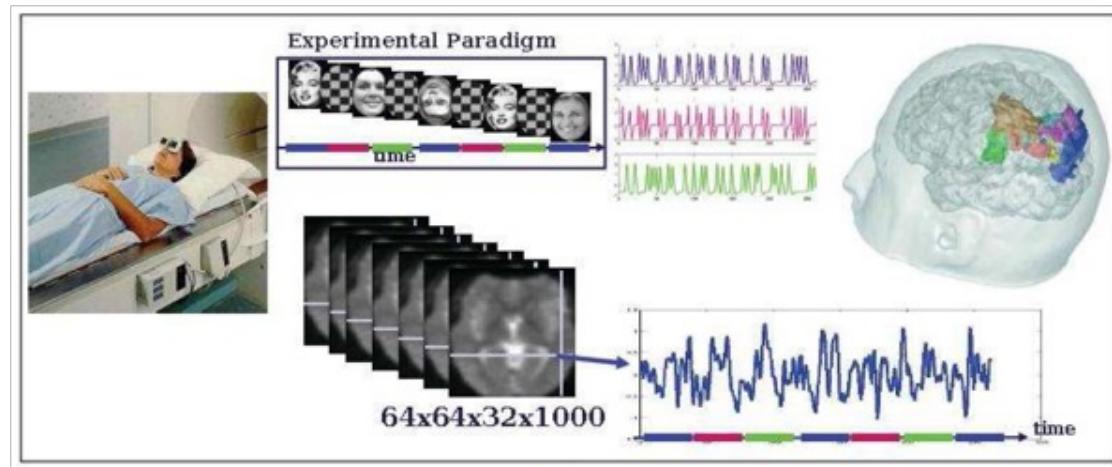


NCI AIDS screen results (from <http://cactus.nci.nih.gov>).

Les données

- Vectorielles
- Séquences
- Structurés
- **Temporelles**
- Spatiales

• Apprentissage supervisé : interprétation d'IRMf



Trouble de la reconnaissance de visage ou non

Les données

- Vectorielles



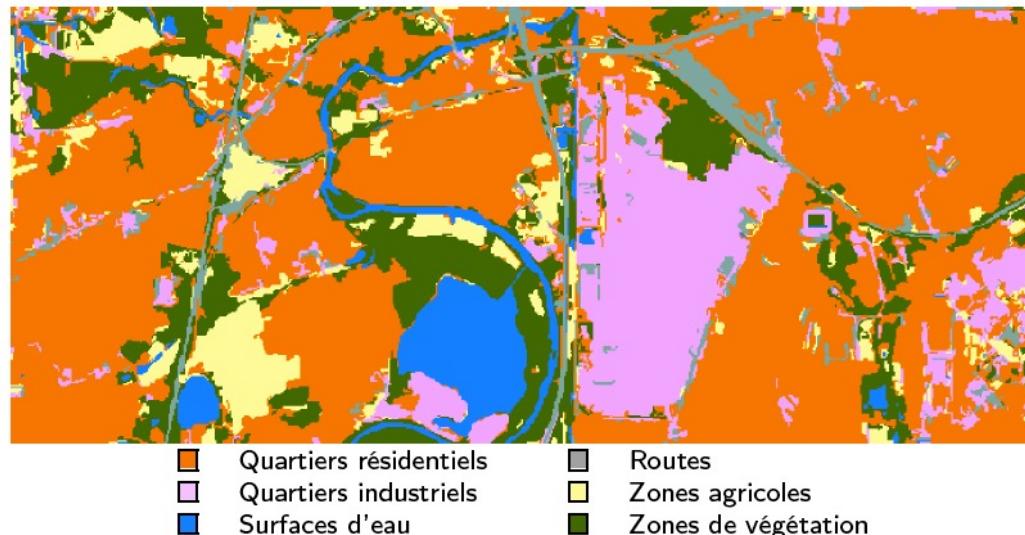
Image MRS

- Séquences

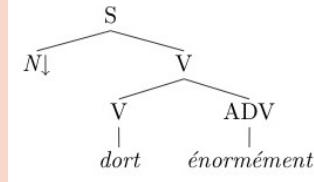
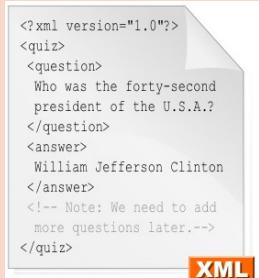
- Structurés

