

# Apprentissage automatique: un bref (et partiel) tour d'horizon



Liva Ralaivola, [liva.ralaivola@lif.univ-mrs.fr](mailto:liva.ralaivola@lif.univ-mrs.fr)  
5 juillet 2017, Marseille



# Outline

## Exorde – *captatio benevolentiae*

L'apprentissage automatique et la vie  
Graal : généralisation

## Narration

Positionnement

Perceptron : un voyage dans le temps, (1958–)

Perceptron multi-couches, réseaux de neurones : 15 ans de solitude

Méthodes à noyaux : la grâce

Adaboost : combinaison d'apprenants faibles

Bandits : dilemme exploration vs. exploitation

Une success story : AlphaGo

## Confirmation

## Péroraison

# Outline

## Exorde – *captatio benevolentiae*

L'apprentissage automatique et la vie

Graal : généralisation

## Narration

Positionnement

Perceptron : un voyage dans le temps, (1958–)

Perceptron multi-couches, réseaux de neurones : 15 ans de solitude

Méthodes à noyaux : la grâce

Adaboost : combinaison d'apprenants faibles

Bandits : dilemme exploration vs. exploitation

Une success story : AlphaGo

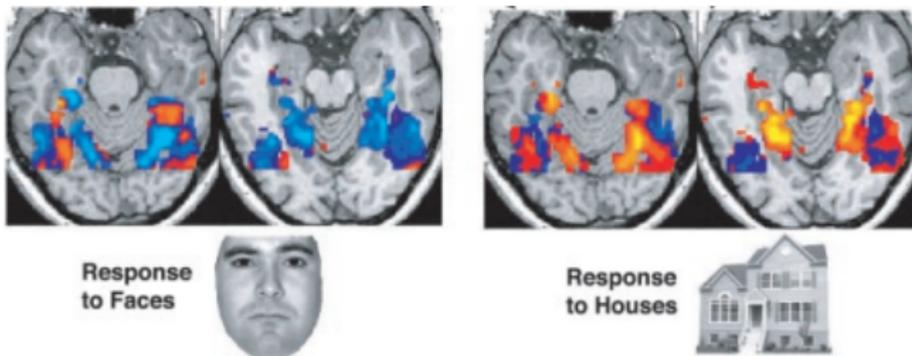
## Confirmation

## Péroraison

## Annotation/décodage d'images

4 → 4 2 → 2 3 → 3  
4 → 4 9 → 9 0 → 0  
5 → 5 7 → 7 1 → 1  
9 → 9 0 → 0 3 → 3  
6 → 6 7 → 7 4 → 4

(de Wolfram, ML Mathematica toolbox)



(de Haxby et al, 2001)

## Annotation/décodage d'images



(de Farabet et al, 2013)

# P300 Speller

## Vintage P300 Speller

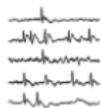


(de *Breaking bad*)

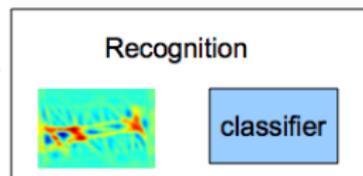
## Modern P300 Speller (de A. Rakotomamonjy)



EEG Signals

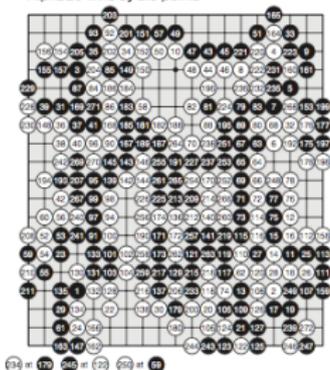


BCI

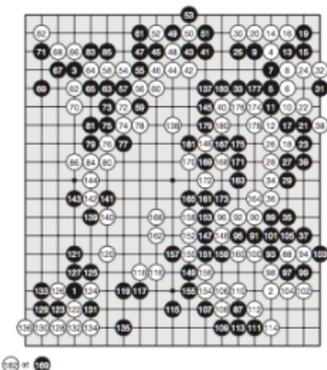


# AlphaGo (Silver et al. 2016)

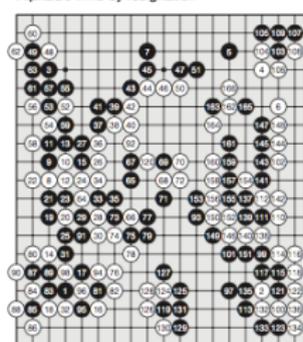
Game 1  
Fan Hui (Black), AlphaGo (White)  
AlphaGo wins by 2.5 points



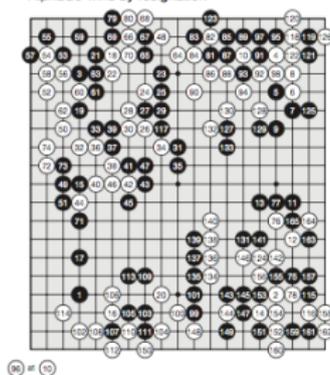
Game 2  
AlphaGo (Black), Fan Hui (White)  
AlphaGo wins by resignation



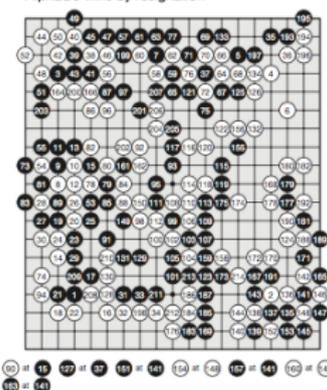
Game 3  
Fan Hui (Black), AlphaGo (White)  
AlphaGo wins by resignation



Game 4  
AlphaGo (Black), Fan Hui (White)  
AlphaGo wins by resignation



Game 5  
Fan Hui (Black), AlphaGo (White)  
AlphaGo wins by resignation



# Outline

## Exorde – *captatio benevolentiae*

L'apprentissage automatique et la vie

**Graal : généralisation**

## Narration

Positionnement

Perceptron : un voyage dans le temps, (1958–)

Perceptron multi-couches, réseaux de neurones : 15 ans de solitude

Méthodes à noyaux : la grâce

Adaboost : combinaison d'apprenants faibles

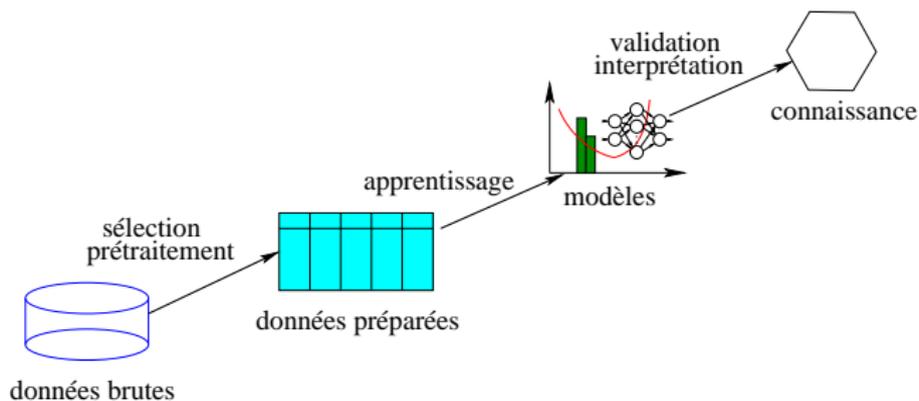
Bandits : dilemme exploration vs. exploitation

Une success story : AlphaGo

## Confirmation

## Péroraison

## Processus, généralisation



### Problématique : généralisation

Procédures capables à partir de couples (**mesure**, **cible**), de créer une fonction ou un **prédicteur** qui, étant donné une mesure, *estime* la cible qui lui correspond.

