

AIC-Automatisation avancée, intelligence artificielle et cognitive

6. Commande neuronale

Jean-Daniel Dessimoz



HAUTE ÉCOLE
D'INGÉNIERIE ET DE GESTION
DU CANTON DE VAUD
www.heig-vd.ch

institut d'
Automatisation
industrielle
LaRA
Laboratoire de Robotique et Automatisation

Hes·SO
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

1

AIC-Automatisation avancée, intelligence artificielle et cognitive

Contenu

- **Introduction**
- **Notion de modèle ; métrique pour le traitement d'information et pour la cognitive**
- **Choix d'une structure de commande**
- **Intelligence artificielle et « machine learning »**
- **Commande à logique floue**
- **Commande neuronale, yc. « deep learning »**
- **Commande multimodale**
- **Commande à algorithme génétique**
- **Robots mobiles autonomes**
- **Robot humanoïde NAO**
- **Conclusion**

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

2

Contenu des *Exposés et exercices*

Notion de modèle ; métrique pour le traitement d'information et pour la cognitive	4p
Choix d'une structure de commande	2p
Intelligence artificielle et inférences bayésiennes	2p
Commande à logique floue	2p
Commande neuronale	2p
Commande multimodale	2p
Commande à algorithme génétique	2p
Robots mobiles autonomes et humanoïdes	4p
Réserve et contrôle continu (TE, corr.)	6p

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

3

Travaux de laboratoire associés

Estimation de grandeurs cognitives (essais en simulation avec programmes d'évitement d'obstacles)	L-AIC-1
Test d'intelligence artificielle selon Turing et utilisation d'Eliza	L-AIC-2
Commande neuronale	L-AIC-3
Commande à logique floue	L-AIC-4
Commande à algorithme génétique	L-AIC-5
Commande multimodale	L-AIC-6
Robot mobile autonome	L-AIC-7
Robot humanoïde NAO	L-AIC-8
Inférences bayésiennes	L-AIC-9
Sur demande, l'étudiant peut échanger l'une des manipulations ci-dessus par un autre sujet (cf. manipulations LaRA)	

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

4

AIC-Automatisation avancée, intelligence artificielle et cognitive

Contenu

- Introduction
- Notion de modèle ; métrique pour le traitement d'information et pour la cognitive
- Choix d'une structure de commande
- Intelligence artificielle et « machine learning »
- Commande à logique floue
- **Commande neuronale, yc. « deep learning »**
- Commande multimodale
- Commande à algorithme génétique
- Robots mobiles autonomes
- Robot humanoïde NAO
- Conclusion

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

5

Commande neuronale

AIC-Automatisation avancée, intelligence artificielle et cognitive

Contenu

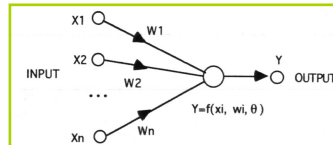
- **Définitions**
- **Neurone de Hopfield**
- **Loi de Hebb**
- **Généralisation**
- **Exemple: commande d'un pendule inversé**
- **Autres réseaux**

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

6

Réseaux de neurones - définitions

- Conçus à l'origine par les biologistes pour étudier le cerveau humain
- L'idée est de modéliser l'entité de base du cerveau humain, le neurone, puis d'en assembler plusieurs afin de se rapprocher du raisonnement humain

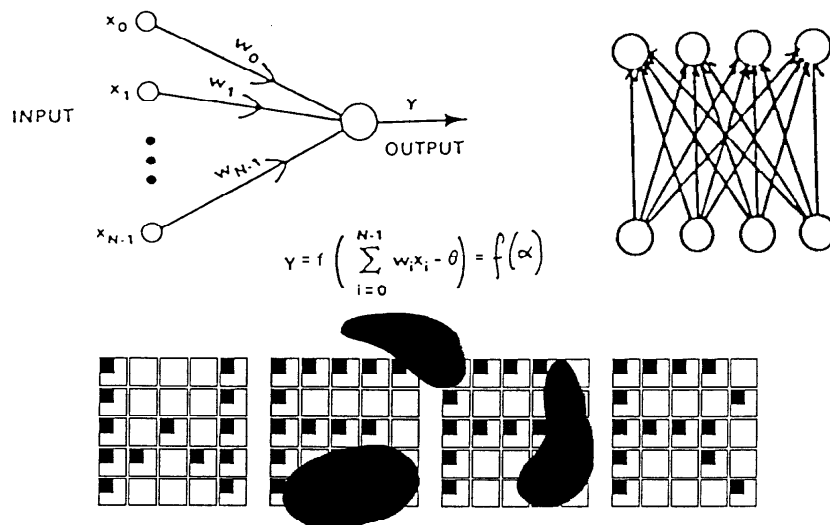


- Un neurone comporte n liaisons d'entrées
- Chaque entrée est pondérée par un facteur w_j
- La sortie y est une fonction f de la somme pondérée des entrées, après décalage d'un certain seuil θ

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

7

Exemple classique : reconnaissance neuronale de quelques mots en présence d'erreurs



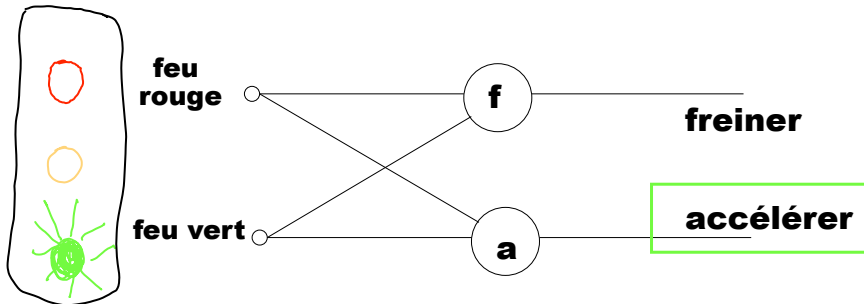
HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