- Temporelles

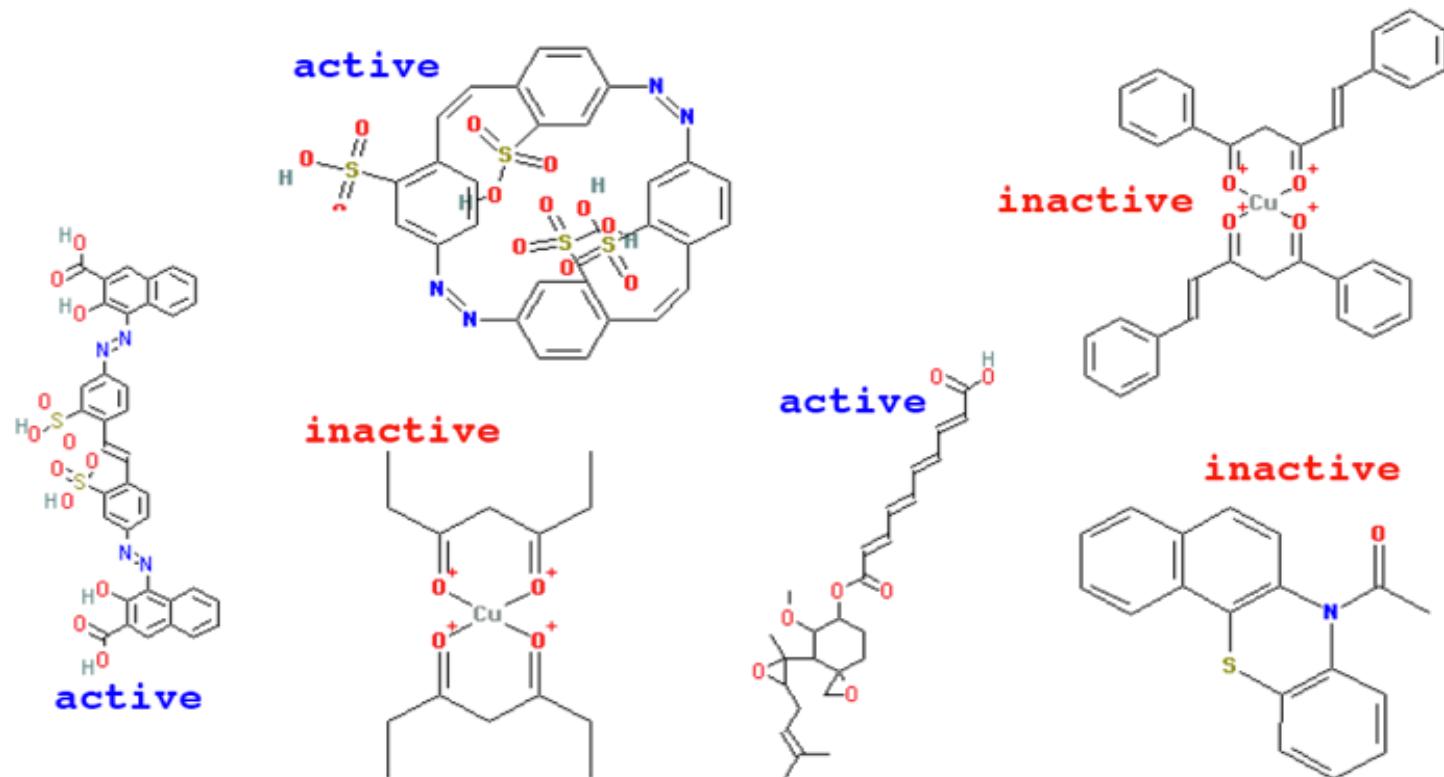
- **Spatiales**



Types de formats

Numérique continue (R)	Compte en banque : 12 915,86 €
Numérique discrète (N ou Z)	Nombre d'enfants : 11
Binaire	Célibataire : vrai
Catégorie	Couleur dans {rouge, vert, bleu}
Texte	La protéine « sp P00004 CYC_HORSE » est activée par ...
Données structurées	Arbre, expression XML, ...  
Séquences	- Génome - Séquence de requêtes sur site web
Images, vidéos	

Apprentissage supervisé



NCI AIDS screen results (from <http://cactus.nci.nih.gov>).

