

Traitement et analyse d'images numériques

Partie 4: Détection des contours, Segmentation

Pierre Maurel

Visages, IRISA/INRIA

`pierre.maurel@irisa.fr`

<http://www.normalesup.org/~pmaurel/IMA/>

Analyse d'images, vision par ordinateur

- Segmentation : partitionner l'image en ses différentes parties.



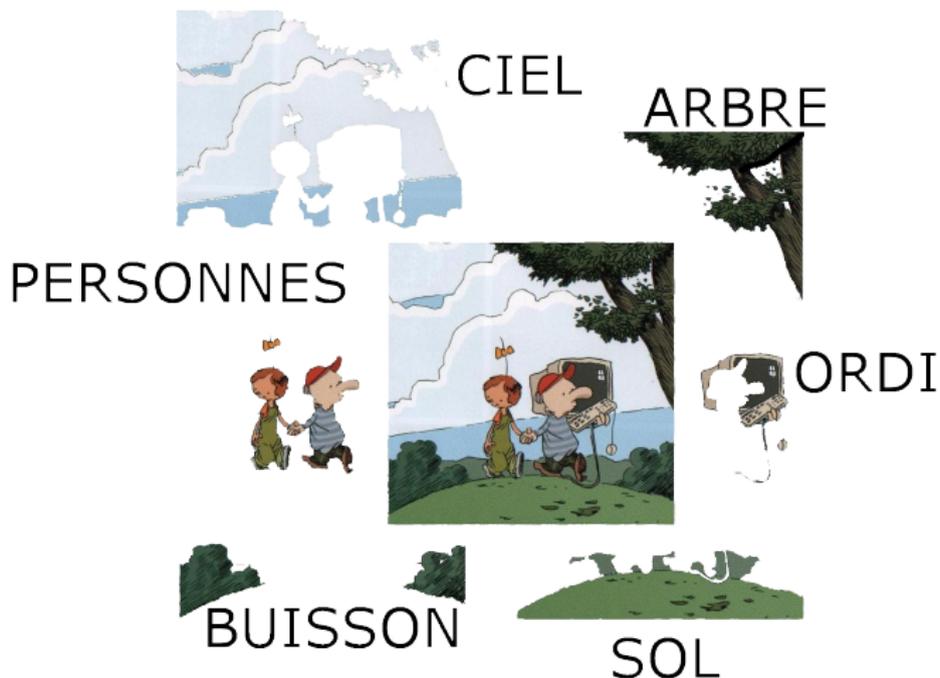
Analyse d'images, vision par ordinateur

- Segmentation : partitionner l'image en ses différentes parties.



Analyse d'images, vision par ordinateur

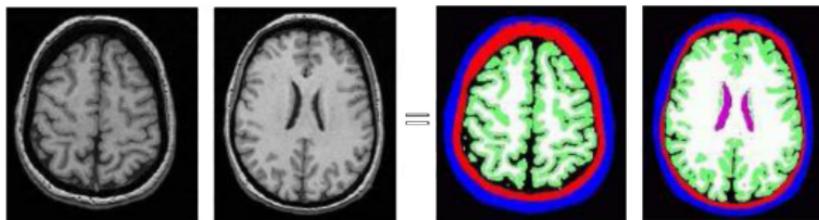
- Segmentation : partitionner l'image en ses différentes parties.
- Reconnaissance : étiqueter les différentes parties



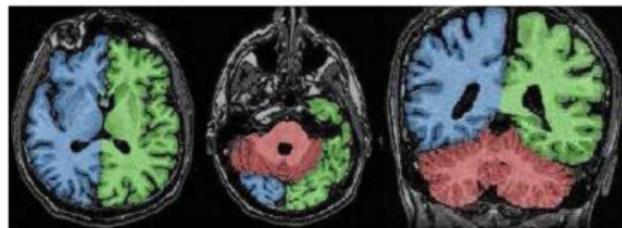
Segmentation ?

- La segmentation vise à découper une image en régions connexes présentant une homogénéité selon un certain critère.
- différentes possibilités → fonction de ce qu'on veut en faire
- Exemples

Peau, os, LCR, matière grise, matière blanche, ventricules



Hémisphère gauche, hémisphère droit, cervelet



Images issues de l'HDR de J.F. Mangin

Segmentation ?

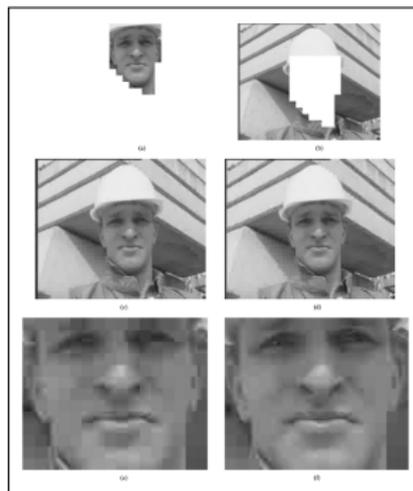
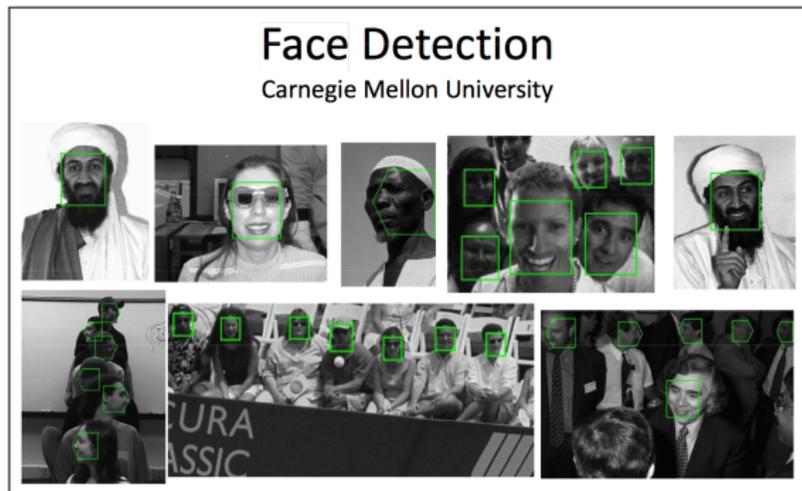
À quoi ça sert ?

Important prérequis pour les étapes de mesure, de compréhension de la scène :

- reconnaissance d'objets
- indexation : rechercher dans une base d'images, les images "ressemblantes" à une image initiale
- compression
- recalage d'images, mises en correspondance
- ...

Segmentation ?

Exemple d'applications : Segmentation de visages

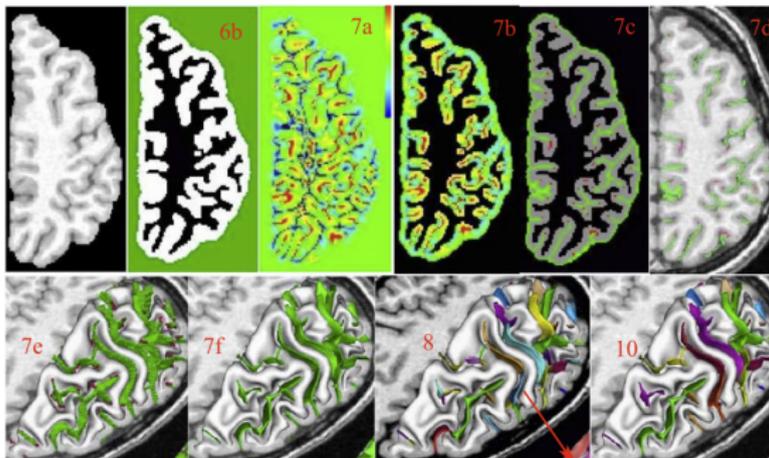


Face Segmentation Using Skin-Color Map in Videophone Applications, Douglas Chai, and King N. Ngan, 1999

- reconnaissance
- compression
- mise au point automatique

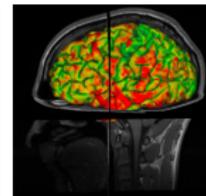
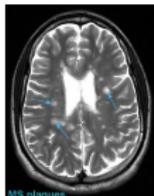
Segmentation ?

Exemple d'applications : Imagerie Médicale



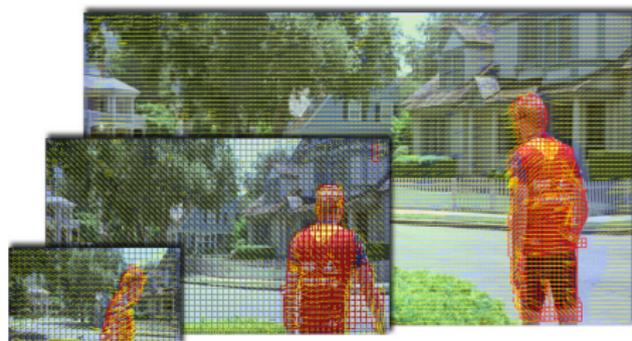
A framework to study the cortical folding patterns, Mangin et al., NeuroImage 2004

- Quantification des volumes des tissus, des organes
- Localisation d'une pathologie
- Étude d'une structure anatomique
- Planification d'un traitement
- Chirurgie assistée par ordinateur



Segmentation ?