8

Réseaux de neurones - exemple



<http://www.cliparts.com/cliparts/3/r/K/m/C/S/red-traffic-light-md.png>

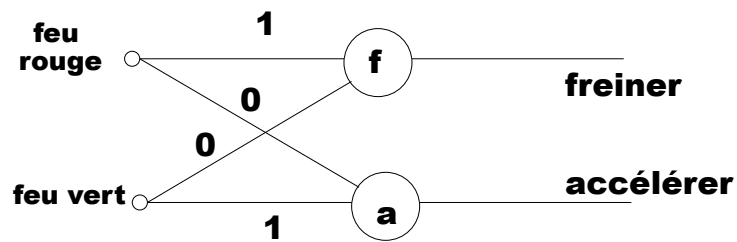


HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

9

Commande neuronale

Réseaux de neurones - exemple



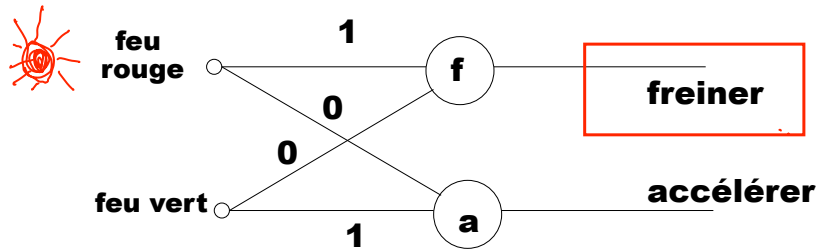
$$S = \sum_{i=1}^n W_i * x_i$$

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

10

Commande neuronale

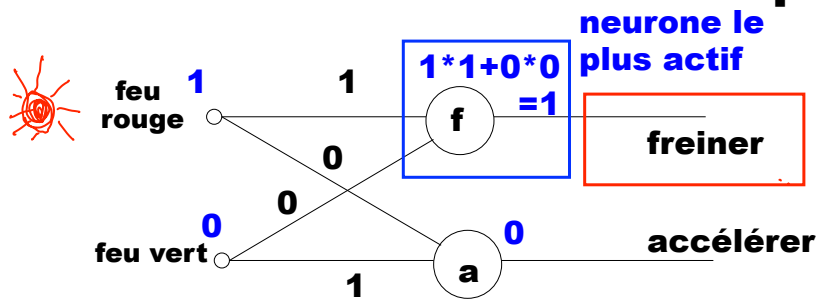
Réseaux de neurones - exemple



$$S = \sum_{i=1}^n W_i * x_i$$

Commande neuronale

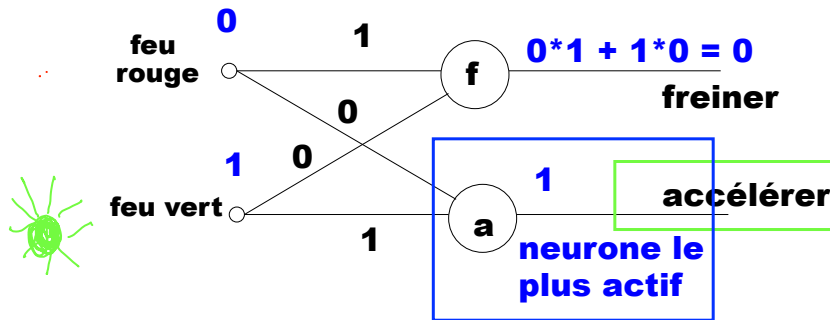
Réseaux de neurones - exemple



$$S = \sum_{i=1}^n W_i * x_i$$

Commande neuronale

Réseaux de neurones - exemple



$$S = \sum_{i=1}^n W_i * x_i$$

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

13

Commande neuronale

- On peut envisager diverses fonctions f
- Fondamentalement, chaque entrée (dont le niveau peut-être booléen ou scalaire) se voit multipliée par le poids de la liaison qu'elle traverse (synapse)
- Ce produit élémentaire va ensuite gonfler la somme générale qui s'opère dans le neurone:

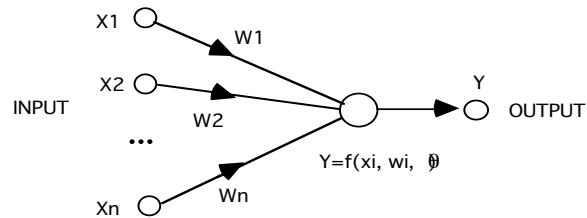
$$S = \sum_{i=1}^n W_i * x_i$$

- | Les neurones sont en général multiples, côte-à-côte, formant ainsi une couche
- | Ils sont cascadables
- | On a en général 1 à 2 couches

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

14

Commande neuronale



Fondamentalement:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i$$

Options éventuelles accessoires: offset, sigmoïde, ...



Commande neuronale

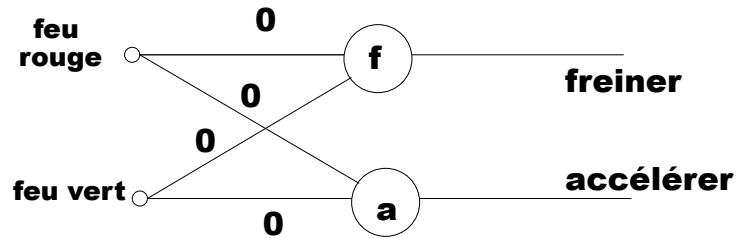
Réseaux de neurones – Loi de Hebb

Pour l'apprentissage, la loi de Hebb consiste à augmenter le poids des **liaisons actives aux deux bouts**