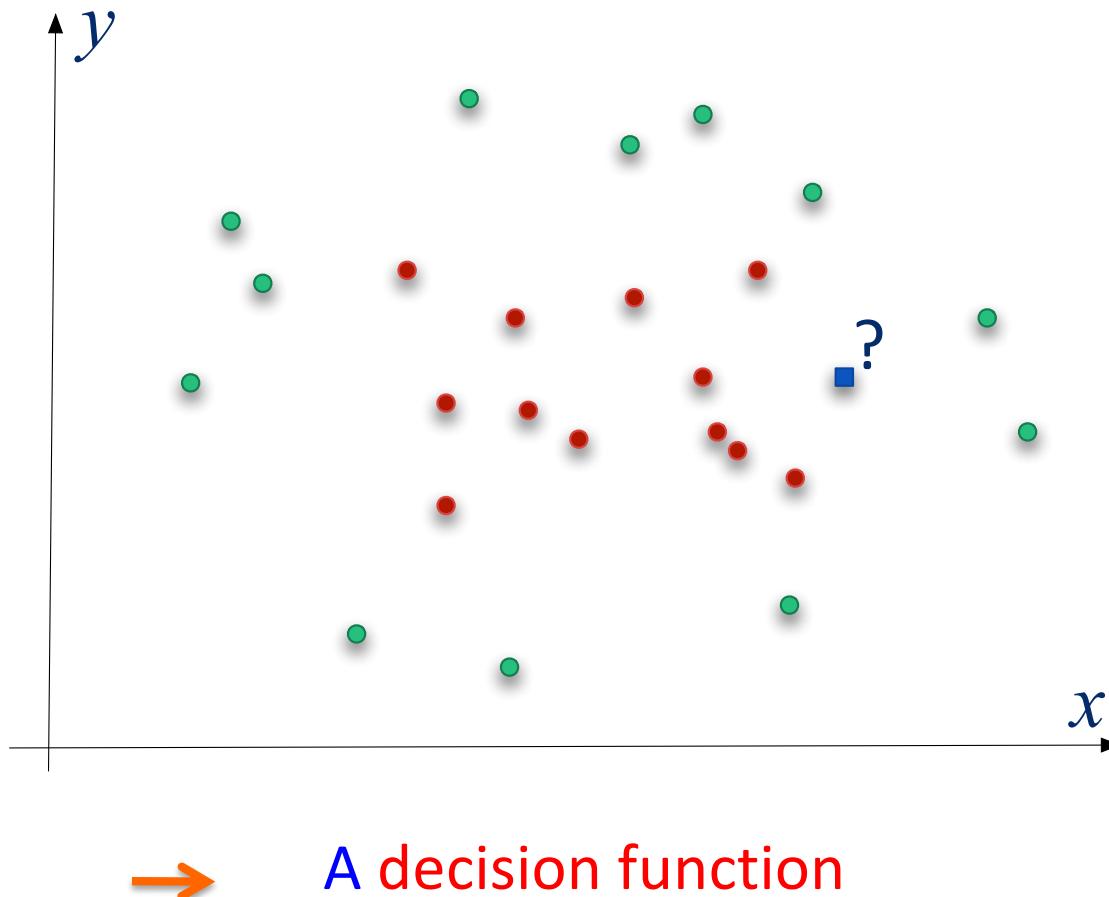
Plan

1. Une science de l'apprentissage ?
2. Les grands types d'apprentissage
3. Le problème de l'apprentissage supervisé
4. Apprendre dans un espace d'hypothèses structuré
5. Conclusion

Comment fonder l'induction ?

Supervised induction

- We want to be able to predict the class of unseen examples



Le problème de l'induction

- Exemples décrits par :
Nombre (1 ou 2); **taille** (petit ou grand); **forme** (cercle ou carré); **couleur** (rouge ou vert)
- De classe + ou -

Description	Votre prédition	Vraie classe

Combien de **fonctions possibles** de X vers Y ?

$$2^4 = 2^{16} = 65,536$$

Combien de fonctions **restent** après 6 exemples d'apprentissage? $2^{10} = 1024$

Le problème de l'induction

- Exemples décrits par :

Nombre (1 ou 2); **taille** (petit ou grand); **forme** (cercle ou carré); **couleur** (rouge ou vert)

15

Description	Votre prédition	Vraie classe
1 grand carré rouge		-
1 grand carré vert		+
2 petits carrés rouges		+
2 grands cercles rouges		-
1 grand cercle vert		+
1 petit cercle rouge		+
1 petit carré vert		-
1 petit r carré ouge		+
2 grands carrés verts		+
2 petits carrés verts		+
2 petits cercles rouges		+
1 petit cercle vert		-
2 grands cercles verts		-
2 petits cercles verts		+
1 grand cercle rouge		-
2 grands carrés rouges	?	

Combien de fonctions restantes ?