Exemple d'applications : segmentation de vidéos



© Warner Bros. Adv. Media Services
Extraction des vecteurs de déplacement du standard H264 SVC



Séquence analysée



Masques des blocs de mouvements



Filtrage et objet détecté

- Suivi d'objets/personnes
- Compression
- Reconnaissance

<http://www.labri.fr/projet/AIV/segmentationindexation.php>

Segmentation ?

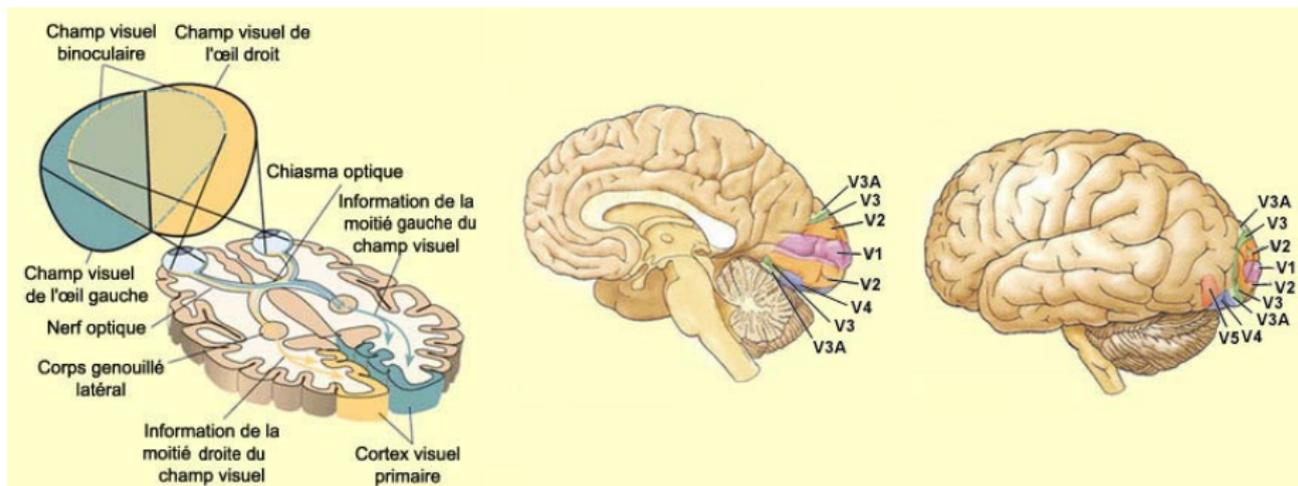
Exemple d'applications : reconnaissance d'objets

PASCAL Visual Object Challenge

Dining Table 	Dog 	Horse 	Motorbike 	Person 
Potted Plant 	Sheep 	Sofa 	Train 	TV/Monitor 

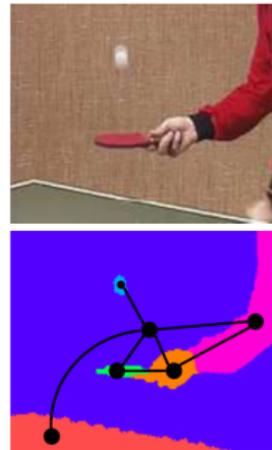
Segmentation ?

- Dans le système visuel, on a montré que les aires V1 et V2 sont sensibles à l'orientation du stimulus et que V3 et V4 extraient des contours.



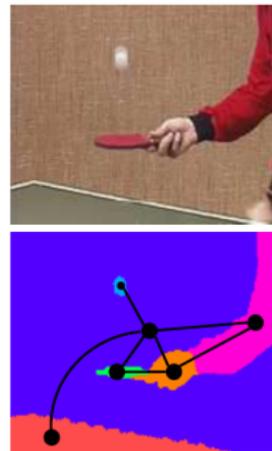
Segmentation ?

- Description "haut-niveau" d'une image
- Représentation sous forme de graphe d'adjacence



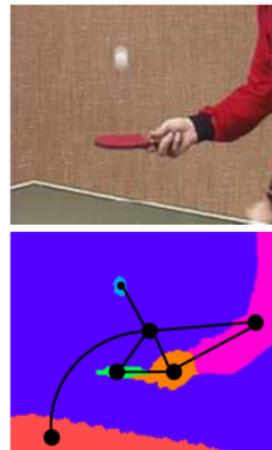
Segmentation ?

- Description "haut-niveau" d'une image
- Représentation sous forme de graphe d'adjacence
- La segmentation peut être basée sur
 - les discontinuités de l'image (contours)
 - les similitudes entre région (couleur, intensité, texture ...)



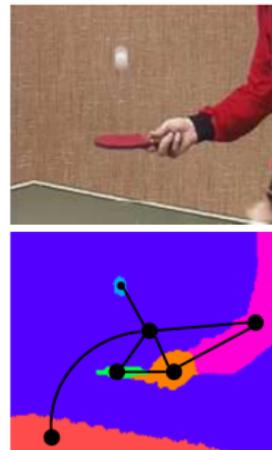
Segmentation ?

- Description "haut-niveau" d'une image
- Représentation sous forme de graphe d'adjacence
- La segmentation peut être basée sur
 - les discontinuités de l'image (contours)
 - les similitudes entre région (couleur, intensité, texture ...)
- Pas de solution universelle : en général, algo limité à un type d'application et/ou d'image



Segmentation ?

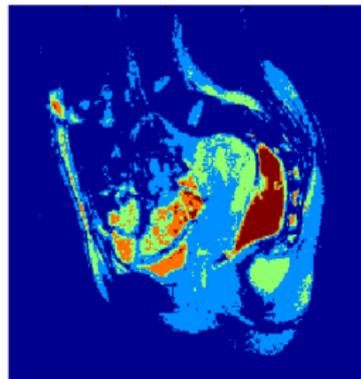
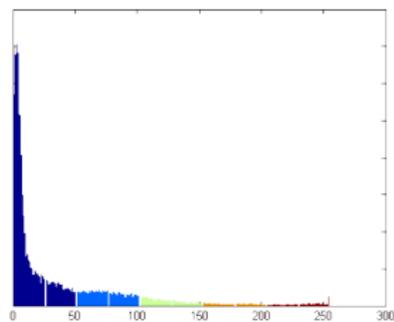
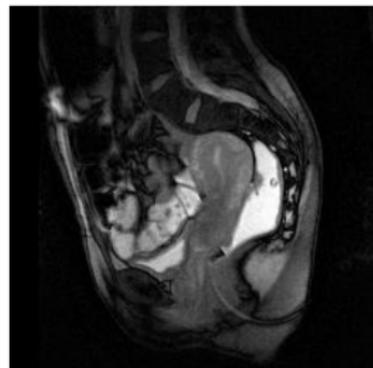
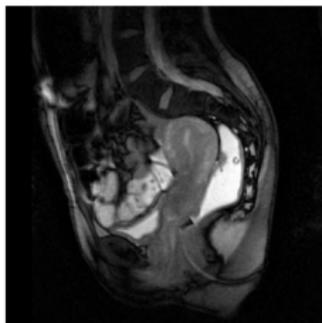
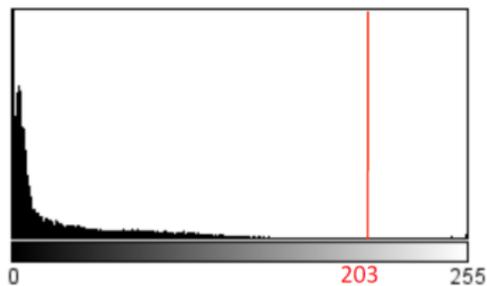
- Description "haut-niveau" d'une image
- Représentation sous forme de graphe d'adjacence
- La segmentation peut être basée sur
 - les discontinuités de l'image (contours)
 - les similitudes entre région (couleur, intensité, texture ...)
- Pas de solution universelle : en général, algo limité à un type d'application et/ou d'image
- Différentes approches :
 - approches globales
 - approches régions
 - approches contours



Approches Globales

Approches Globales

exemple le plus simple : seuillage d'histogramme



Seuillage d'histogramme

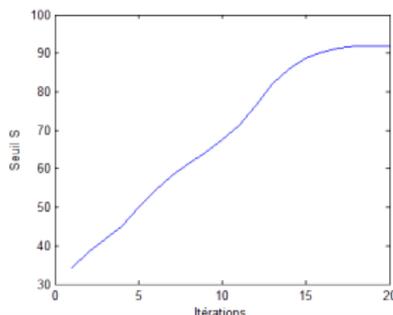
- Détermination du (ou des) seuil(s)
 - valeur obtenue par test
 - valeur moyenne
 - valeur médiane
 - choix automatique