# Outline

## Exorde – *captatio benevolentiae*

L'apprentissage automatique et la vie  
Graal : généralisation

## Narration

### Positionnement

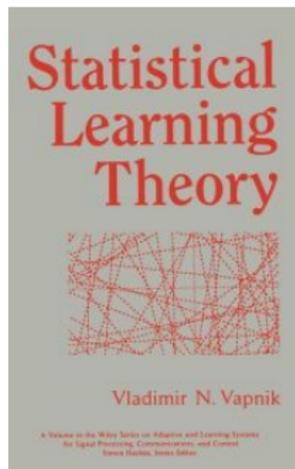
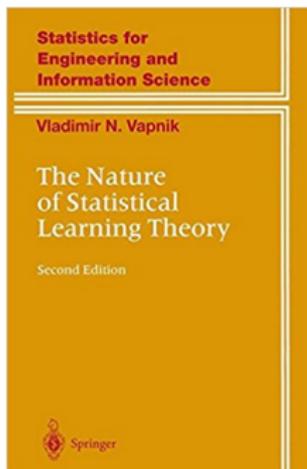
Perceptron : un voyage dans le temps, (1958–)  
Perceptron multi-couches, réseaux de neurones : 15 ans de solitude  
Méthodes à noyaux : la grâce  
Adaboost : combinaison d'apprenants faibles  
Bandits : dilemme exploration vs. exploitation  
Une success story : AlphaGo

## Confirmation

## Péroraison

## Positionnement

V. Vapnik pose, à la fin des années 70, les bases mathématiques de l'**apprentissage automatique/statistique**, à l'intersection de l'informatique, la statistique mathématique, l'optimisation.



# Outline

## Exorde – *captatio benevolentiae*

L'apprentissage automatique et la vie

Graal : généralisation

## Narration

Positionnement

**Perceptron : un voyage dans le temps, (1958–)**

Perceptron multi-couches, réseaux de neurones : 15 ans de solitude

Méthodes à noyaux : la grâce

Adaboost : combinaison d'apprenants faibles

Bandits : dilemme exploration vs. exploitation

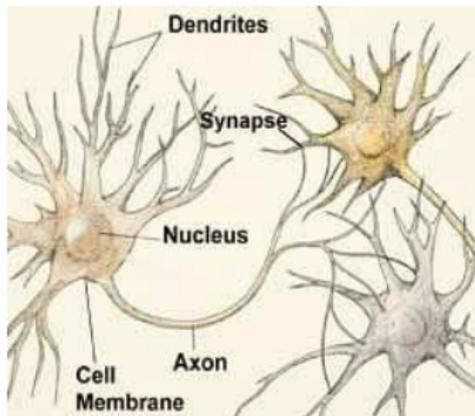
Une success story : AlphaGo

## Confirmation

## Péroraison

# Perceptron, cas binaire, (Rosenblatt, 1958)

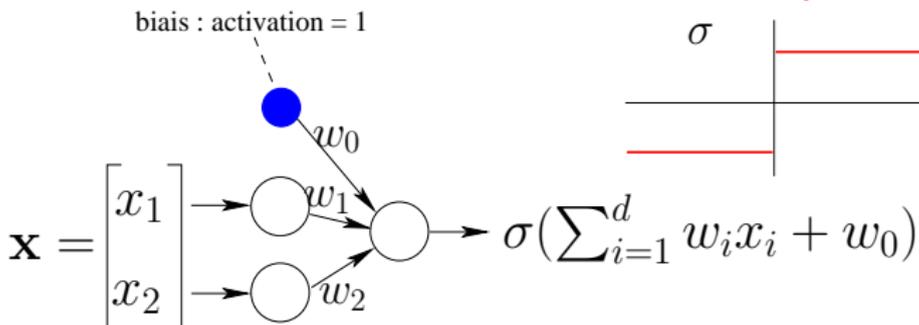
Inspiration : réseaux de neurones (réels)



Motivations biologiques :

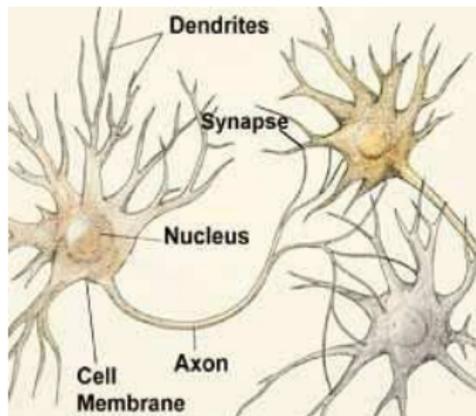
- ▶ Systèmes apprenants composés de plusieurs unités de calcul simples connectées
- ▶ Capacité de mémoire/adaptabilité de ces systèmes

Perceptron : un classifieur linéaire,  $\mathcal{X} = \mathbb{R}^d$ ,  $\mathcal{Y} = \{-1, +1\}$



# Perceptron, cas binaire, (Rosenblatt, 1958)

Inspiration : réseaux de neurones (réels)



Motivations biologiques :

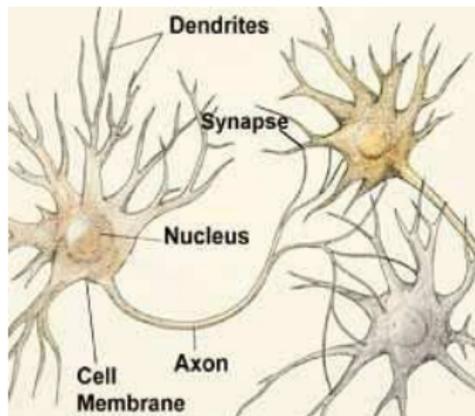
- ▶ Systèmes apprenants composés de plusieurs unités de calcul simples connectées
- ▶ Capacité de mémoire/adaptabilité de ces systèmes