$$W_{ij} = W_{ij} + \alpha$$

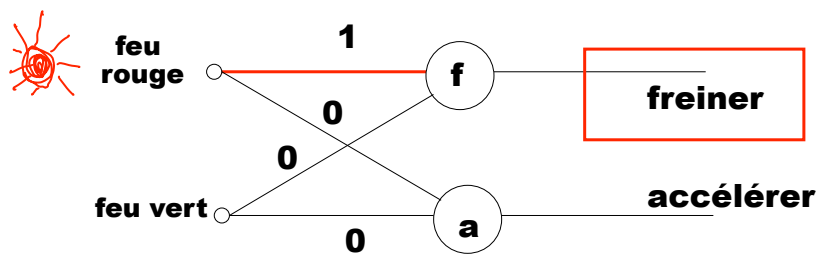
Commande neuronale

Réseaux de neurones - exemple



Commande neuronale

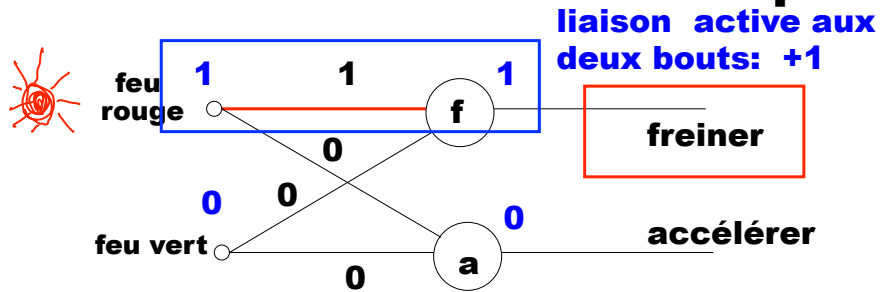
Réseaux de neurones - exemple



Si le feu est rouge, freiner

Commande neuronale

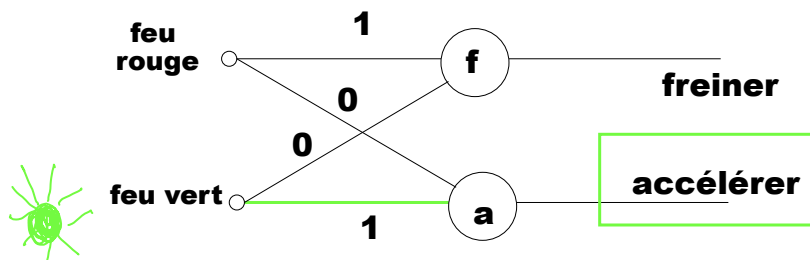
Réseaux de neurones - exemple



Si le feu est rouge, freiner

Commande neuronale

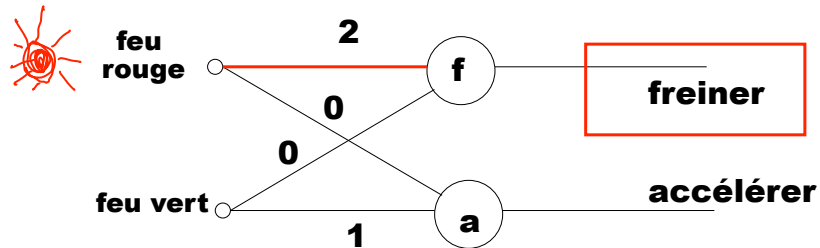
Réseaux de neurones - exemple



Si le feu est rouge, freiner
Si le feu est vert, accélérer

Commande neuronale

Réseaux de neurones - exemple



Si le feu est rouge, freiner
Si le feu vert, accélérer
Si le feu est rouge, freiner

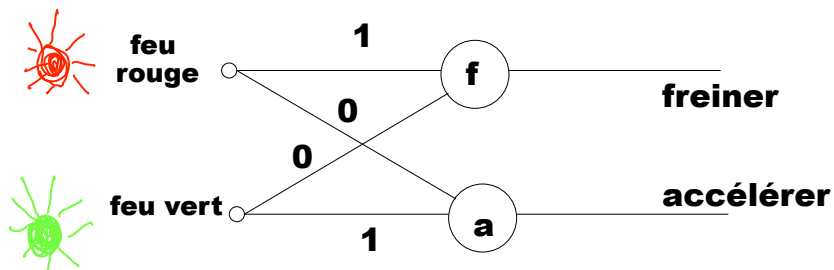
HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

21

Commande neuronale

Réseaux de neurones - Généralisation

Un réseau répond aussi à des configurations « non apprises ». (Avec plus ou moins de succès.)



HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

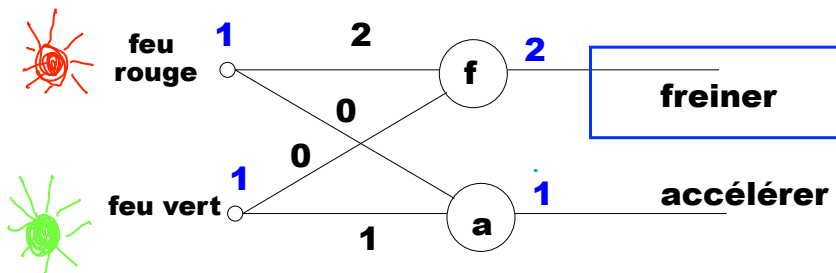
22

Commande neuronale

Réseaux de neurones - exemple

Généralisation:

Un réseau répond aussi à des configurations « non apprises »



HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

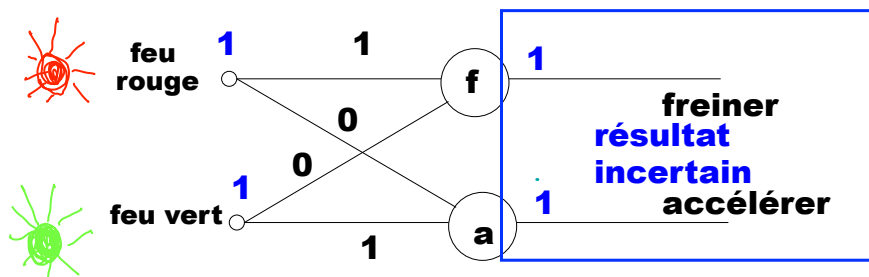
23

Commande neuronale

Réseaux de neurones - exemple

Généralisation:

Un réseau répond aussi à des configurations « non apprises », mais sans garantie...



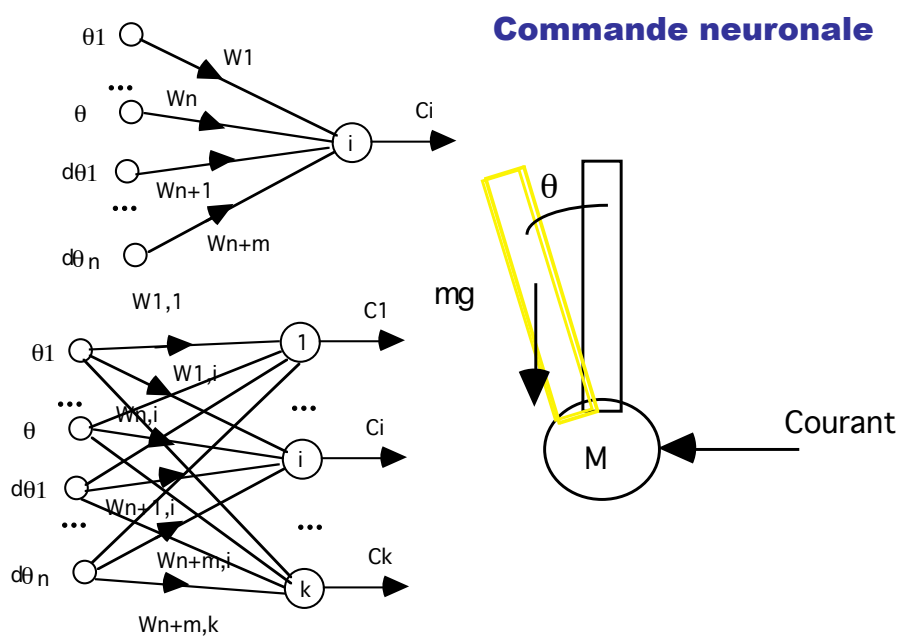
HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