Seuillage d'histogramme

- Détermination du (ou des) seuil(s)
 - valeur obtenue par test
 - valeur moyenne
 - valeur médiane
 - choix automatique
- Un algorithme simple
 - Choisir un seuil S initial (moyenne, médiane, ...)
 - On seuille \rightarrow 2 groupes de pixels de moyenne μ_1 et μ_2
 - On calcule $S = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$
 - On itère jusqu'à ce que S soit constant

Seuillage d'histogramme

- Détermination du (ou des) seuil(s)
 - valeur obtenue par test
 - valeur moyenne
 - valeur médiane
 - choix automatique
- Un algorithme simple
 - Choisir un seuil S initial (moyenne, médiane, ...)
 - On seuille \rightarrow 2 groupes de pixels de moyenne μ_1 et μ_2
 - On calcule $S = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$
 - On itère jusqu'à ce que S soit constant



DEMO MATLAB

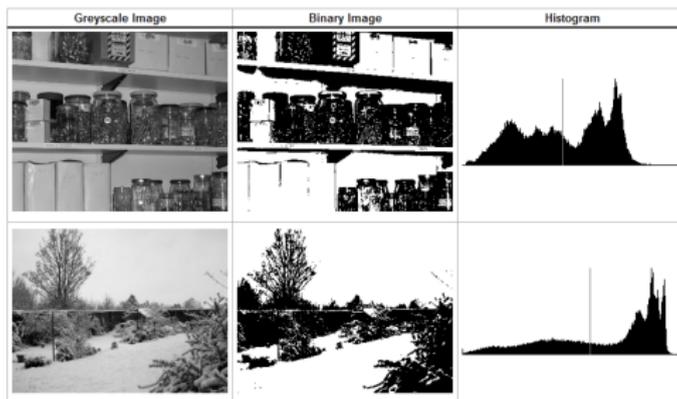
Seuillage d'histogramme

Méthode d'Otsu (1979)

- Un seuil t définit deux groupes de pixel : C_1 et C_2
- On cherche alors le seuil qui minimise la variance intra-classe :

$$\sigma_w^2(t) = \omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t)$$

- Les poids $\omega_i(t)$ représentent la probabilité d'être dans la i ème classe
- les σ_i^2 sont les variances de ces classes

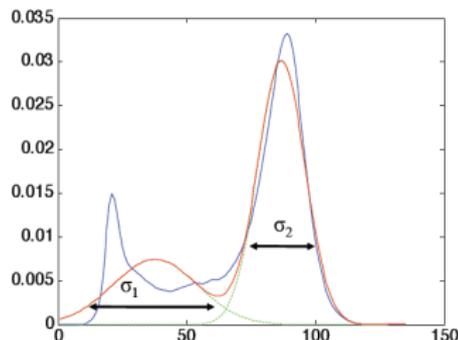


Seuillage d'histogramme

Seuillage par classification bayésienne

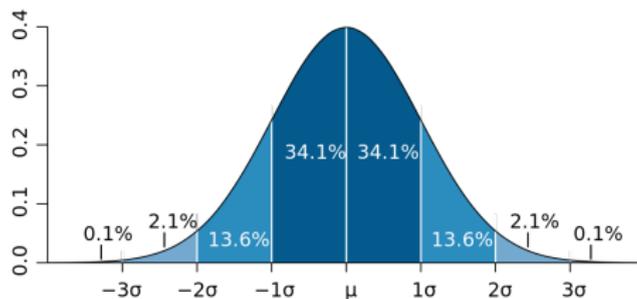
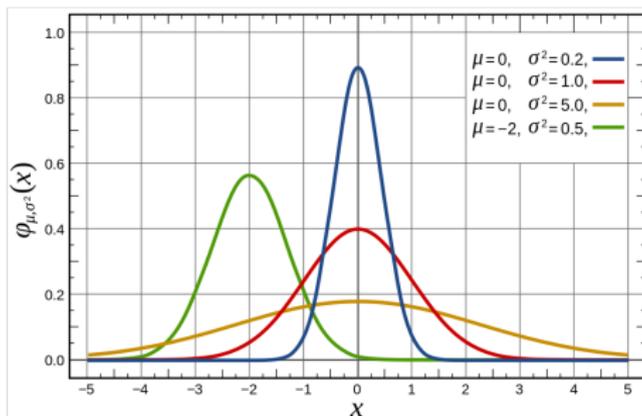
- Approximation de l'histogramme par un mélange de gaussiennes

$$\begin{cases} p_1(x) = \frac{P_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \\ p_2(x) = \frac{P_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \end{cases} \quad \text{et} \quad P_1 + P_2 = 1$$

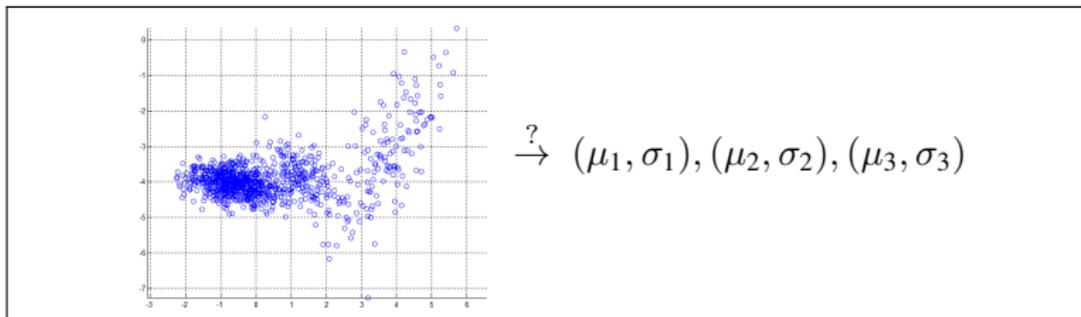


- Estimation de 5 paramètres libres (EM, gradient)