Perceptron : un classifieur linéaire,  $\mathcal{X} = \mathbb{R}^d$ ,  $\mathcal{Y} = \{-1, +1\}$

- ▶ Paramètre du classifieur :  $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^d$
- ▶ Prédiction du classifieur :  $f(\mathbf{x}) = \text{sign}\langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle$
- ▶ Question : comment déterminer (apprendre)  $\mathbf{w}$  à partir d'observations

## Perceptron, cas binaire, (Rosenblatt, 1958)

Inspiration : réseaux de neurones (réels)



Motivations biologiques :

- ▶ Systèmes apprenants composés de plusieurs unités de calcul simples connectées
- ▶ Capacité de mémoire/adaptabilité de ces systèmes

Algorithme :  $S = \{(X_n, Y_n)\}_{n=1}^N$

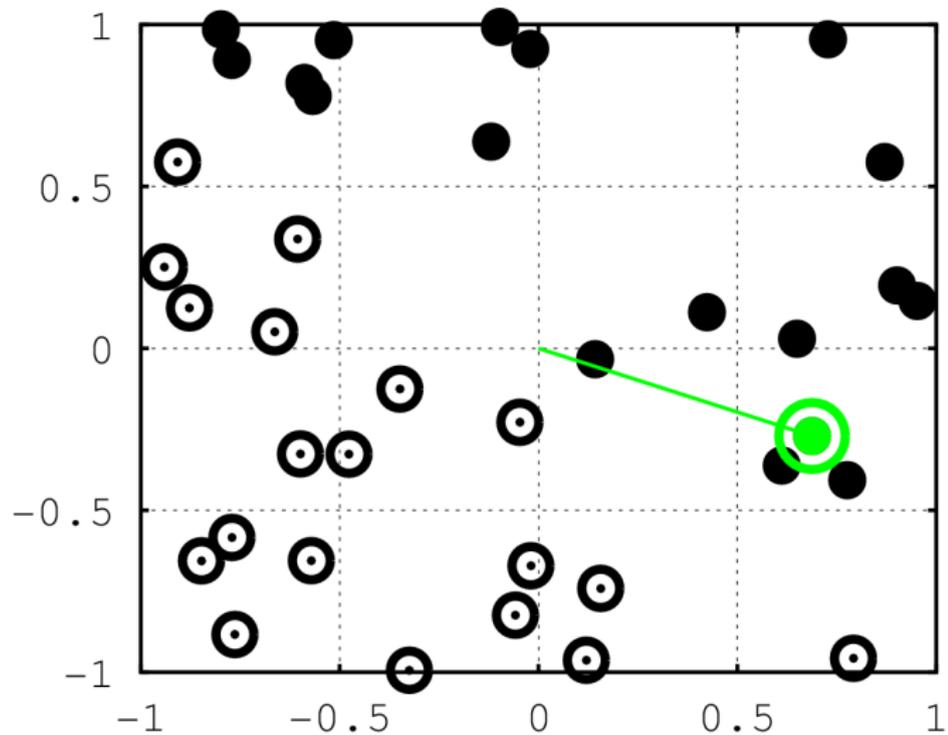
$\mathbf{w} \leftarrow \mathbf{0}$

Tant que il existe  $(X_n, Y_n) : Y_n \langle \mathbf{w}, X_n \rangle \leq 0$  faire

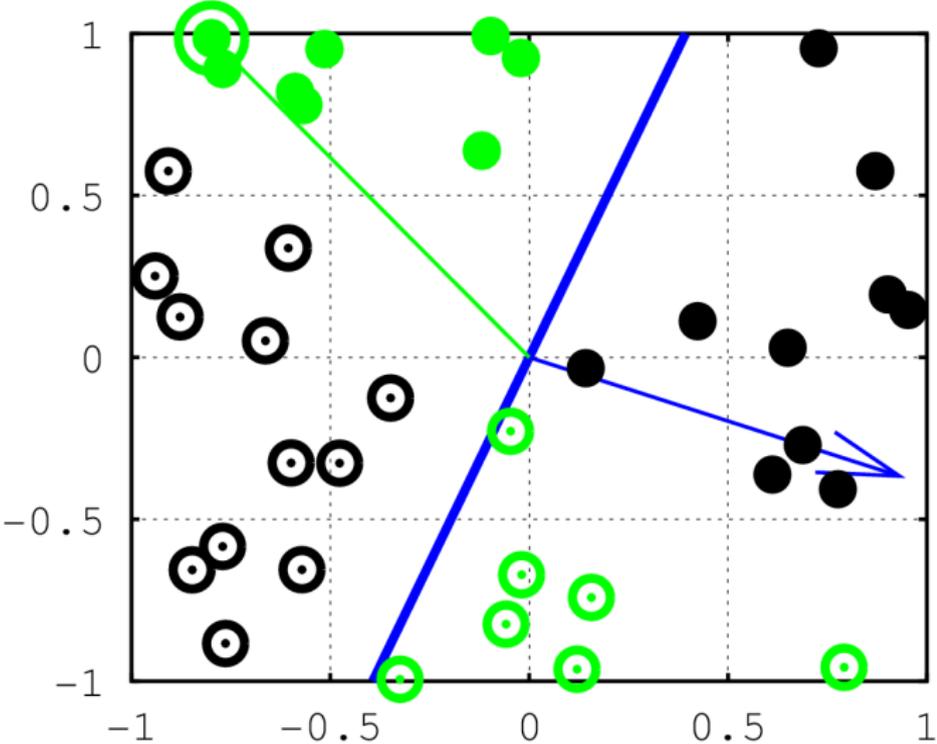
$\mathbf{w} \leftarrow \mathbf{w} + Y_n X_n$