Le problème de l'induction

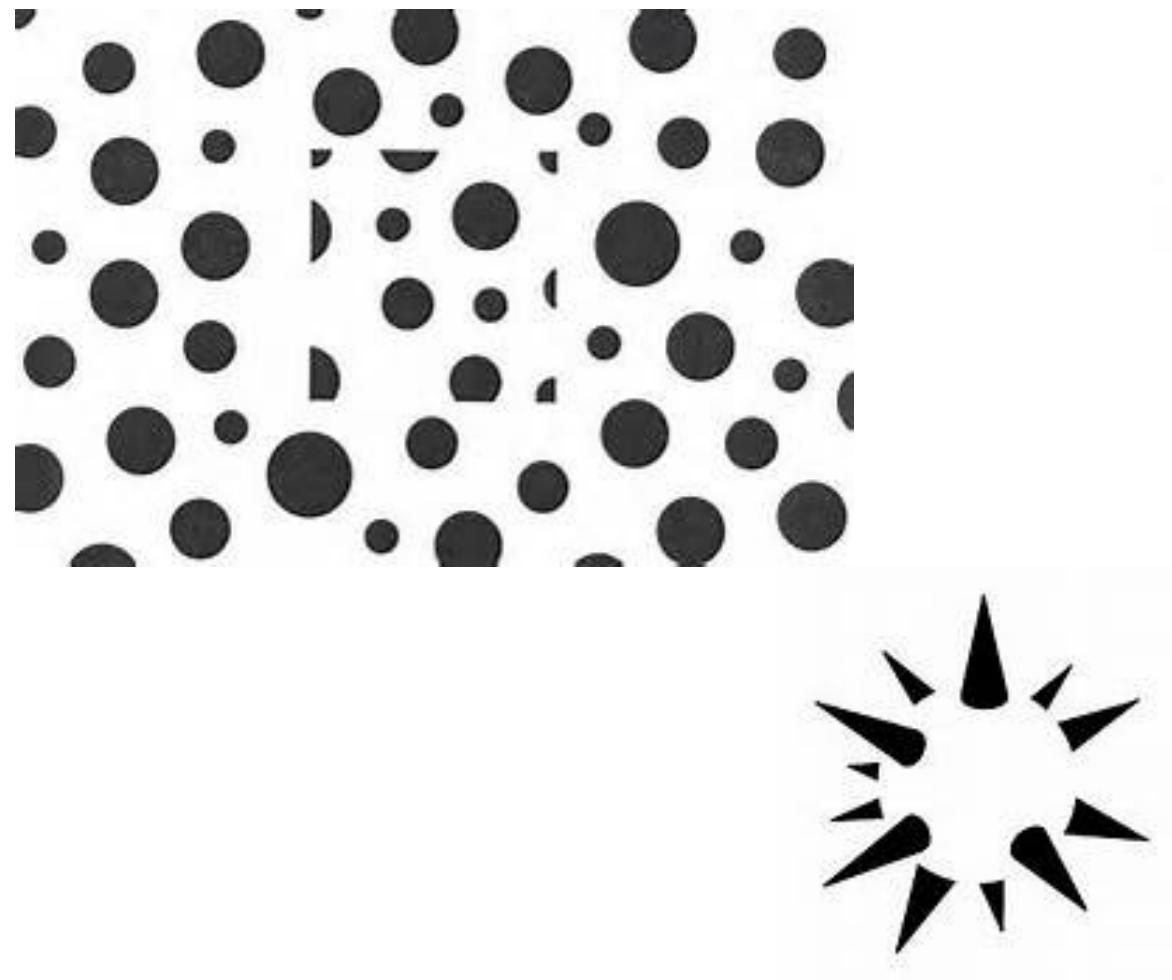
- Examples described using:
Number (1 or 2); **size** (small or large); **shape** (circle or square); **color** (red or green)

Description	Your prediction	True class
1 grand carré rouge		-
1 grand carré vert		+
2 petits carrés rouges		+
2 grands cercles rouges		-
1 grand cercle vert		+
1 petit cercle rouge		+

Combien de fonctions possibles avec 2 descripteurs de X à Y ? $2^2 = 2^4 = 16$

Combien de fonctions restent après 3 exemples différents ? $2^1 = 2$

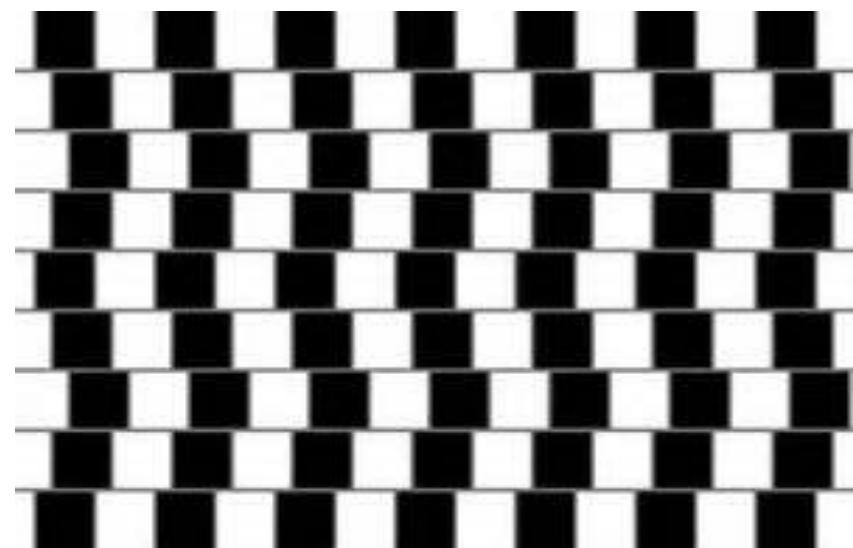
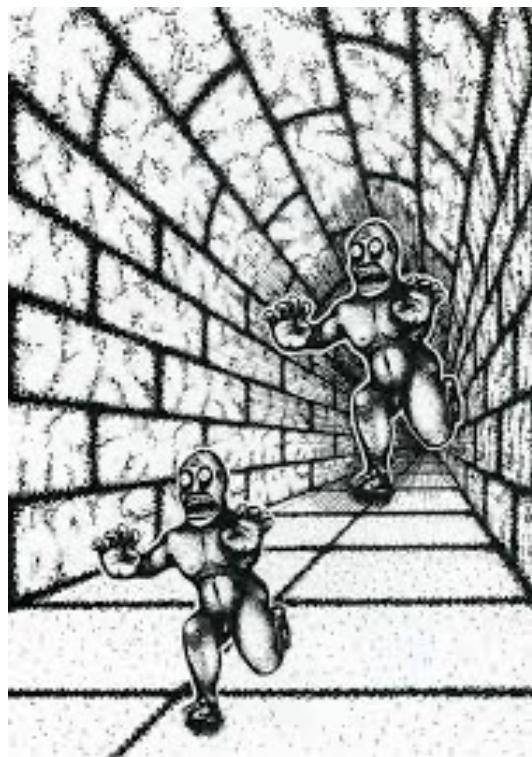
L'apprentissage – une extrapolation nécessitant des a priori