24

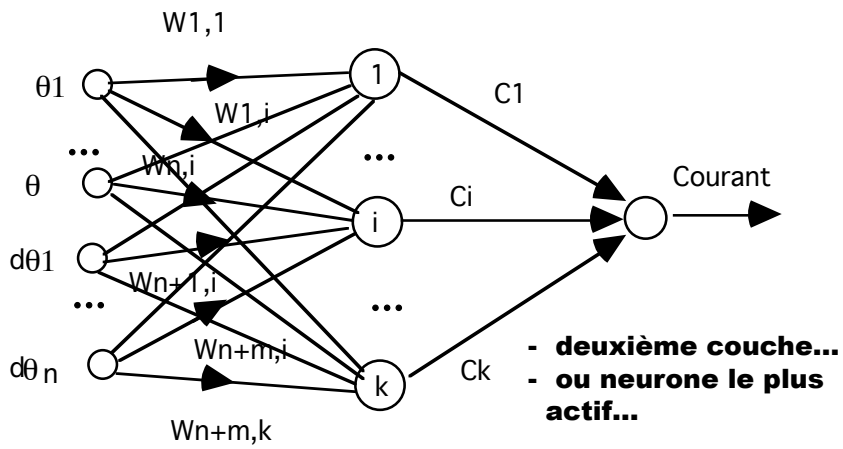
Méthodes non-conventionnelles pour la commande de processus



- ...
- **Les réseaux de neurones**
- ...



Commande neuronale



HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

27

Commande neuronale

Réseau Neuronale

Commande d'un pendule inversé

Réseau Neuronale

Initialisation **Régulation** Libre Bloqué Pousser

Consigne	ETheta0	ddTheta	dTheta	Theta	Courant
0	ETheta	2506.44	-202.31	-26.10	7.89

Incément

InitRégulateur TrainFn

Période d'éch. Temps

+ 0.01 - 17.56

Current Node Active

11

Quitter

(c) 1995-2005 HESSO.EVD.iAi.JDZ. Manjeet Dahiya

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

28

Commande neuronale

Extraits de code – Simulation d'un balancier

```
void UpdateBalancier(/*float Courant,
                    float &Theta, float &dTheta, float &ddTheta*/)
{
    ddTheta=360/Lm*g*sin(Theta/180*pi)+300*Courant;
    dTheta=0.99*dTheta+ddTheta*dt;
    Theta=Theta+dTheta*dt;
    t=t+dt;
    return;
}
```

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

29

Commande neuronale

Extraits de code – Structure

```
/*          / Entrée 1          */
(*          (var) ...          *)
(*          / (!)...          *)
(*          Neurone ...          *)
(*          / \ (!)          *)
(* réseau (var)          *)
(*          \ \ Entrée N          *)
(*          Neurone ...          *)
(*          */
```

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

30

Commande neuronale

Extraits de code – Processus principal

```
void CommandeNeuronale(float T, float dT, float &Co)
{
    if(T > 180) T=T-360;
    if(T < -180) T=T+360;
    int ITh, IdTh, IMax;
    Single2Index( T, ThMin, ThMax, NEntreesParVar, ITh);
    Single2Index( dT, dThMin, dThMax, NEntreesParVar, IdTh);
    EvaluationDuReseau (ITh, IdTh);
    RechercheDuNeuroneLePlusActif(IMax);
    Form1->Edit1->Text=IntToStr(IMax) ;
    if(IMax>0)
    {
        ReConversionFormat(IMax, Co );
        IMaxOld=IMax;
    }
    else
    {
        IMax=IMaxOld;
    }
}
```

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

31

Commande neuronale

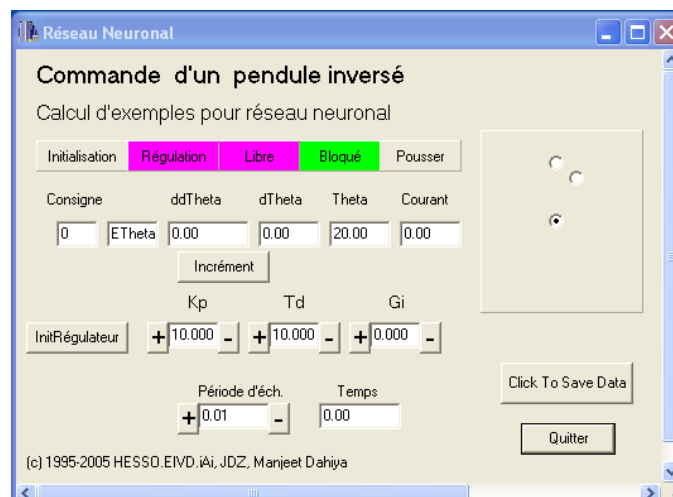


Fig. Maître pour génération d'exemples en vue de l'apprentissage

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

32

Commande neuronale

Extraits des données – Exemples pour apprentissage

Theta	dTheta	Courant
...		
-180.00	795.92	2034.00
-180.00	836.73	2034.00
-180.00	877.55	2034.00
-180.00	918.37	2034.00
-180.00	959.18	2034.00
-180.00	1000.00	2034.00
-172.65	-1000.00	1950.98
-172.65	-959.18	1950.98
-172.65	-918.37	1950.98
-172.65	-877.55	1950.98
-172.65	-836.73	1950.98
-172.65	-795.92	1950.98
-172.65	-755.10	1950.98
-172.65	-714.29	1950.98
...		

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

33

Commande neuronale

Extraits de code – Processus d'apprentissage

Loi de Hebb: renforcement des liaisons actives au deux bouts, selon les exemples fournis

```
void ModifPoids(NReseau &N, int i, int j, int k)
{
    // N: No du neurone;
    // i: No de la variable;
    // k: No de l'entrée active
    float PoidsTemp;
    PoidsTemp=N[i-1].Poids[(j)*NEntreesParVar+k];
    PoidsTemp = PoidsTemp + alpha;
    N[i-1].Poids[(j)*NEntreesParVar+k]=PoidsTemp;
}
```

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

34

Commande neuronale

Extraits des données – Exemples de réseau

```
Neurone No 10
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 50.00 50.00 50.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00

0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 15.00
60.00 60.00 15.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
```