fin Tant que

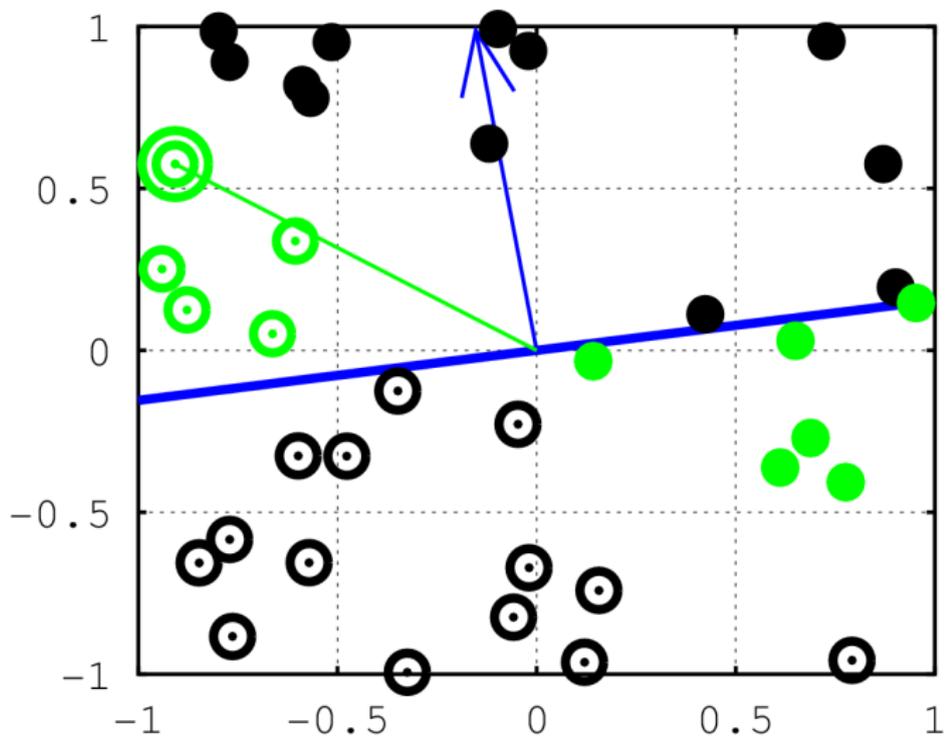
## Perceptron en action



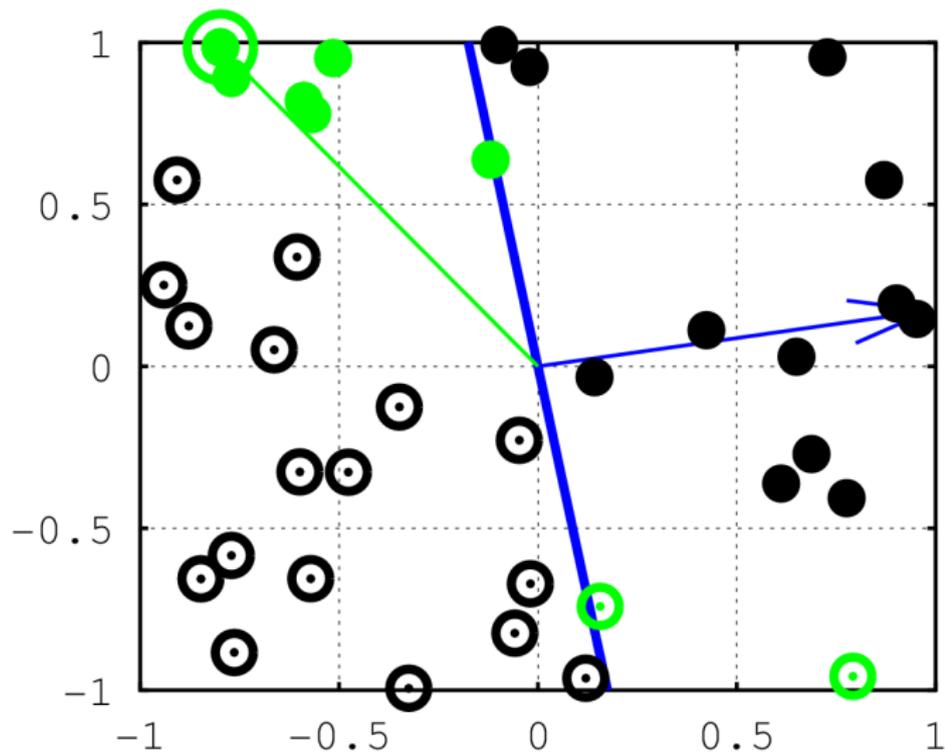
# Perceptron en action



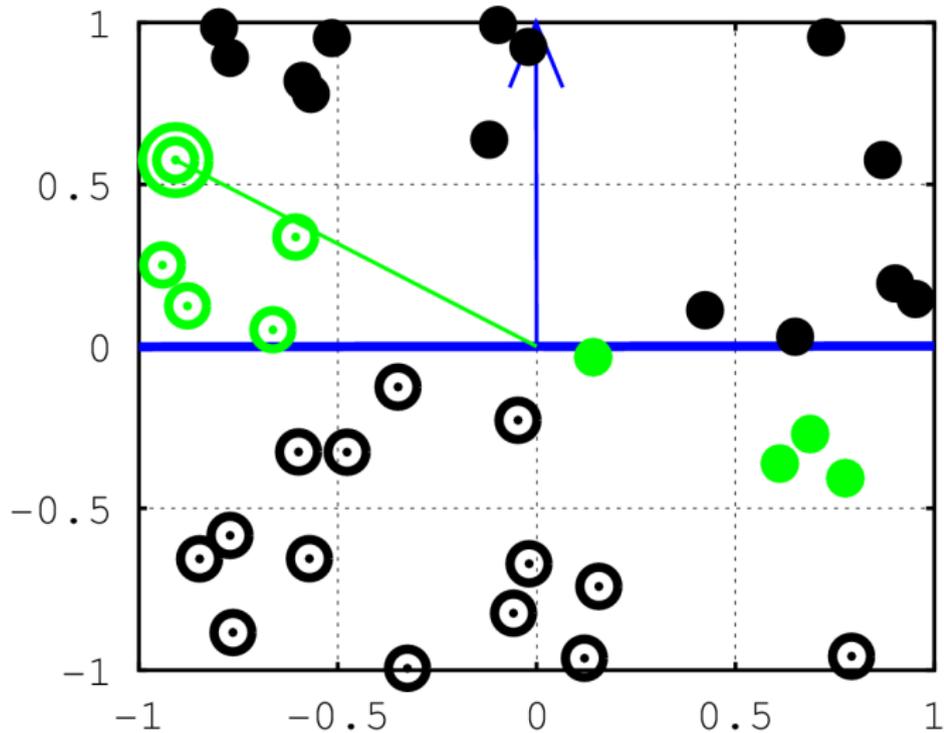
# Perceptron en action



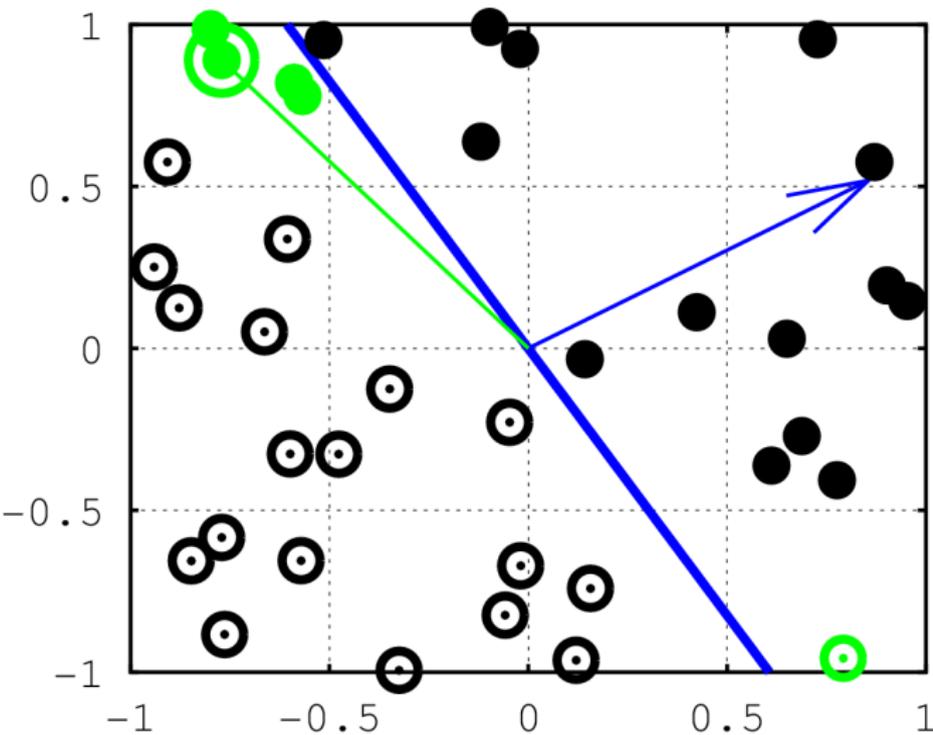
# Perceptron en action



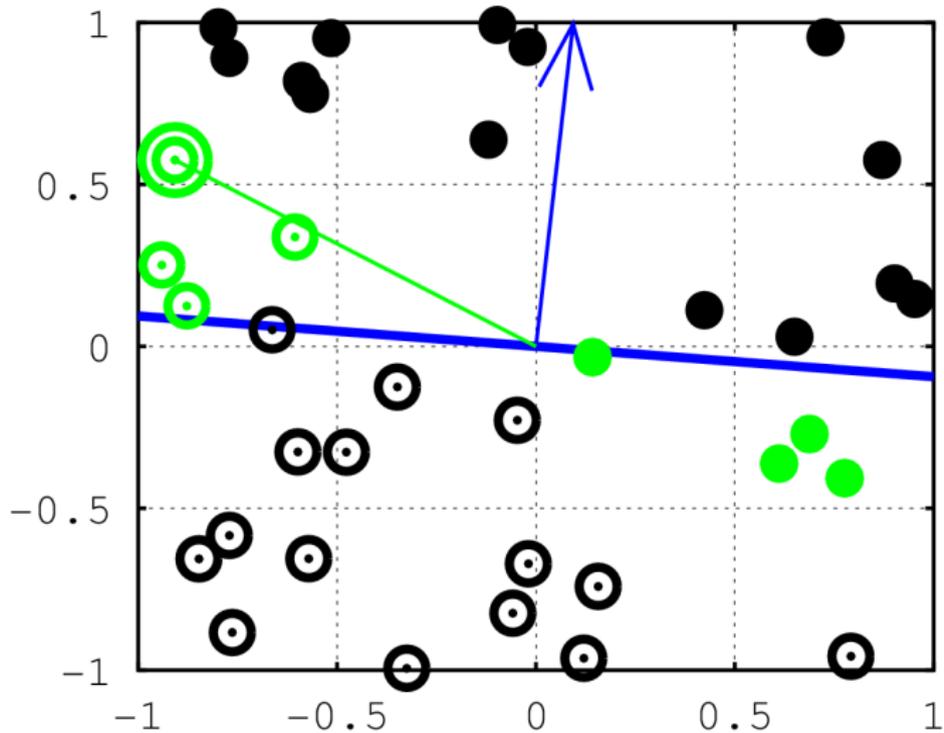
# Perceptron en action



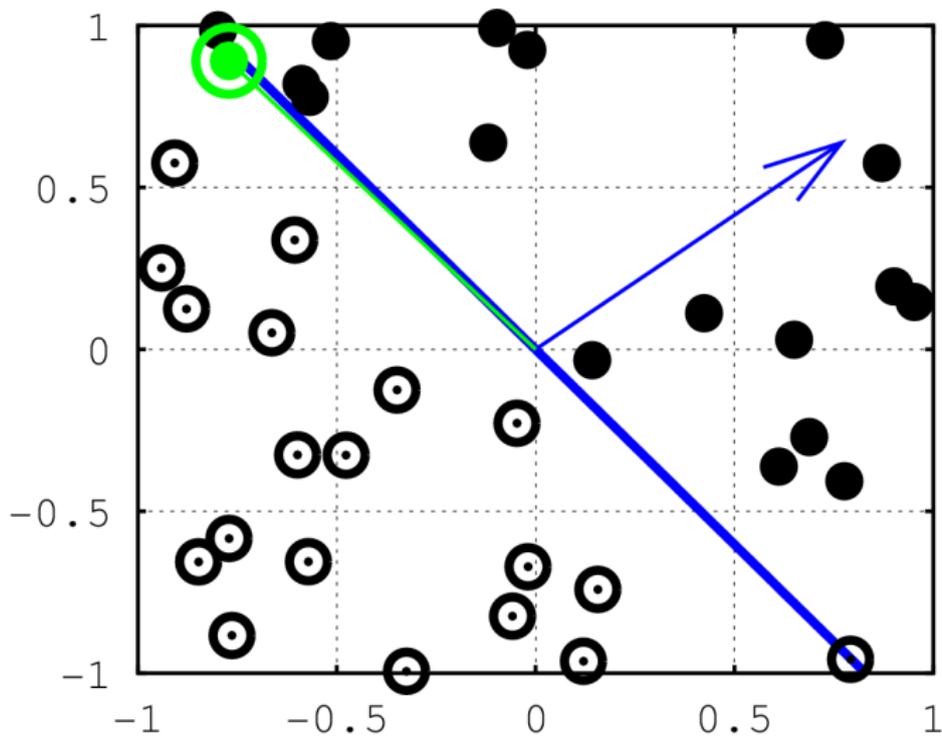
# Perceptron en action



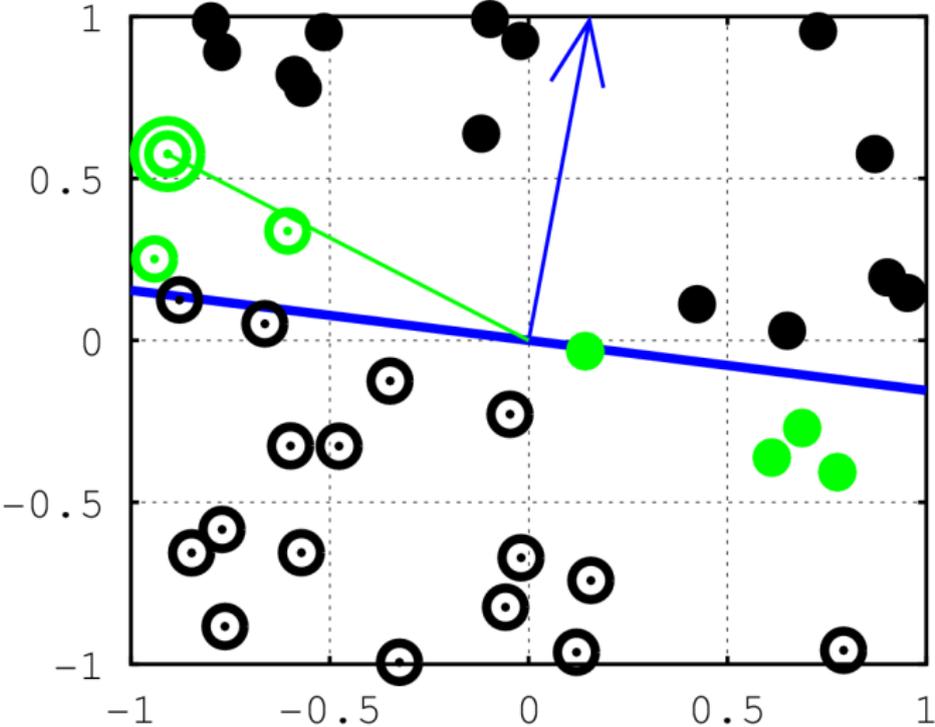
# Perceptron en action



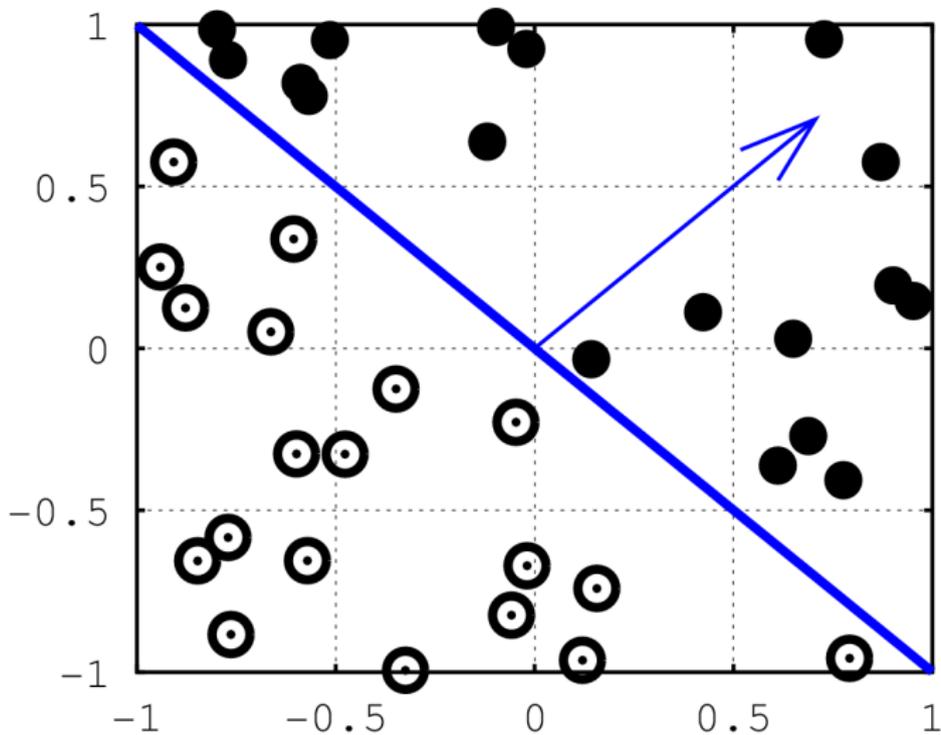