Aparté : Loi gaussienne

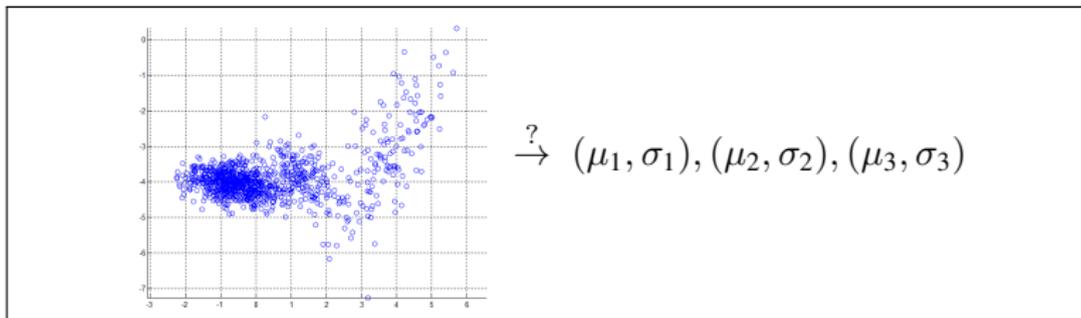


Algorithme EM, Modèle de mélanges gaussiens

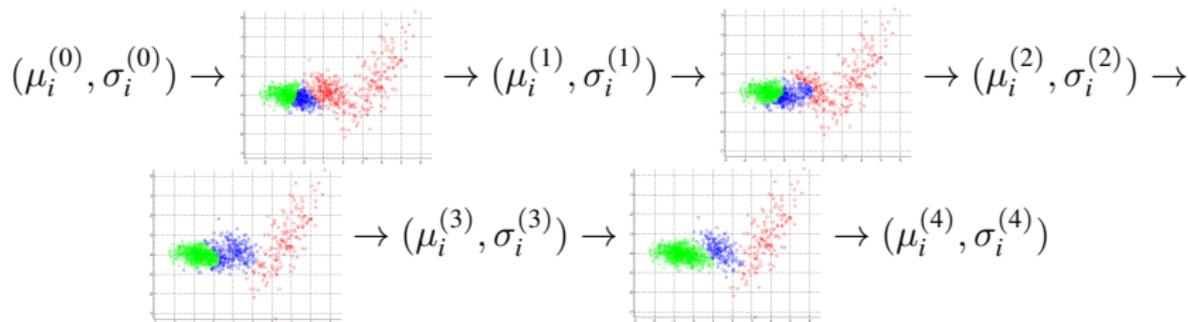


DEMO MATLAB

Algorithme EM, Modèle de mélanges gaussiens



DEMO MATLAB



Seuillage d'histogramme

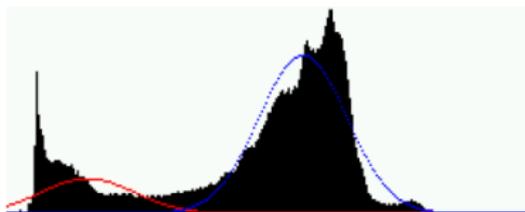
Seuillage par classification bayésienne



Image originale

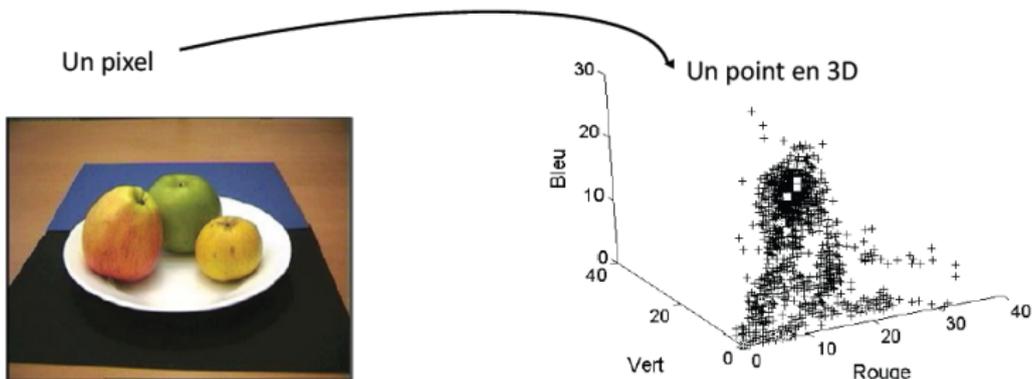


Image segmentée



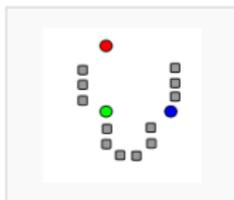
Algorithme des K-moyennes (K-means)

- Algorithme de classification dans un espace n -dimensionnel
- ici : $n = 1$ (image en niveaux de gris) ou $n = 3$ (image en couleurs) ou plus

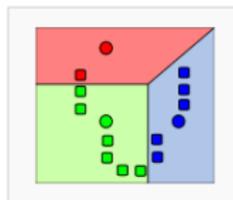


Algorithme des K-moyennes (K-means)

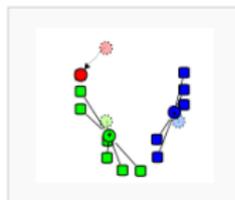
- On initialise K graines (aléatoires par ex.) étiquetées de 1 à K
- On répète, jusqu'à convergence :
 - Pour chaque pixel, on trouve la graine i la plus proche au sens de la distance euclidienne
 - On donne à ce pixel l'étiquette de la graine i
 - On calcule le barycentre de chaque classe \rightarrow les barycentres deviennent les nouvelles graines



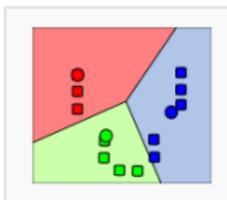
1) k initial "means" (in this case $k=3$) are randomly selected from the data set (shown in color).



2) k clusters are created by associating every observation with the nearest mean. The partitions here represent the Voronoi diagram generated by the means.



3) The centroid of each of the k clusters becomes the new means.



4) Steps 2 and 3 are repeated until convergence has been reached.

WIKIPEDIA

Algorithme des K-moyennes (K-means)

- Algorithme des K-moyennes en 1D

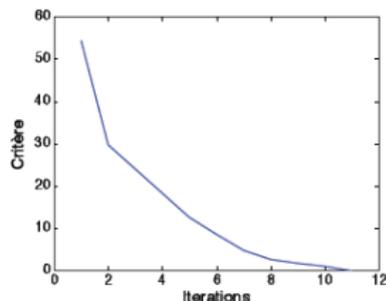
Initialisation (103,239,234)



Segmentation finale (19,219,114)



Convergence du critère



Algorithme des K-moyennes (K-means)

Inconvénients

- Sensibilité à l'initialisation
- Choix du nombre de classe k



variante : Algorithme des Fuzzy c-means

- Fuzzy C-Means : chaque point a un degré "flou" d'appartenance à chaque classe
- On donne maintenant un poids d'appartenance d'un pixel s à une classe k : u_{sk} tel que $\sum_k u_{sk} = 1, \forall s$

variante : Algorithme des Fuzzy c-means

- Fuzzy C-Means : chaque point a un degré "flou" d'appartenance à chaque classe
- On donne maintenant un poids d'appartenance d'un pixel s à une classe k : u_{sk} tel que $\sum_k u_{sk} = 1, \forall s$
- ainsi, la moyenne de la classe k devient :

$$\mu_k = \frac{\sum_s u_{sk} I(s)}{\sum_s u_{sk}}$$

variante : Algorithme des Fuzzy c-means

- Fuzzy C-Means : chaque point a un degré "flou" d'appartenance à chaque classe
- On donne maintenant un poids d'appartenance d'un pixel s à une classe k : u_{sk} tel que $\sum_k u_{sk} = 1, \forall s$
- ainsi, la moyenne de la classe k devient :

$$\mu_k = \frac{\sum_s u_{sk} I(s)}{\sum_s u_{sk}}$$

- le problème devient donc maintenant : trouver μ_1, \dots, μ_K et $U = (u_{sk})$ tels que

$$\sum_k \sum_s u_{sk}^m |I(s) - \mu_k|^2 \text{ soit minimal.}$$

$m > 1$ est un paramètre constant (degré de flou / fuzziness)

variante : Algorithme des Fuzzy c-means

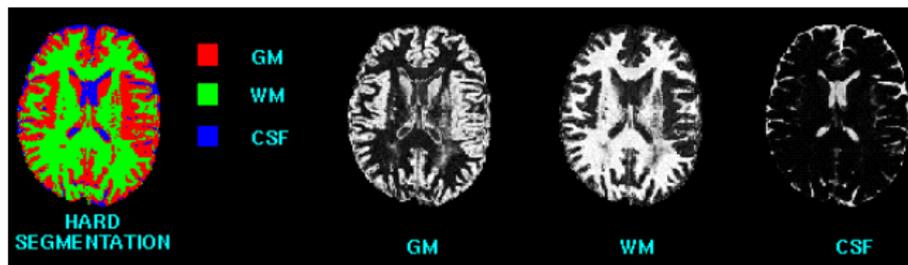
- Ici encore : algorithme itératif

① Répéter

$$① \quad u_{sk} = \sum_{l=1}^K \left(\frac{|I(s) - \mu_k|}{|I(s) - \mu_l|} \right)^{-\frac{2}{m-1}}$$

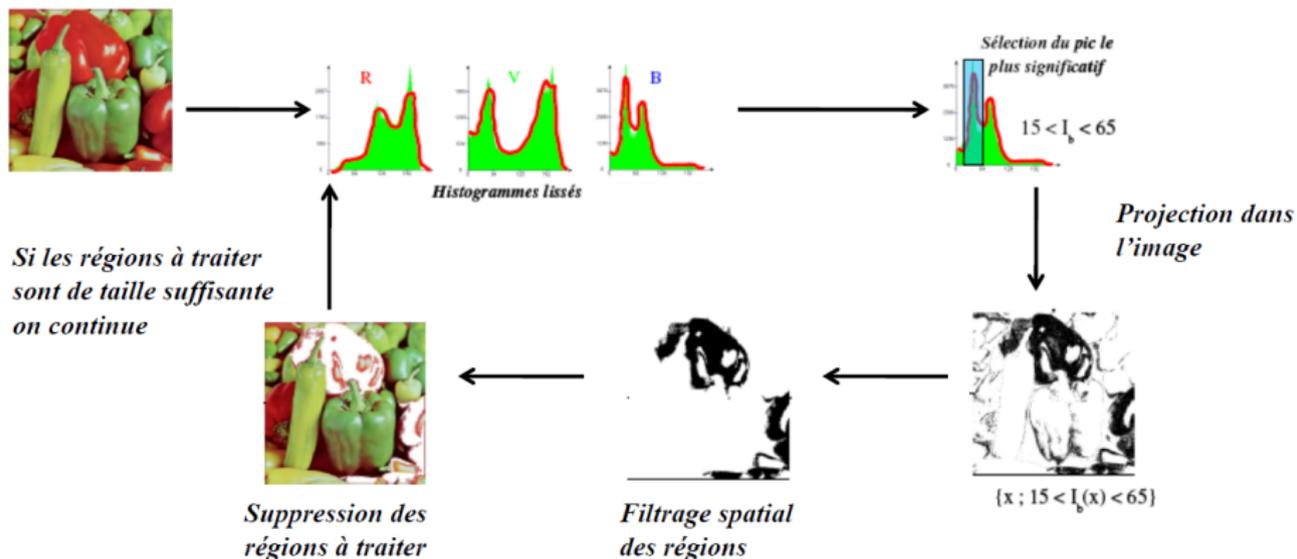
$$② \quad \mu_k = \frac{\sum_s u_{sk} I(s)}{\sum_s u_{sk}}$$