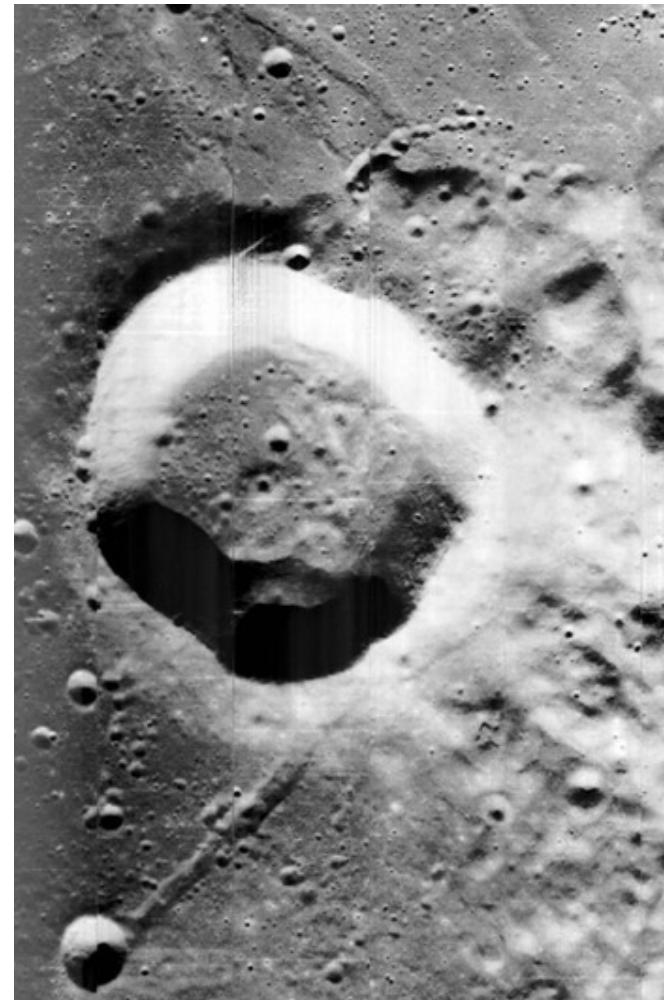
Interpreting – completion of percepts



Induction and its illusions



Induction et illusions



Cratère ou colline ?

Role of induction

- [Leslie Valiant, « *Probably Approximately Correct. Nature's Algorithms for Learning and Prospering in a Complex World* », Basic Books, 2013]

« From this, we have to conclude that **generalization** or **induction** is a **pervasive phenomenon** (...). It is as routine and reproducible a phenomenon as objects falling under gravity. It is **reasonable to expect** a **quantitative scientific explanation** of this highly reproducible phenomenon. »

Induction: a double question

Some green emeralds => all emeralds are green

In each case:

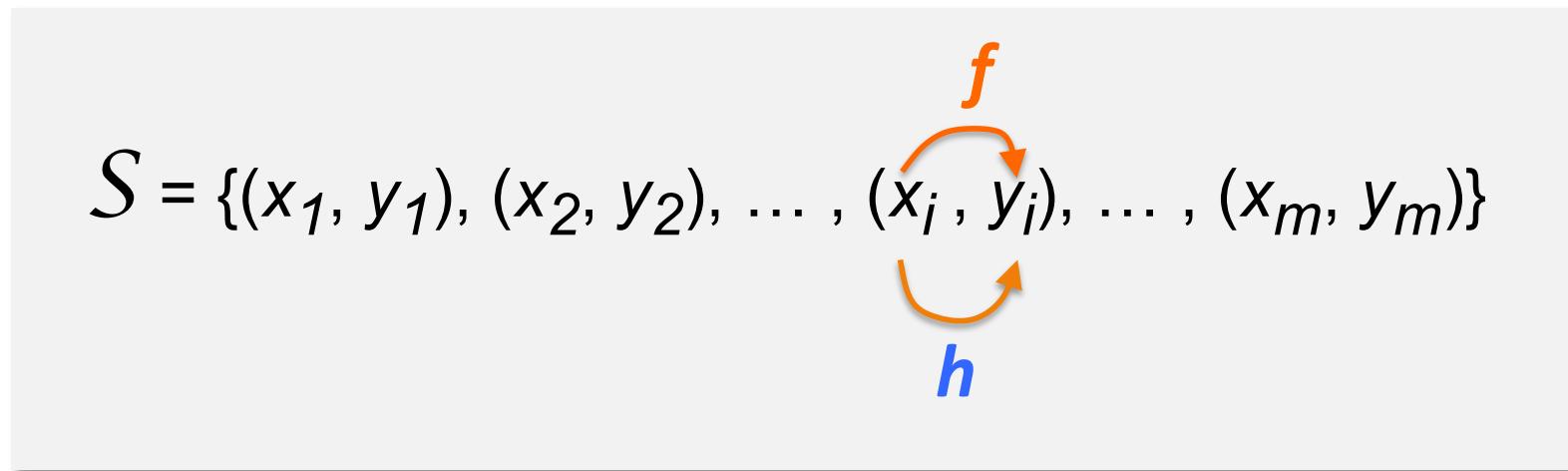
observations => laws / general rules or ways to adapt to new situations

1. How to find such rules? The problem of invention

2. Can we guarantee something about those “generalizations”?
The problem of justification

Supervised learning

- A *learning set*

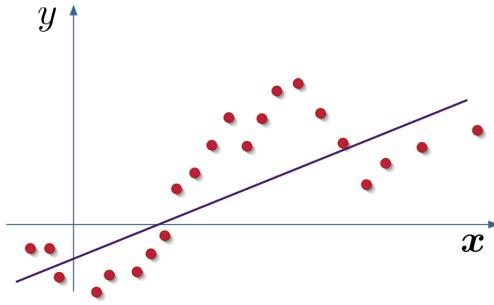


- Prediction for new examples $x \rightarrow h \rightarrow y ?$

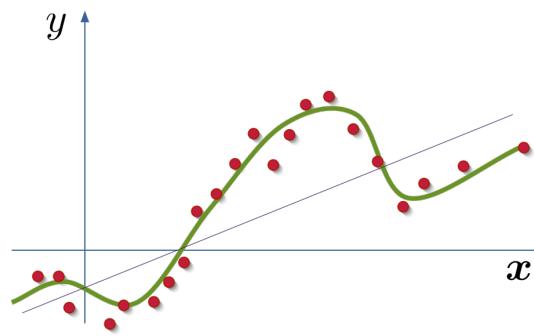
Induction: an impossible game?

- A bias is need
- Types of bias
 - Representation bias (declarative)
 - Research bias (procedural)

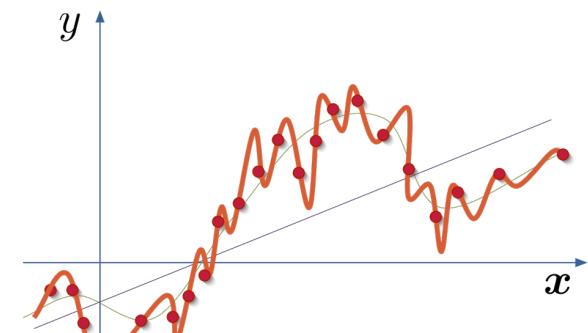
Comment garantir un niveau de performance ?