# Perceptron en action



# Perceptron en action



# Perceptron en action



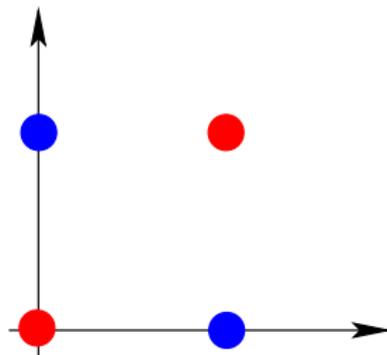
## Perceptron : quelques résultats

Théorème (Nombre d'itérations, Novikoff, 1962)

*S'il existe  $\gamma > 0$ ,  $\mathbf{w}^*$ ,  $\|\mathbf{w}^*\| = 1$ ,  $\|X_n\| \leq R$ ,  $\forall n = 1, \dots, N$ , et  $Y_n \langle \mathbf{w}^*, X_n \rangle \geq \gamma$  alors l'algorithme du perceptron converge en moins de  $R^2/\gamma^2$  itérations*

Théorème (XOR, Minsky, Papert, 1969)

*L'algorithme du perceptron ne peut résoudre le problème du XOR*



Théorème (Erreur en généralisation, Vapnik et Chevonenkis, 1979)

$\forall \mathbf{w} \in \mathbb{R}^d$  : avec grande probabilité

$$R(w) \leq \hat{R}(\mathbf{w}, S) + \tilde{O} \left( \sqrt{\frac{d}{n}} \right)$$

# Outline

## Exorde – *captatio benevolentiae*

L'apprentissage automatique et la vie

Graal : généralisation

## Narration

Positionnement

Perceptron : un voyage dans le temps, (1958–)

**Perceptron multi-couches, réseaux de neurones : 15 ans de solitude**

Méthodes à noyaux : la grâce

Adaboost : combinaison d'apprenants faibles

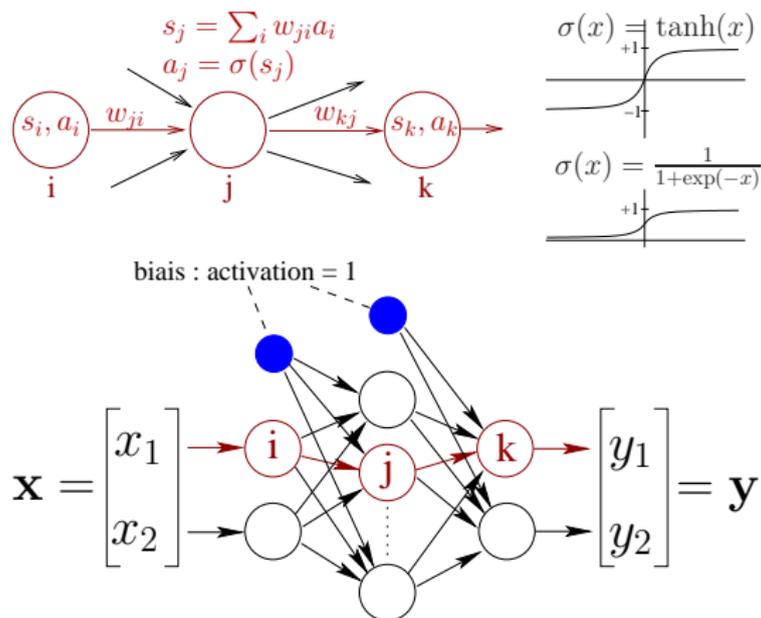
Bandits : dilemme exploration vs. exploitation