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

35

Commande neuronale

Extraits de code – Evaluation du réseau

Pour chaque neurone: somme pondérée des entrées (ici, toujours deux entrées non nulles: iTh et idTh)

```
void EvaluationDuReseau(tIndex ITh, tIndex IdTh)
{int i;
 for(i=1;i<=NNeurones;i++)
  ReseauNeurone[i-1].Sortie =
  ReseauNeurone[i-1].Poids[ITh-1] +
  ReseauNeurone[i-1].Poids[NEntreesParVar+IdTh-1];
}

void RechercheDuNeuroneLePlusActif(int &IMax)
{ int i;
  float s=0;
  IMax=0;
  for(i=1;i<=NNeurones;i++)
   if(s<ReseauNeurone[i-1].Sortie)
    {s=ReseauNeurone[i-1].Sortie;
     IMax=i; } // end for et if
}
```

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

36

Réseau « multidimensionnel »

Pouvez-vous faire un réseau neuronal pour additionner deux chiffres de 0 à 1 ?

a Donnez-en si possible la structure ; sinon justifiez votre réponse négative

b Donnez-en si possible les poids de toutes les liaisons; sinon justifiez votre réponse négative

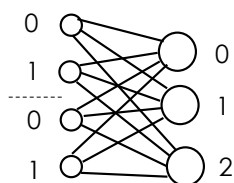
HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

37

Commande neuronale

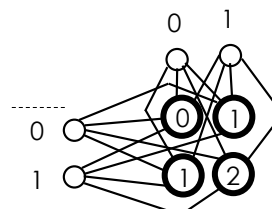
Exemple à deux dimensions

Essai simple $0..1 + 0..1$:



Pas de solution 1D unique et correcte

Essai simple $0..1 + 0..1$:



Solution 2D !

5.4.2011

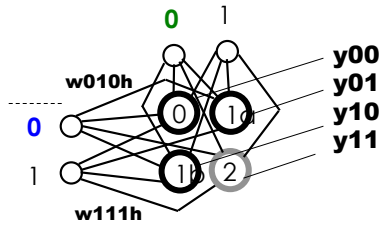
HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

38

Commande neuronale

Exemple à deux dimensions

Essai simple 0..1 + 0..1:



Poids appris par loi de Hebb:

Exemples	Poids	Actions
$0 + 0 = 0$	$w_{000h}=1$ $w_{000v}=1$	$y_{00}=0$
$0 + 1 = 1a$	$w_{010h}=1$ $w_{011v}=1$	$y_{01}=1$
$1 + 0 = 1b$	$w_{101h}=1$ $w_{100v}=1$	$y_{10}=1$
$1 + 1 = 2$	$w_{111h}=1$ $w_{111v}=1$	$y_{11}=2$

(tous les autres poids=0)

Notations:

W : weight

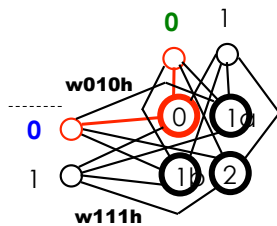
Neurones: 00, 01, 10, et 11

Entrées: 0h, 1h, 0v, et 1v

Commande neuronale

Exemple à deux dimensions

Essai simple 0..1 + 0..1:



Poids par loi de Hebb:

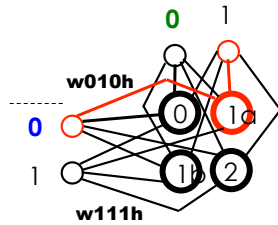
Exemples	Poids	Actions
$0 + 0 = 0$	$w_{000h}=1$ $w_{000v}=1$	$y_{00}=0$
$0 + 1 = 1a$	$w_{010h}=1$ $w_{011v}=1$	$y_{01}=1$
$1 + 0 = 1b$	$w_{101h}=1$ $w_{100v}=1$	$y_{10}=1$
$1 + 1 = 2$	$w_{111h}=1$ $w_{111v}=1$	$y_{11}=2$

(tous les autres poids=0)

Commande neuronale

Exemple à deux dimensions

Essai simple 0..1 + 0..1:



Poids par loi de Hebb:

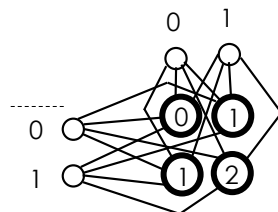
Exemples	Poids	Actions
$0 + 0 = 0$	$w_{000h}=1$ $w_{000v}=1$	$y_{00}=0$
$0 + 1 = 1a$	$w_{010h}=1$ $w_{011v}=1$	$y_{01}=1$
$1 + 0 = 1b$	$w_{101h}=1$ $w_{100v}=1$	$y_{10}=1$
$1 + 1 = 2$	$w_{111h}=1$ $w_{111v}=1$	$y_{11}=2$

(tous les autres poids=0)

Commande neuronale

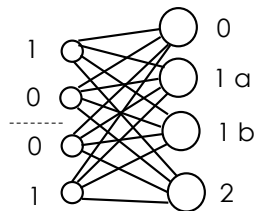
Exemple à « deux » dimensions

Essai simple 0..1 + 0..1:



Solution 2D !

Essai simple 0..1 + 0..1:



Réorganisation sur 1 couche

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones

Le réseau formé de neurones du type de Hopfield et utilisant la loi d'apprentissage de Hebb est le plus fondamental, mais il y existe aussi d'autres types de réseaux neuronaux, spécialisés, itératifs, avec boucles internes:

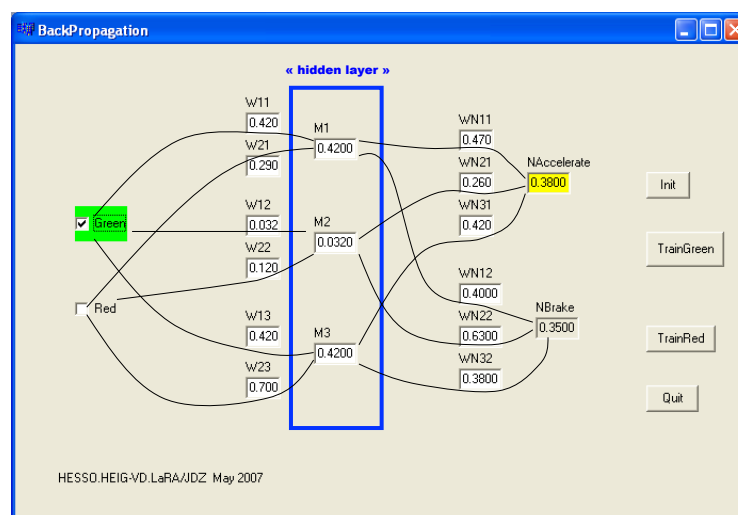
- Réseau à rétropropagation: nous avons ici plusieurs couches. Les poids sont d'abord tous définis au hasard, puis, avec une sorte de généralisation de la loi de Hebb, sur la base de chaque exemple fourni, les coefficients sont renforcés en cas de succès ou au contraire diminués, en cas d'échec.
- Deep learning: grand réseau à rétropropagation
- Réseau de Kohonen: les liaisons sont itérativement adaptées de façon à ce que des liaisons voisines en entrée activent également des neurones voisins en sortie
- Réseau à compétition-coopération: des liaisons transversales entre neurone renforcent ou au contraire inhibent les neurones voisins
- Réseau de Héroult-Jutten: ce réseau particulier permet le découplage de signaux a priori mélangés (diaphonie)