Sous-apprentissage

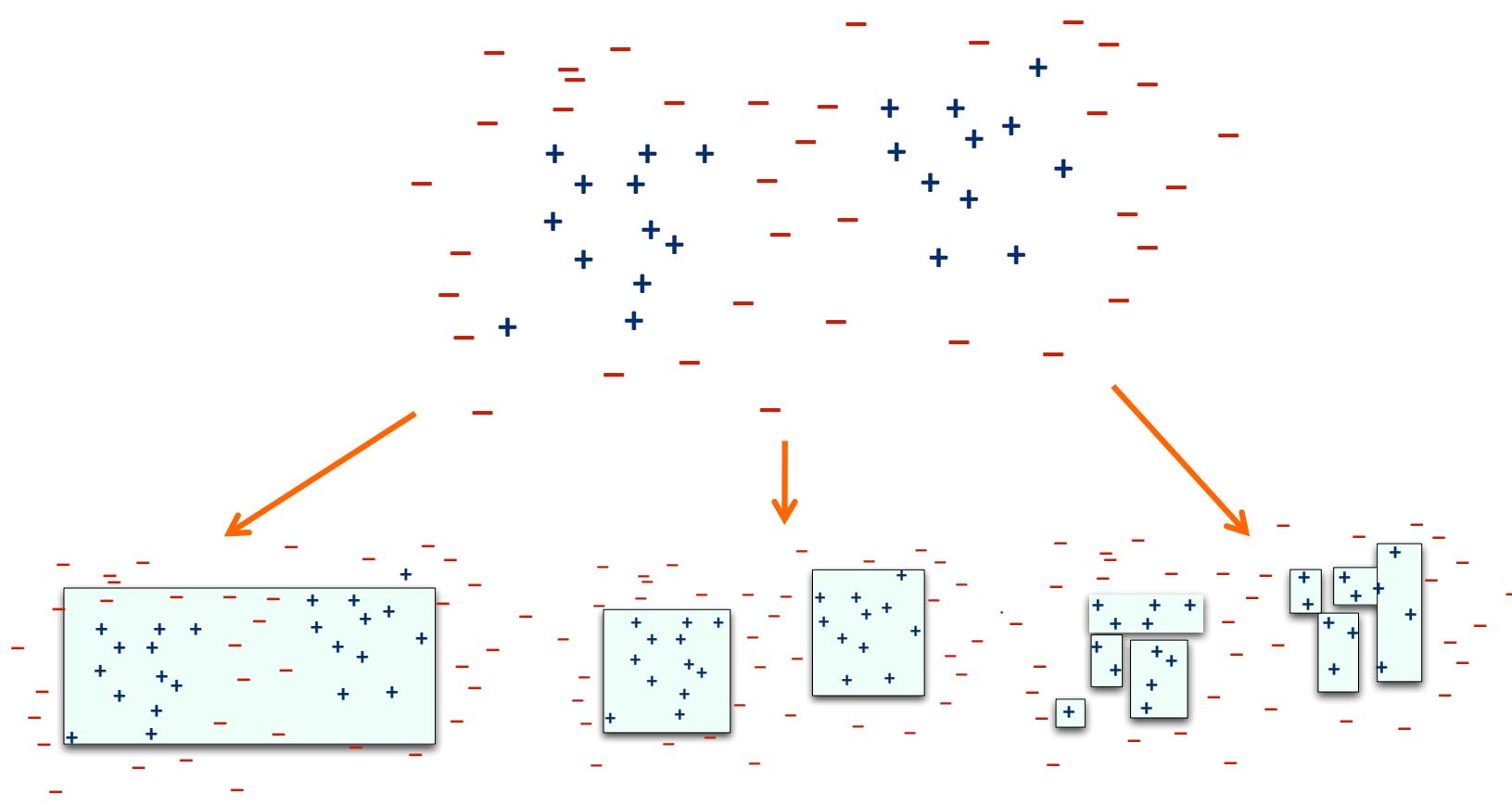


Bon-apprentissage



Sur-apprentissage

Comment garantir un niveau de performance ?