Une success story : AlphaGo

## Confirmation

## Péroraison

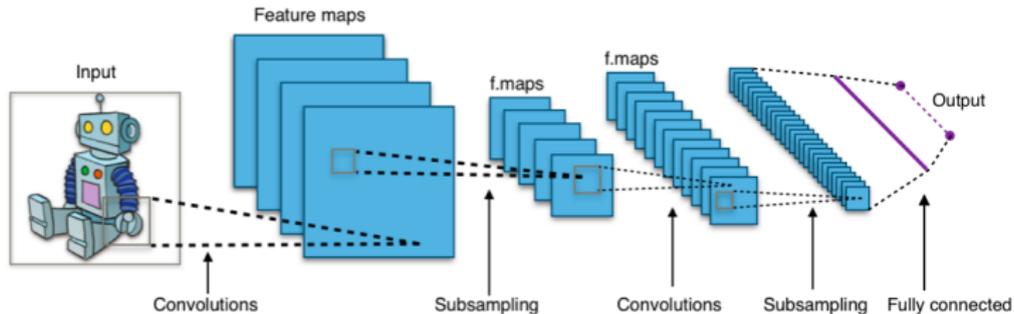
## Perceptron multi-couches, réseaux convolutionnels



Jusqu'en 90

- ▶ Réseau en passe-avant
- ▶ Rétro-propagation du gradient (Rumelhart et al. 86)
- ▶ Tâche : classification chiffres manuscrits

# Perceptron multi-couches, réseaux convolutionnels



(de By Aphex34 - Own work, CC BY-SA 4.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45679374>)

Depuis 2005

- ▶ Réseau en passe-avant
- ▶ Rétro-propagation, apprentissage couche à couche, puissance de calcul
- ▶ Tâches : tout

# Outline

## Exorde – *captatio benevolentiae*

L'apprentissage automatique et la vie

Graal : généralisation

## Narration

Positionnement

Perceptron : un voyage dans le temps, (1958–)

Perceptron multi-couches, réseaux de neurones : 15 ans de solitude

**Méthodes à noyaux : la grâce**

Adaboost : combinaison d'apprenants faibles

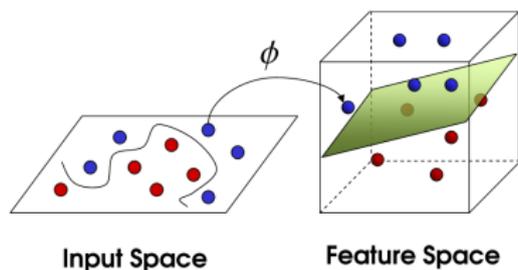
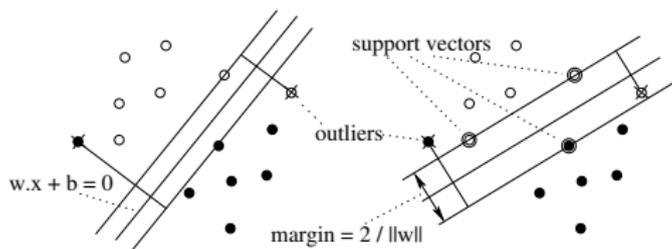
Bandits : dilemme exploration vs. exploitation

Une success story : AlphaGo

## Confirmation

## Péroraison

## Méthodes à noyaux : la grâce



(source à retrouver)

### De la soie

- ▶ Garanties théoriques
- ▶ Optimisation convexe
- ▶ Gestion de la non-linéarité avec le *kernel trick*
- ▶ Success stories : classification données structurées, ranking, scoring, théorie

# Outline

## Exorde – *captatio benevolentiae*

L'apprentissage automatique et la vie

Graal : généralisation

## Narration

Positionnement

Perceptron : un voyage dans le temps, (1958–)

Perceptron multi-couches, réseaux de neurones : 15 ans de solitude

Méthodes à noyaux : la grâce

**Adaboost : combinaison d'apprenants faibles**

Bandits : dilemme exploration vs. exploitation

Une success story : AlphaGo

## Confirmation

## Péroraison

## Adaboost : combinaison d'apprenants faibles

---

Given:  $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$  where  $x_i \in \mathcal{X}, y_i \in \{-1, +1\}$ .

Initialize:  $D_1(i) = 1/m$  for  $i = 1, \dots, m$ .

For  $t = 1, \dots, T$ :

- Train weak learner using distribution  $D_t$ .
- Get weak hypothesis  $h_t : \mathcal{X} \rightarrow \{-1, +1\}$ .
- Aim: select  $h_t$  with low weighted error:

$$\epsilon_t = \Pr_{i \sim D_t} [h_t(x_i) \neq y_i].$$

- Choose  $\alpha_t = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 - \epsilon_t}{\epsilon_t} \right)$ .
- Update, for  $i = 1, \dots, m$ :

$$D_{t+1}(i) = \frac{D_t(i) \exp(-\alpha_t y_i h_t(x_i))}{Z_t}$$

where  $Z_t$  is a normalization factor (chosen so that  $D_{t+1}$  will be a distribution).

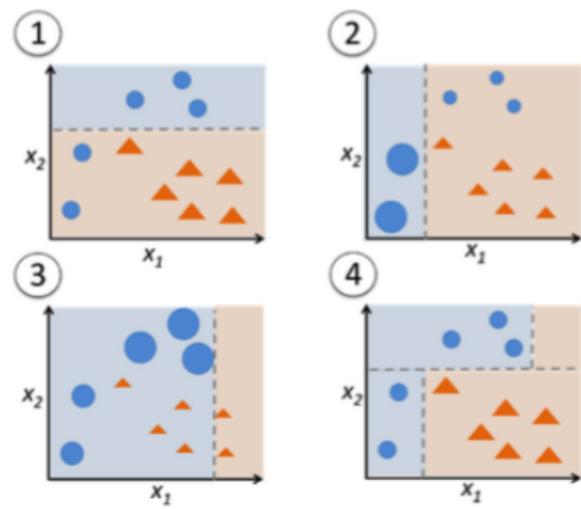
Output the final hypothesis:

$$H(x) = \text{sign} \left( \sum_{t=1}^T \alpha_t h_t(x) \right).$$

---

(from Freund and Schapire, 1997, 2012)