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

43

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Rétropropagation 1 de 2

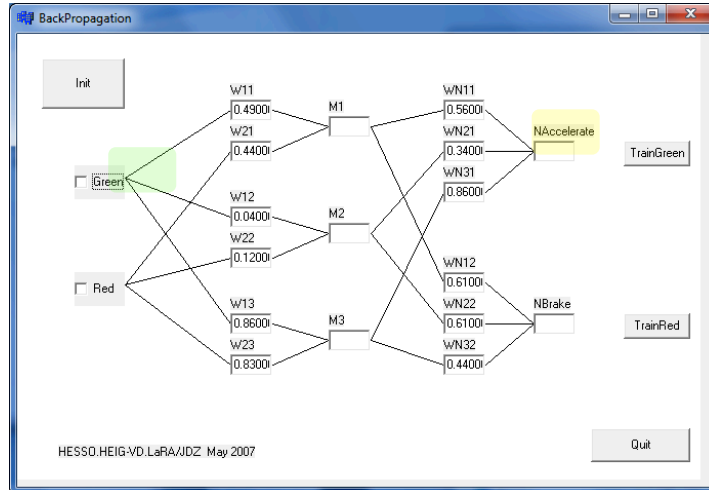


HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

44

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Rétropropagation 2 de 2



Cf. Fabien Rudaz
013.06.03

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

45

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Deep learning 1 de 8

Quelques réflexions:

- Deep learning: grand réseau à rétropropagation
- Très à la mode en 2016
- L'ordi AlphaGo de Google bat le meilleur joueur (humain) de "Go".
- Les instituts suisses IDSIA et IDIAP sont très profilés dans le domaine (cf. présentation Jan Koutnik – The Deepest learning [1])
- Succès sur un concours de panneaux de circulation
- Avantage : mémorisation via de nombreux paramètres mis-à-jour sans programmation explicite ("Long Short-Term Memory", 1997, "... Convolutional Neural Networks ...", 2009)
- Limites :
 - *exemples (ou essais) nécessaires* pour apprentissage
 - pas d'indice quant à la *fiabilité*
 - *difficile* de "debugger" et d'améliorer
 - difficile à gérer les séquences et encore plus le *temps*
 - typiquement associé aux aspects *perceptifs* de la cognition

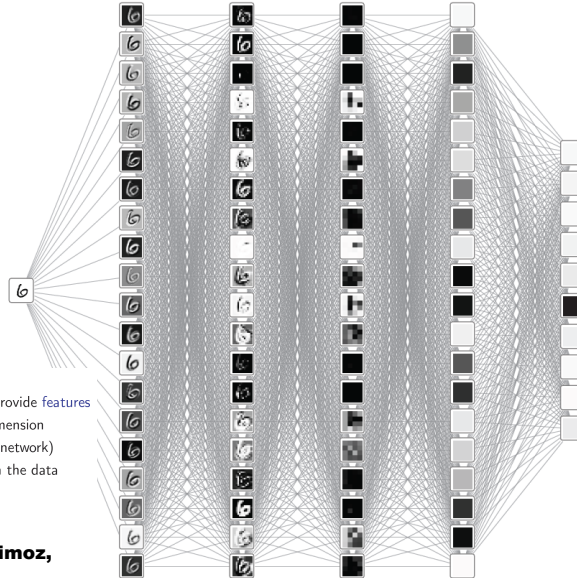
HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

46

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Deep learning 2 de 8

Convolutional Neural Networks [1]:



- ▶ Used for image classification (typical usage)
- ▶ Input filtered using convolutions in order to provide features
- ▶ Downsample the image in order to reduce dimension
- ▶ Features classified by a classifier (e.g. neural network)
- ▶ Features are not hand-crafted but learnt from the data

[1]

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 16.03.2016

47

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Deep learning 3 de 8

Convolutional Neural Networks [1]:



- Deep Maxpooling CNNs, MLP on top
- 1 year on CPU = 1 week on GPU
- 5×10^9 weight updates=s
- First human-competitive result (0.2% error)
- After a decade of 0.4% error

[1]

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

48

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Deep learning 4 de 8

Convolutional Neural Networks [1]:

- IJCNN 2011, on site traffic sign recognition
- 1st 0.56%
- 2nd 1.16%
- (Humans)
- 3rd 1.69%
- 4th 3.86%



HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

49

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Deep learning 5 de 8

(<http://www.leparisien.fr>): **Un superordinateur de Google défie le grand maître go**
08 Mars 2016

...
Le programme de Google utilise notamment "l'apprentissage profond" (Deep learning), méthode d'apprentissage conçue sur la base de couches de "neurones" artificiels, imitant ceux du cerveau humain.



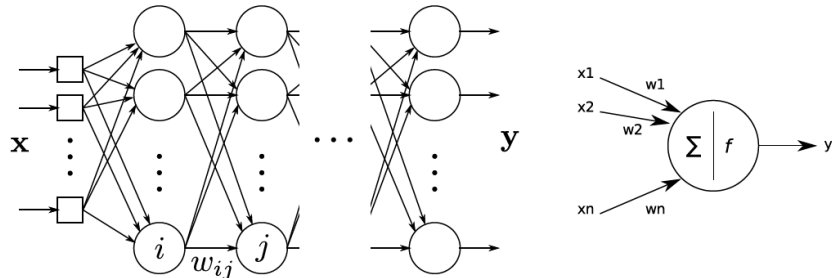
HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

50

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Deep learning 6 de 8

Convolutional Neural Networks [1]:



- Neuron: $f(w \times x)$, nonlinearity $f()$
- Each connection has a weight w
- Training set consist of N pairs: input x_n , output z_n
- Training changes w in order to match all y_n to z_n with a minimal error E
- Optimization problem, gradient defined => gradient descent