- ② jusqu'à ce que $\max(|u_{sk}^n - u_{sk}^{n-1}|) < \epsilon$

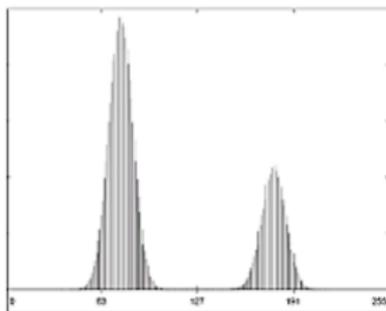
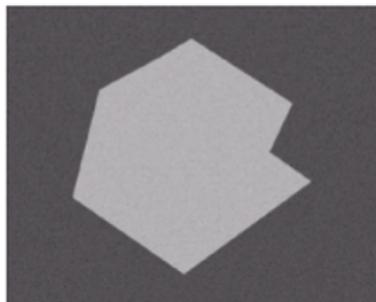


Sélection récursive d'histogramme

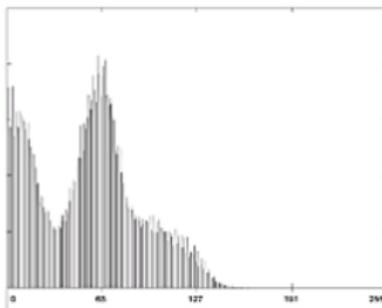
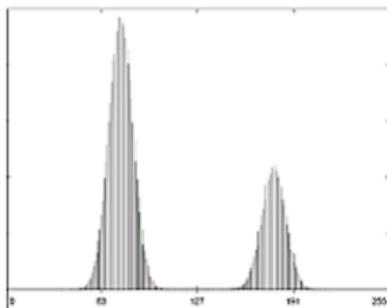
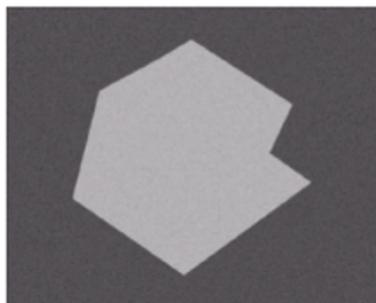
Ohlander, Price et Reddy (1978)



Limite des approches globales



Limite des approches globales



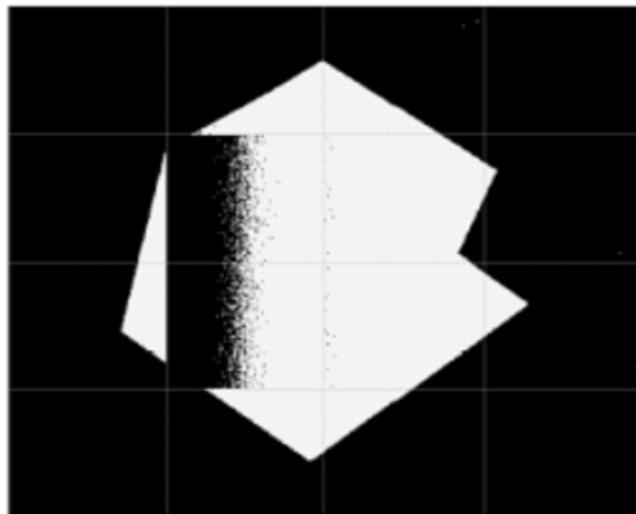
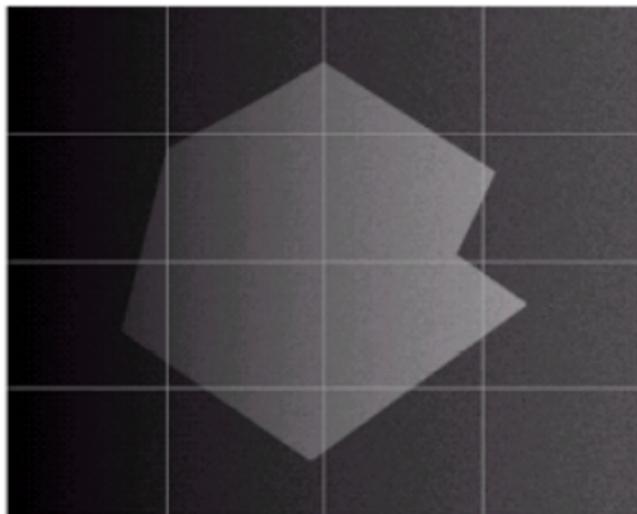
Seuillage par la
méthode d'Otsu

Seuillage adaptatif

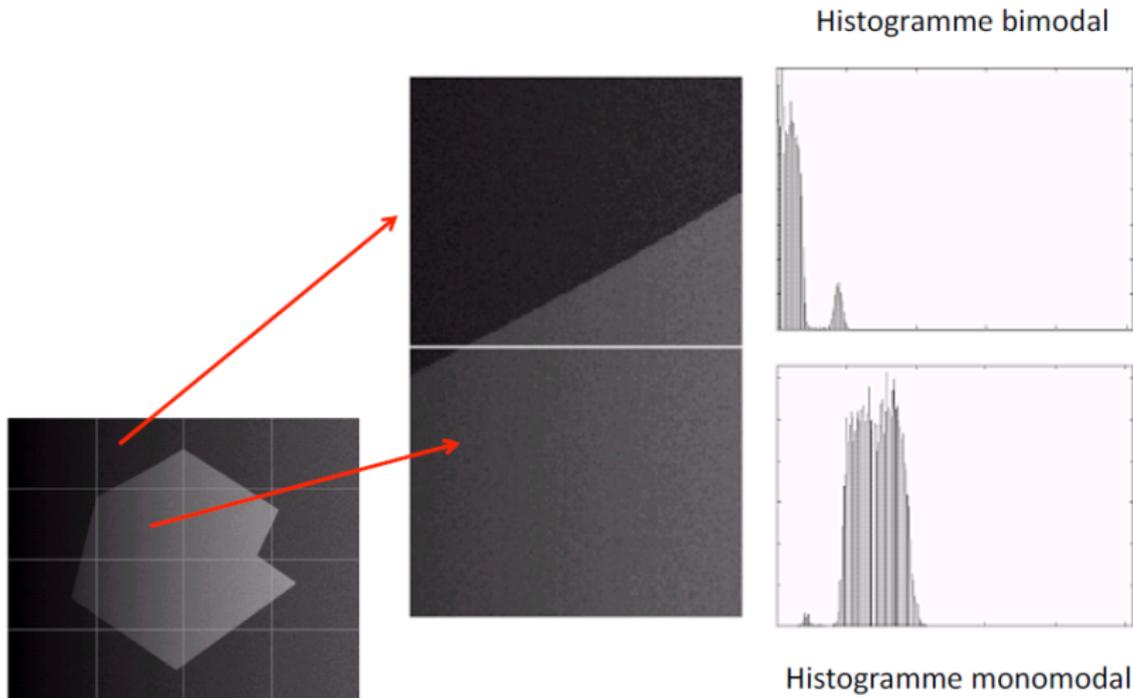
- On divise l'image en un certain nombre de sous-régions
- → seuillage sur chaque région

Seuillage adaptatif

- On divise l'image en un certain nombre de sous-régions
- → seuillage sur chaque région



Seuillage adaptatif



Approches globales : bilan

- **Avantages :**
 - simple, rapide
 - bien adapté aux histogrammes multimodaux

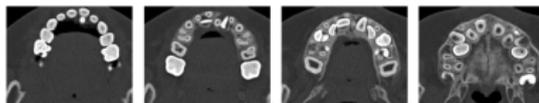
Approches globales : bilan

- **Avantages :**
 - simple, rapide
 - bien adapté aux histogrammes multimodaux
- **Inconvénients :**
 - il faut connaître le nombre de classes
 - choisir les seuils
 - Pas d'information de connexité

Approches globales : bilan

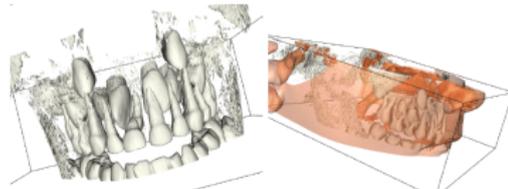
- **Avantages :**
 - simple, rapide
 - bien adapté aux histogrammes multimodaux
- **Inconvénients :**
 - il faut connaître le nombre de classes
 - choisir les seuils
 - Pas d'information de connexité

EX CT-X ...