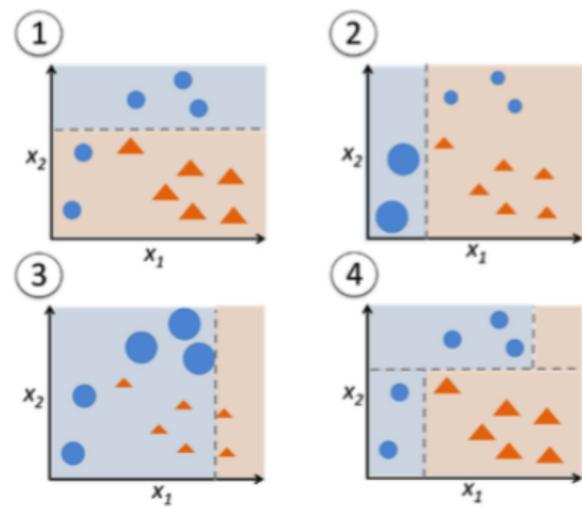
## Adaboost : combinaison d'apprenants faibles



(from Raschka,

<https://sebastianraschka.com/faq/docs/bagging-boosting-rf.html>)

## Adaboost : combinaison d'apprenants faibles



(from Raschka,

<https://sebastianraschka.com/faq/docs/bagging-boosting-rf.html>)

- ▶ Simplicité algorithmique, efficacité
- ▶ Résultats théoriques
- ▶ Prix Gödel 2003

# Outline

## Exorde – *captatio benevolentiae*

L'apprentissage automatique et la vie

Graal : généralisation

## Narration

Positionnement

Perceptron : un voyage dans le temps, (1958–)

Perceptron multi-couches, réseaux de neurones : 15 ans de solitude

Méthodes à noyaux : la grâce

Adaboost : combinaison d'apprenants faibles

**Bandits : dilemme exploration vs. exploitation**

Une success story : AlphaGo

## Confirmation

## Péroraison

## Bandits : dilemme exploration vs. exploitation



Comment utiliser au mieux son budget pour miser ?

### Caractéristiques

- ▶ Problème facile à poser, plusieurs variations
- ▶ Dilemme exploration/exploitation
- ▶ Importance des inégalités de concentration
- ▶ Success stories : placement publicitaire, recommandation, Go

# Outline

## Exorde – *captatio benevolentiae*

L'apprentissage automatique et la vie

Graal : généralisation

## Narration

Positionnement

Perceptron : un voyage dans le temps, (1958–)

Perceptron multi-couches, réseaux de neurones : 15 ans de solitude

Méthodes à noyaux : la grâce

Adaboost : combinaison d'apprenants faibles

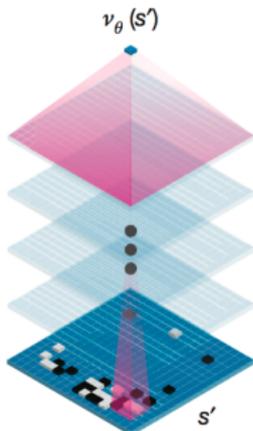
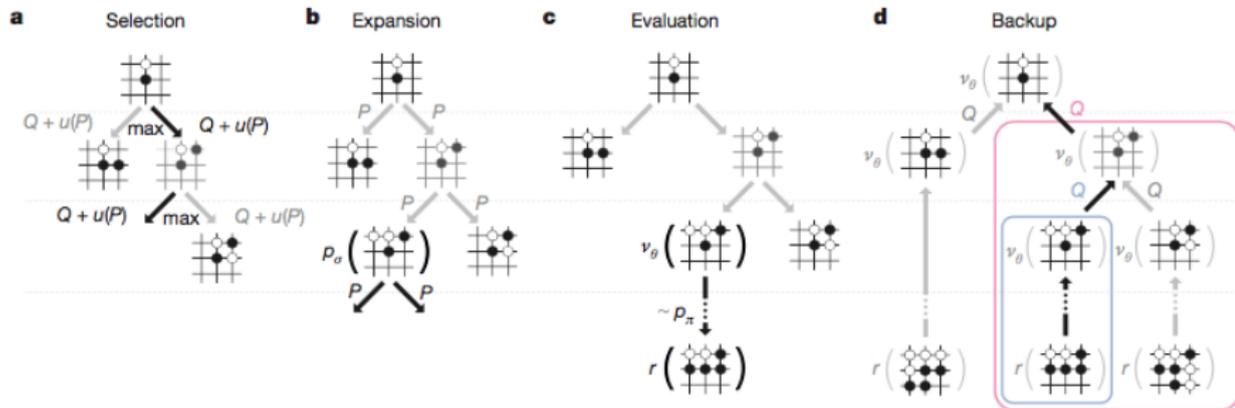
Bandits : dilemme exploration vs. exploitation

**Une success story : AlphaGo**

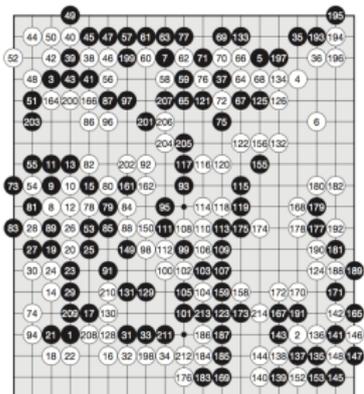
## Confirmation

## Péroraison

# Une success story : AlphaGo (Silver et al. 2016)



Game 5  
Fan Hui (Black), AlphaGo (White)  
AlphaGo wins by resignation



# De la place pour beaucoup de profils

## Variété de domaines d'application

- ▶ Vision par ordinateur
- ▶ Traitement du langage naturel
- ▶ Robotique
- ▶ Publicité
- ▶ Systèmes de recommandation
- ▶ Réseaux sociaux
- ▶ Jeux (Go, échecs, poker)
- ▶ Biologie
- ▶ ...

## Variété de problèmes

- ▶ Algorithmique
- ▶ Statistique
- ▶ Modélisation

# Péroraison

## Apprentissage automatique : une discipline

- ▶ Branche (quasi-indépendante) de l'IA
- ▶ A la croisée de l'informatique, des mathématiques
- ▶ Une communauté en plein essor

## Diffusion de l'apprentissage automatique

- ▶ Au cœur de la science des données
- ▶ Discipline très étudiée par Google, Facebook, Apple, Amazon...
- ▶ Explosion du deep learning
- ▶ Intérêt des politiques

## Take-home message

Faites de l'apprentissage automatique (pour vous amuser, pour être sérieux, pour avoir de l'argent, pour séduire).