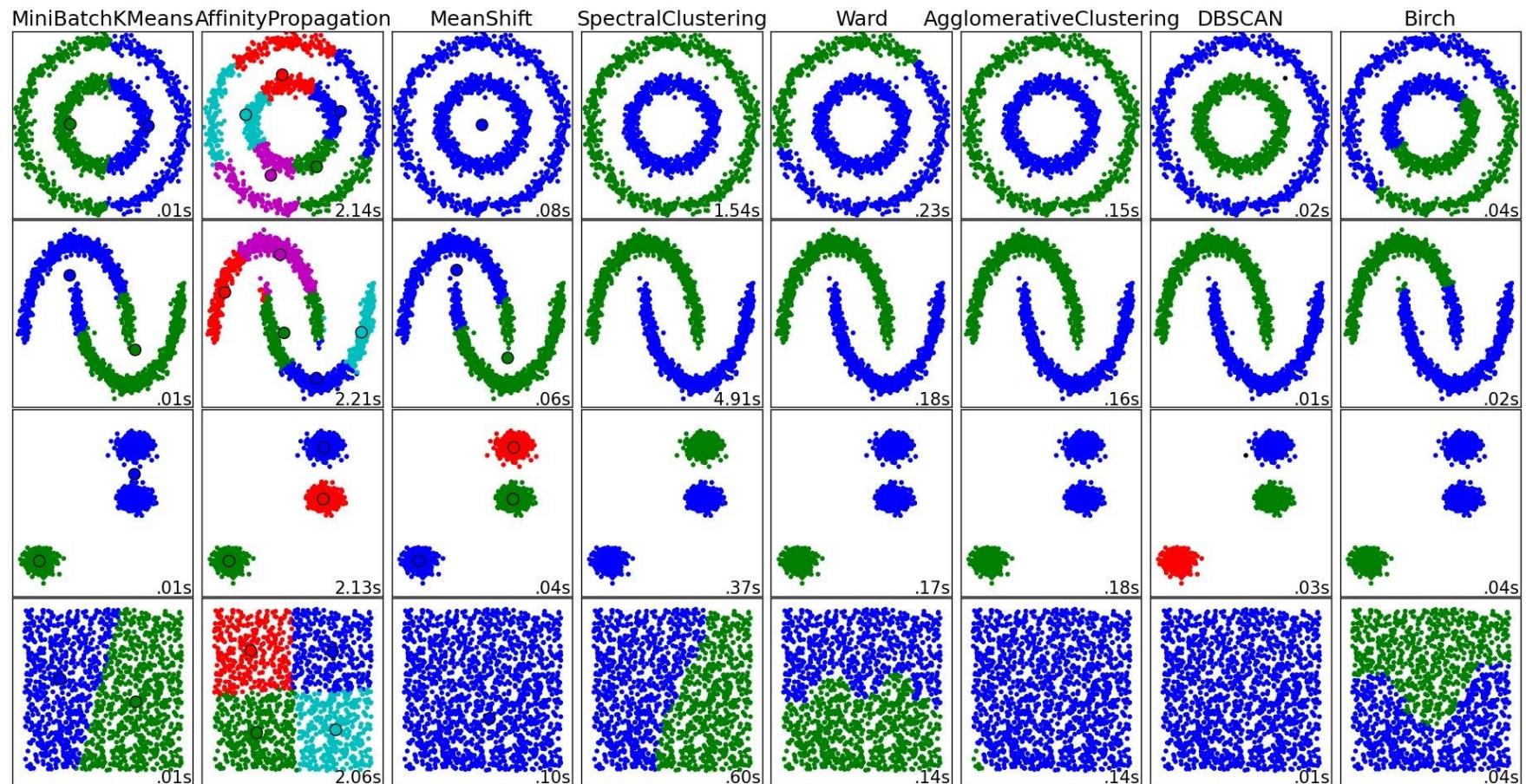
Sous-apprentissage

Bon-apprentissage

Sur-apprentissage

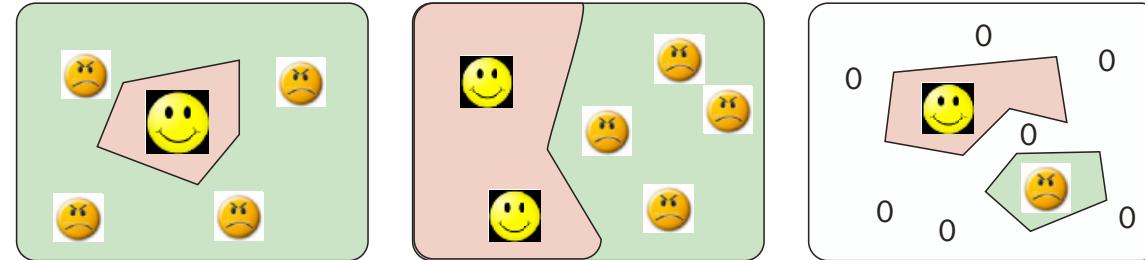
Illustration : le clustering

Les biais a priori sont nécessaires et ... il faut bien les choisir



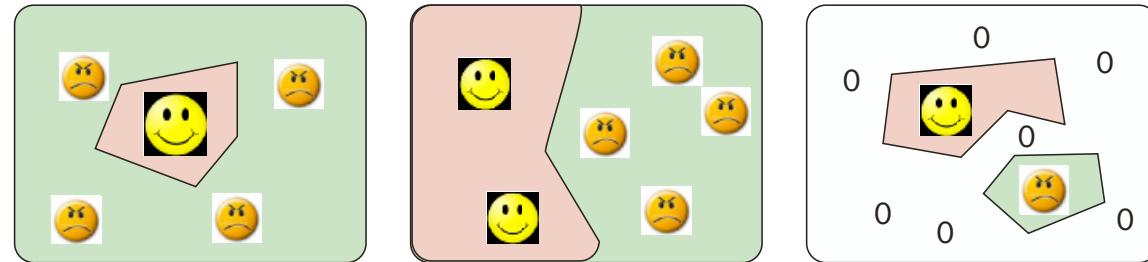
Le no-free-lunch theorem

Possible

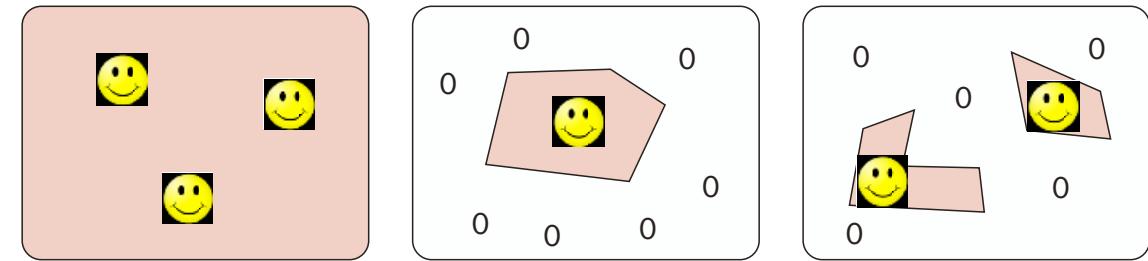


Le no-free-lunch theorem

Possible



Impossible



Il faut choisir le bon algorithme pour la classe de problèmes étudiée