(a) 4 plans de coupe

Parfois suffisant :



(b) Seuillage à 80

(c) Seuillage à 500

Approches "Régions"

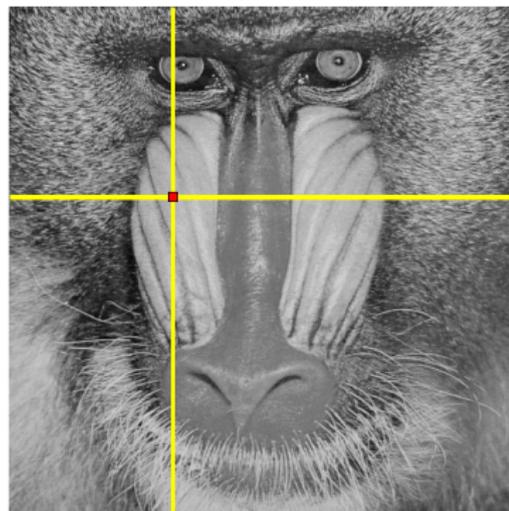
Croissance de régions - Region growing

- on choisit une (ou plusieurs) "graine(s)"
- La région R (pour l'instant réduite à un point) possède une moyenne μ_R et un écart-type σ_R
- On ajoute alors à R tous les pixels voisins de R qui sont suffisamment semblables à R , exple

$$|I(x) - \mu_R| < \text{seuil}$$

ou bien

$$\begin{cases} \min\{|I(x) - I(y)|; y \in R \cap V(x)\} < \text{seuil} \\ |I(x) - \mu_R| < \sigma_R \end{cases}$$



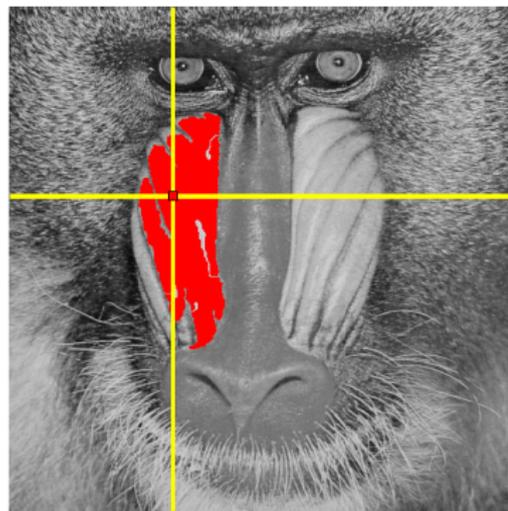
Croissance de régions - Region growing

- on choisit une (ou plusieurs) "graine(s)"
- La région R (pour l'instant réduite à un point) possède une moyenne μ_R et un écart-type σ_R
- On ajoute alors à R tous les pixels voisins de R qui sont suffisamment semblables à R , exple

$$|I(x) - \mu_R| < \text{seuil}$$

ou bien

$$\begin{cases} \min\{|I(x) - I(y)|; y \in R \cap V(x)\} < \text{seuil} \\ |I(x) - \mu_R| < \sigma_R \end{cases}$$



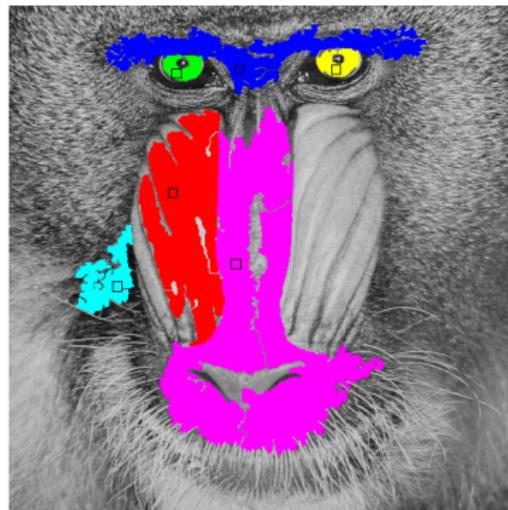
Croissance de régions - Region growing

- on choisit une (ou plusieurs) "graine(s)"
- La région R (pour l'instant réduite à un point) possède une moyenne μ_R et un écart-type σ_R
- On ajoute alors à R tous les pixels voisins de R qui sont suffisamment semblables à R , exple

$$|I(x) - \mu_R| < \text{seuil}$$

ou bien

$$\begin{cases} \min\{|I(x) - I(y)|; y \in R \cap V(x)\} < \text{seuil} \\ |I(x) - \mu_R| < \sigma_R \end{cases}$$



Croissance de régions - Region growing

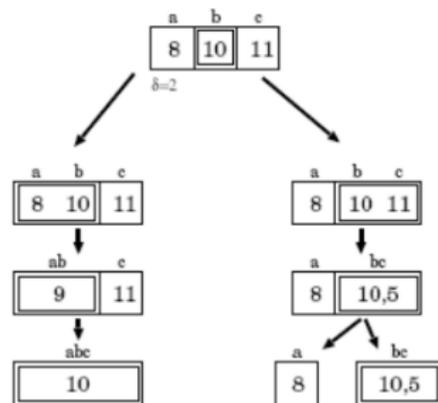
Limitations :

- Influence du choix des graines

Croissance de régions - Region growing

Limitations :

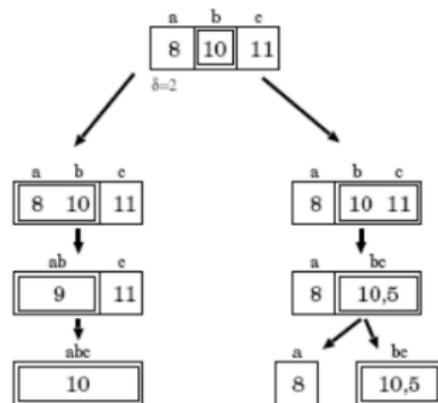
- Influence du choix des graines
- Influence de l'ordre de parcours des points de la frontière



Croissance de régions - Region growing

Limitations :

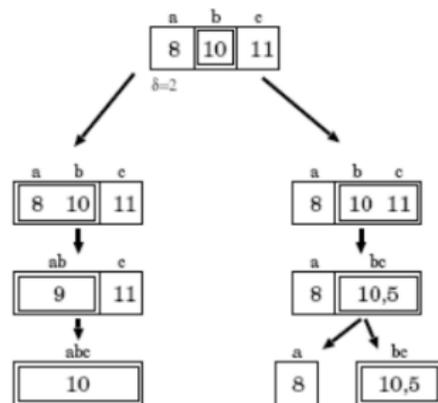
- Influence du choix des graines
- Influence de l'ordre de parcours des points de la frontière
- choix du seuil



Croissance de régions - Region growing

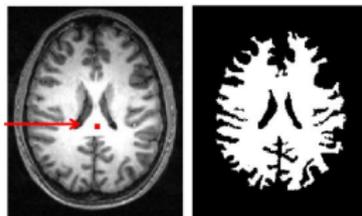
Limitations :

- Influence du choix des graines
- Influence de l'ordre de parcours des points de la frontière
- choix du seuil



Avantage :

- Implémentation : très rapide, si l'on utilise une structure de données adaptée (files d'attente).

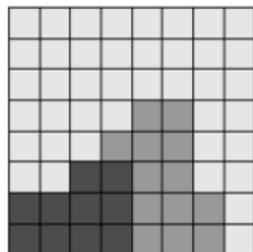


Split and Merge

- Algorithme "split and merge" [Pavlidiset Horowitz, 1974]
 - Le principe consiste à (sur-)diviser l'image en régions homogènes (split) que l'on va ensuite regrouper (merge)
 - étape **split** : on crée une partition de l'image par division récursive en régions de taille identique lorsqu'un critère d'homogénéité n'est pas satisfait.
 - étape **merge** : on utilise le graphe d'adjacence créé pendant le **split** pour regrouper des régions voisines et suffisamment homogènes.

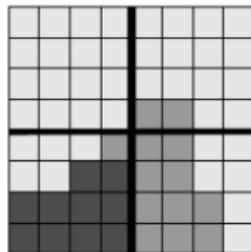
Split and Merge

- Illustration de l'algorithme : **SPLIT**

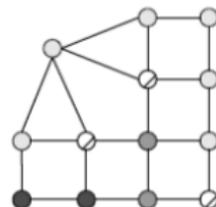
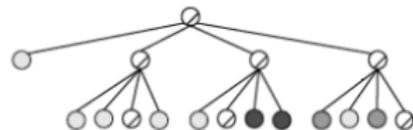
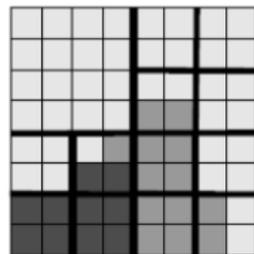
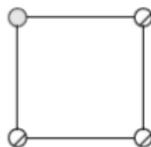


○

Quadtree

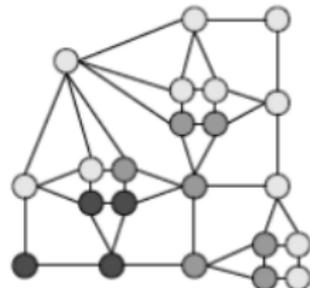
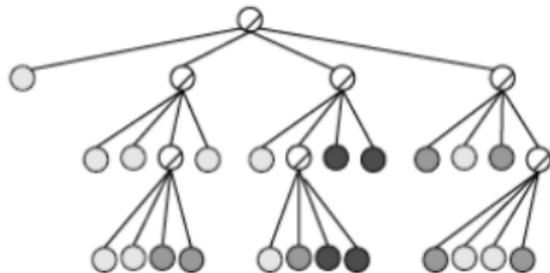
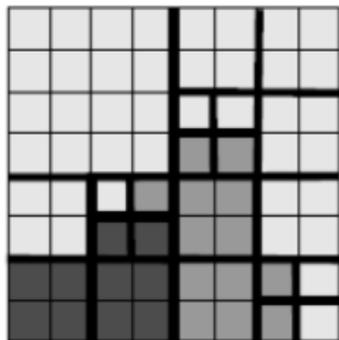