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

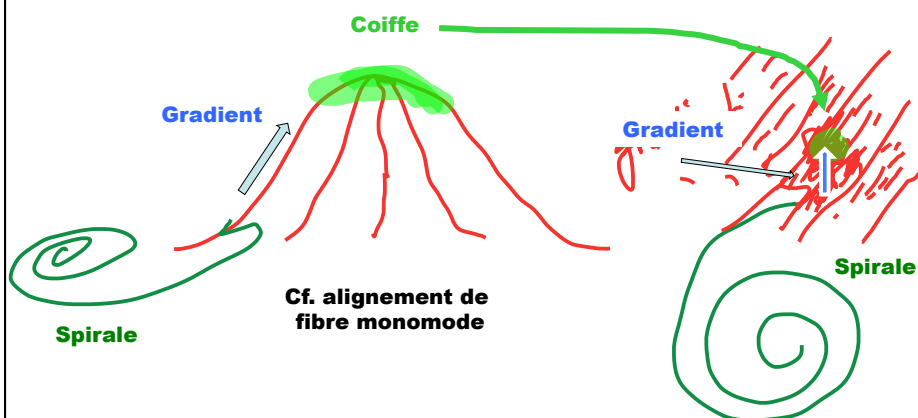
51

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Deep learning 6b de 8

Convolutional Neural Networks [1]:

- Optimization problem, gradient defined => gradient ascent/descent for neural weights in supervised learning



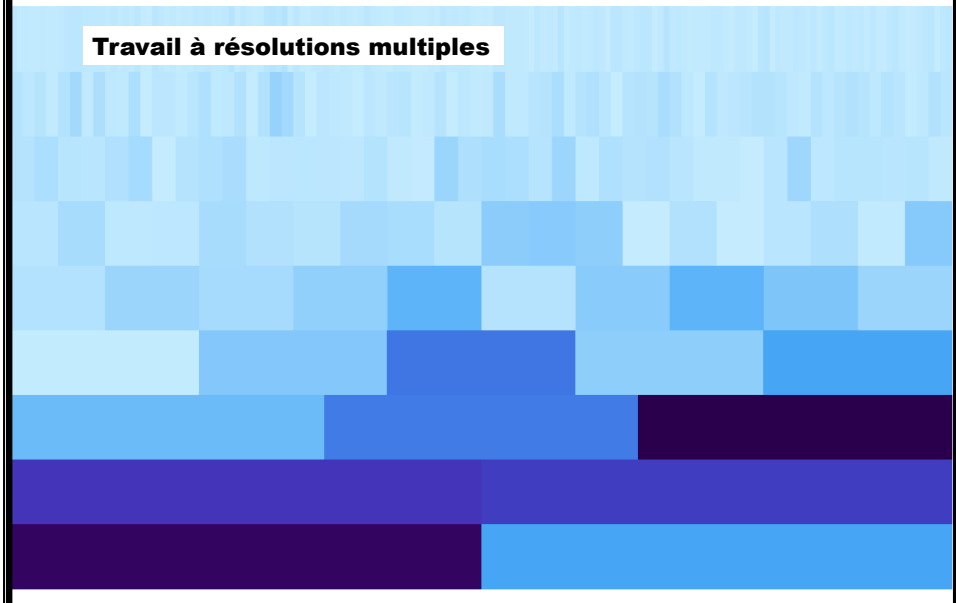
HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

52

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Deep learning 7 de 8

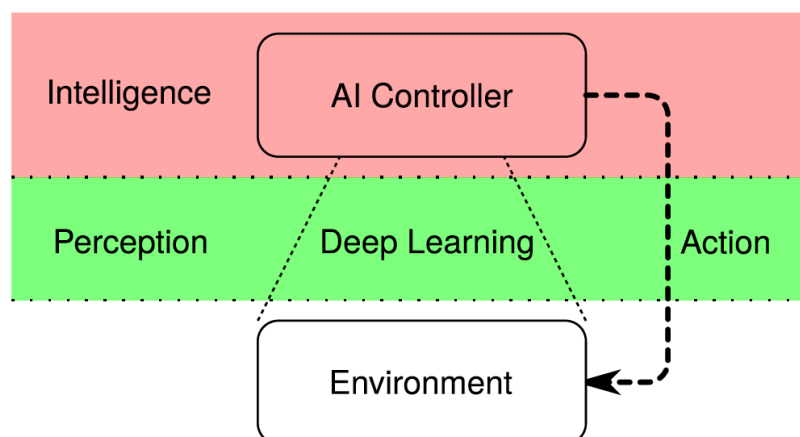
Travail à résolutions multiples



Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Deep learning 8 de 8

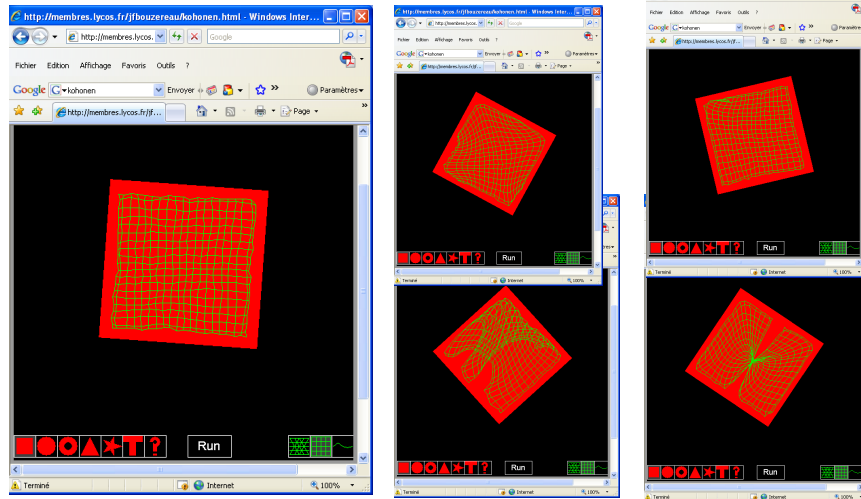
The real challenge [1]:



Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Kohonen 1 de 2

<http://membres.lycos.fr/jfbouzereau/kohonen.html>



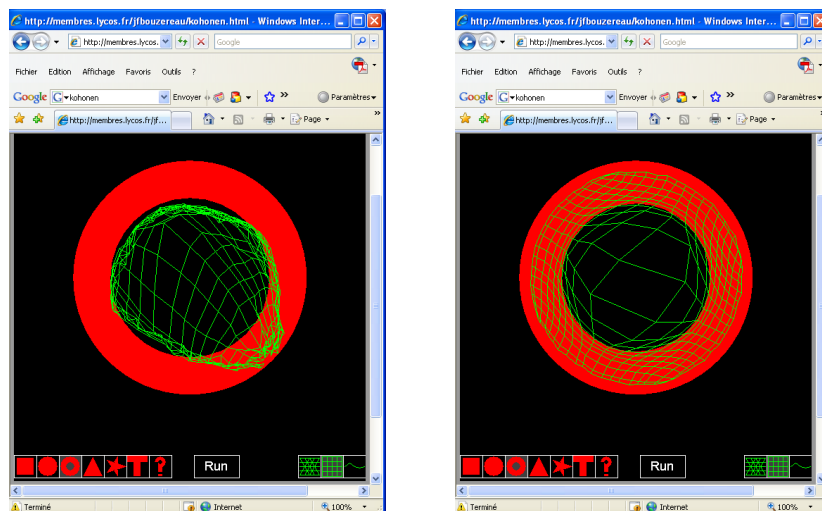
HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

55

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Kohonen 2 de 2

<http://fbouzereau.free.fr/kohonen.html>



HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

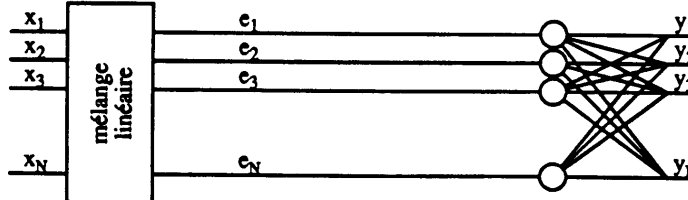
56

Commande neuronale

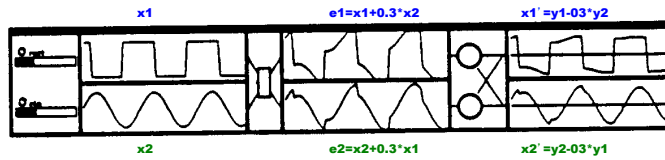
Autres réseaux de neurones – Hérault-Jutten 1 de 3

Contexte: diaphonie

SOMA: SIMULATEURS DE RÉSEAUX DE NEURONES
cours COMETT-Neural
Résumé et mis en page par EINEV/JDZ
(voir classeur au labo pour l'édition complète originale par LAMI/EPFL)



Signaux, mélange et séparation:



HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

57

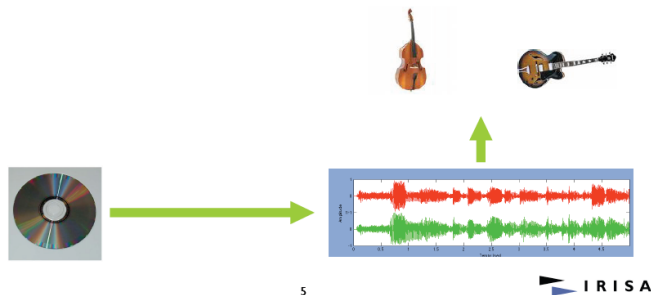
Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Hérault-Jutten 2 de 3

<http://www.irisa.fr/videos/hdr/gribonval/HDR2007.pdf>

« Blind » Audio Source Separation

- « Softly as in a morning sunrise »



5

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

58

Commande neuronale

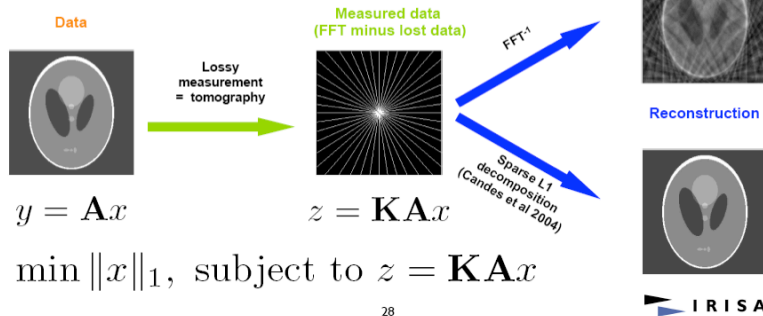
Autres réseaux de neurones – Hérault-Jutten 3 de 3

<http://www.irisa.fr/videos/hdr/gribonval/HDR2007.pdf>

Compressed Sensing

- MRI from incomplete measures

[Candès, Romberg & Tao]



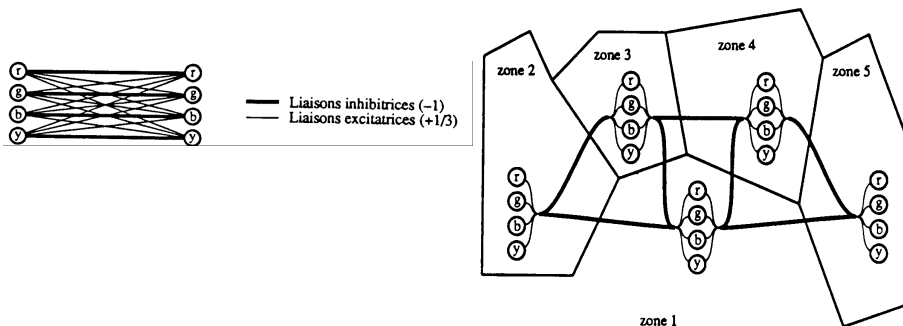
HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

59

Commande neuronale

Autres réseaux de neurones – Compétition/Coopération

Carte colorée par relaxation:



SOMA: SIMULATEURS DE RÉSEAUX DE NEURONES
cours COMETT-Neural
Résumé et mis en page par EINEV/JDZ
(voir classeur au labo pour l'édition complète originale par LAMI/EPFL)

HESSO.HEIG-VD, J.-D. Dessimoz, 05.03.2017

60

Commande neuronale

Conclusion

- **Un neurone du type de Hopfield fait la somme pondérée des entrées**
- **La loi de Hebb permet d'apprendre, en augmentant le poids des liaisons connectant entrée et neurone**
- **Un réseau de neurones est naturellement capable de « généraliser »**
- **Un réseau neuronal peut servir à commander un système, comme notamment démontré par l'application du pendule inversé**
- **Une faiblesse, c'est la difficulté de pouvoir démontrer l'efficacité et la fiabilité d'un réseau**
- **Peut-être utile dans certaines « niches » (programmation implicite par exemple) mais n'est évidemment pas comparable en performances et possibilités à un ordinateur ordinaire, programmé de façon courante**

Commande neuronale

Références

- [1] Jan Koutnik, The Deepest Learning, SGAICO Workshop, Nov. 2015, Genève**