Graphe d'adjacence



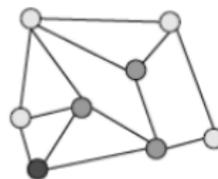
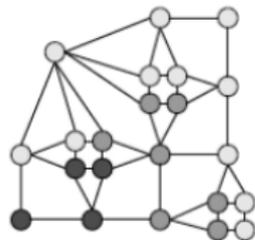
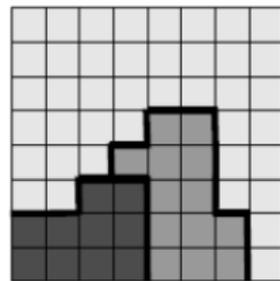
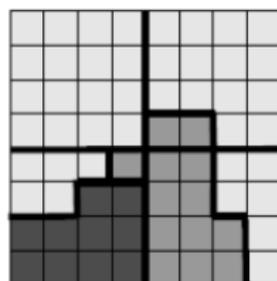
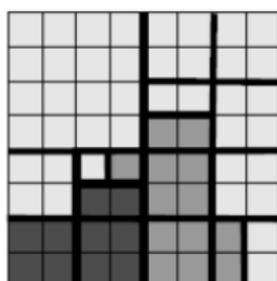
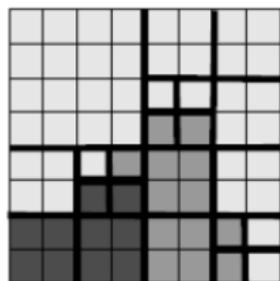
Split and Merge

- Illustration de l'algorithme : **SPLIT**
 - Résultat final de cette étape : sur-segmentation



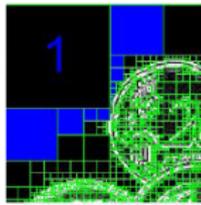
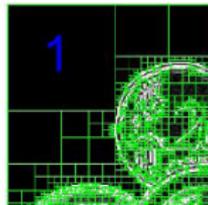
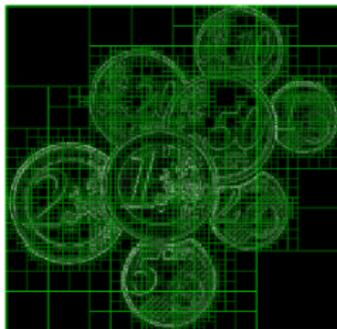
Split and Merge

- Illustration de l'algorithme : **MERGE**



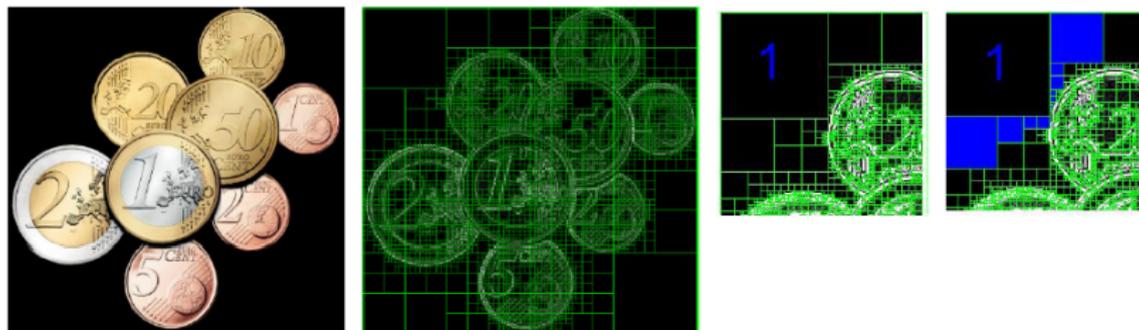
Split and Merge

- La phase SPLIT crée une sur-segmentation de l'image que la phase MERGE vient corriger
- La phase MERGE → croissance de régions



Split and Merge

- La phase SPLIT crée une sur-segmentation de l'image que la phase MERGE vient corriger
- La phase MERGE \rightarrow croissance de régions



- critère d'homogénéité :
 - sur les extrema des régions $\max_R(I(x, y)) - \min_R(I(x, y)) < \epsilon$
 - sur la variance au sein de la région $\sum_R (I(x, y) - \mu_R)^2 < \epsilon$

Split and Merge

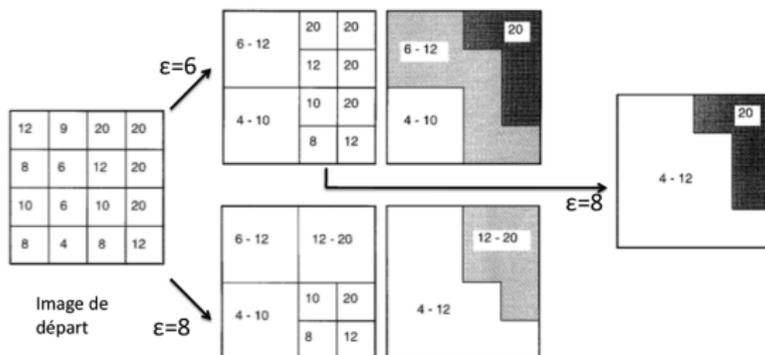
Amélioration

- une sorte de recuit simulé (Manousakas et al. 1998)
- constat :
 - ϵ trop grand \rightarrow splits pas assez nombreux
 - ϵ trop petit \rightarrow pas assez de regroupements
- On utilise $\epsilon/2$ pour la phase de split puis on regroupe en passant progressivement de $\epsilon/2$ à ϵ

Split and Merge

Amélioration

- une sorte de recuit simulé (Manousakas et al. 1998)
- constat :
 - ϵ trop grand \rightarrow splits pas assez nombreux
 - ϵ trop petit \rightarrow pas assez de regroupements
- On utilise $\epsilon/2$ pour la phase de split puis on regroupe en passant progressivement de $\epsilon/2$ à ϵ



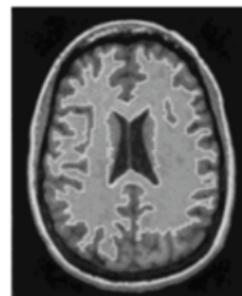
Split and Merge

Amélioration

Image
originelle



SM classique

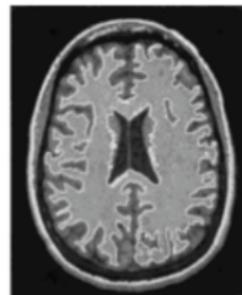


SM classique



SM avec recuit
simulé

SM avec recuit
simulé



Split and Merge

Avantage :

- méthode hybride (locale/globale)

Inconvénients :

- crée des structures carrées dans la segmentation de l'image
- comme pour la croissance de régions : sensibilité à l'ordre de parcours des régions

Il existe encore d'autres méthodes

- CSC (Color Structure Code), Rehrmann et Prieese (1993)
- MDL (Miminum Length Description)

Méthodes markoviennes

- En restauration d'images (méthodes variationnelles), on cherche à minimiser une énergie de la forme : $E_{\text{données}}(u) + E_{\text{régularité}}(u)$

Méthodes markoviennes

- En restauration d'images (méthodes variationnelles), on cherche à minimiser une énergie de la forme : $E_{\text{données}}(u) + E_{\text{régularité}}(u)$
- Dans le cadre bayésien, on donne une interprétation statistique

Méthodes markoviennes

- En restauration d'images (méthodes variationnelles), on cherche à minimiser une énergie de la forme : $E_{\text{données}}(u) + E_{\text{régularité}}(u)$
- Dans le cadre bayésien, on donne une interprétation statistique
- Formule de Bayes :



$$P(A|B) = \frac{P(B|A) P(A)}{P(B)}$$

Méthodes markoviennes

- En restauration d'images (méthodes variationnelles), on cherche à minimiser une énergie de la forme : $E_{\text{données}}(u) + E_{\text{régularité}}(u)$
- Dans le cadre bayésien, on donne une interprétation statistique
- Formule de Bayes :



$$\mathbf{P}(A|B) = \frac{\mathbf{P}(B|A) \mathbf{P}(A)}{\mathbf{P}(B)}$$

- On considère donc nos images comme des réalisations de variables aléatoires : $\mathbf{P}(u|f) = \frac{\mathbf{P}(f|u) \mathbf{P}(u)}{\mathbf{P}(f)}$ où f est l'image observée (à traiter), et u est l'inconnue.

Méthodes markoviennes

- On définit/modélise donc $\mathbf{P}(f|u)$ et $\mathbf{P}(u)$

Méthodes markoviennes

- On définit/modélise donc $\mathbf{P}(f|u)$ et $\mathbf{P}(u)$
- Puis on cherche le u qui **maximise** la probabilité $\mathbf{P}(u|f)$. Donc, pour un f fixé, qui maximise $\mathbf{P}(f|u) \mathbf{P}(u)$

Méthodes markoviennes

- On définit/modélise donc $\mathbf{P}(f|u)$ et $\mathbf{P}(u)$
- Puis on cherche le u qui **maximise** la probabilité $\mathbf{P}(u|f)$. Donc, pour un f fixé, qui maximise $\mathbf{P}(f|u) \mathbf{P}(u)$
- Lien avec méthodes variationnelles : revient à **minimiser**

$$E(u) = -\log \mathbf{P}(u) - \log \mathbf{P}(f|u)$$

Méthodes markoviennes

- On définit/modélise donc $\mathbf{P}(f|u)$ et $\mathbf{P}(u)$
- Puis on cherche le u qui **maximise** la probabilité $\mathbf{P}(u|f)$. Donc, pour un f fixé, qui maximise $\mathbf{P}(f|u) \mathbf{P}(u)$
- Lien avec méthodes variationnelles : revient à **minimiser**

$$E(u) = -\log \mathbf{P}(u) - \log \mathbf{P}(f|u)$$

- probabilité **a priori** $\mathbf{P}(u)$

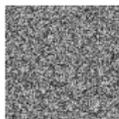
Méthodes markoviennes

- On définit/modélise donc $\mathbf{P}(f|u)$ et $\mathbf{P}(u)$
- Puis on cherche le u qui **maximise** la probabilité $\mathbf{P}(u|f)$. Donc, pour un f fixé, qui maximise $\mathbf{P}(f|u) \mathbf{P}(u)$
- Lien avec méthodes variationnelles : revient à **minimiser**

$$E(u) = -\log \mathbf{P}(u) - \log \mathbf{P}(f|u)$$

- probabilité **a priori** $\mathbf{P}(u)$

- en général



moins probable que

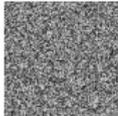


(si images "naturelles")

Méthodes markoviennes

- On définit/modélise donc $\mathbf{P}(f|u)$ et $\mathbf{P}(u)$
- Puis on cherche le u qui **maximise** la probabilité $\mathbf{P}(u|f)$. Donc, pour un f fixé, qui maximise $\mathbf{P}(f|u) \mathbf{P}(u)$
- Lien avec méthodes variationnelles : revient à **minimiser**

$$E(u) = -\log \mathbf{P}(u) - \log \mathbf{P}(f|u)$$

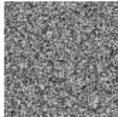
- probabilité **a priori** $\mathbf{P}(u)$
 - en général  moins probable que  (si images "naturelles")
 - débruitage : image régulière plus probable que du bruit

Méthodes markoviennes

- On définit/modélise donc $\mathbf{P}(f|u)$ et $\mathbf{P}(u)$
- Puis on cherche le u qui **maximise** la probabilité $\mathbf{P}(u|f)$. Donc, pour un f fixé, qui maximise $\mathbf{P}(f|u) \mathbf{P}(u)$
- Lien avec méthodes variationnelles : revient à **minimiser**

$$E(u) = -\log \mathbf{P}(u) - \log \mathbf{P}(f|u)$$

- probabilité **a priori** $\mathbf{P}(u)$

- en général  moins probable que  (si images "naturelles")

- débruitage : image régulière plus probable que du bruit

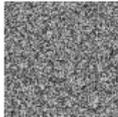
- segmentation :  moins probable que 

Méthodes markoviennes

- On définit/modélise donc $\mathbf{P}(f|u)$ et $\mathbf{P}(u)$
- Puis on cherche le u qui **maximise** la probabilité $\mathbf{P}(u|f)$. Donc, pour un f fixé, qui maximise $\mathbf{P}(f|u) \mathbf{P}(u)$
- Lien avec méthodes variationnelles : revient à **minimiser**

$$E(u) = -\log \mathbf{P}(u) - \log \mathbf{P}(f|u)$$

- probabilité **a priori** $\mathbf{P}(u) \leftarrow$ critère de régularité

- en général  moins probable que  (si images "naturelles")

- débruitage : image régulière plus probable que du bruit

- segmentation :  moins probable que 

Méthodes markoviennes

- **vraisemblance** $P(f | u)$: modélise le processus de formation de l'image

Méthodes markoviennes

- **vraisemblance** $P(f | u)$: modélise le processus de formation de l'image

- débruitage : si $u =$



alors



plus probable que



Méthodes markoviennes

- **vraisemblance $P(f | u)$** : modélise le processus de formation de l'image

- débruitage : si $u =$



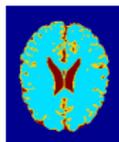
alors



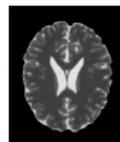
plus probable que



- segmentation : si $u =$



alors



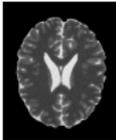
plus probable que



Méthodes markoviennes

- **vraisemblance $\mathbf{P}(f | u)$** : modélise le processus de formation de l'image

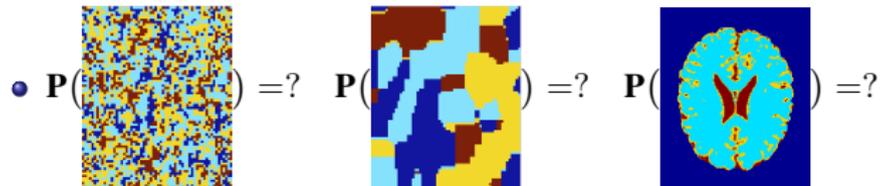
- débruitage : si $u =$  alors  plus probable que 

- segmentation : si $u =$  alors  plus probable que 

- Hypothèse de base : $\mathbf{P}(f | u)$, $\mathbf{P}(u)$ plus facile à modéliser que $\mathbf{P}(u | f)$ (alors que c'est ce dernier qui nous intéresse) \rightarrow utilisation de la formule de Bayes

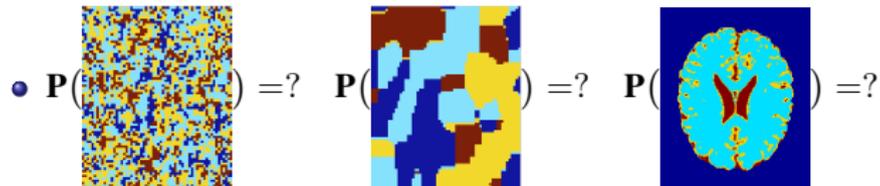
Méthodes markoviennes en segmentation

- probabilité **a priori** $P(u)$



Méthodes markoviennes en segmentation

- probabilité **a priori** $\mathbf{P}(u)$



- critère de régularité pour des images à m classes \rightarrow modèle de Potts

$$\mathbf{P}(u) = \frac{1}{Z} \exp \left(-\beta \sum_{\langle s,t \rangle} \varphi(u_s, u_t) \right)$$

où $\langle s, t \rangle =$ "les pixel s et t sont voisins" et $\varphi(a, b) = \begin{cases} -1, & \text{si } a = b \\ 1, & \text{si } a \neq b \end{cases}$

Méthodes markoviennes en segmentation

- probabilité **a priori** $\mathbf{P}(u)$

- $\mathbf{P}\left(\begin{array}{c} \text{[Noise Image]} \\ \text{[Segmented Image]} \end{array}\right) = ? \quad \mathbf{P}\left(\begin{array}{c} \text{[Segmented Image]} \\ \text{[Segmented Image]} \end{array}\right) = ? \quad \mathbf{P}\left(\begin{array}{c} \text{[Brain MRI]} \\ \text{[Segmented Brain MRI]} \end{array}\right) = ?$

- critère de régularité pour des images à m classes \rightarrow modèle de Potts

$$\mathbf{P}(u) = \frac{1}{Z} \exp \left(-\beta \sum_{\langle s,t \rangle} \varphi(u_s, u_t) \right)$$

où $\langle s, t \rangle =$ "les pixel s et t sont voisins" et $\varphi(a, b) = \begin{cases} -1, & \text{si } a = b \\ 1, & \text{si } a \neq b \end{cases}$

si $\beta > 0 \rightarrow \mathbf{P}\left(\begin{array}{c} \text{[Noise Image]} \\ \text{[Noise Image]} \end{array}\right) < \mathbf{P}\left(\begin{array}{c} \text{[Noise Image]} \\ \text{[Noise Image]} \end{array}\right) < \mathbf{P}\left(\begin{array}{c} \text{[Segmented Image]} \\ \text{[Segmented Image]} \end{array}\right)$

Méthodes markoviennes en segmentation

Modélisation Bayésienne Markovienne :

- vraisemblance des observations $P(f | u)$

$$P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image bruitée} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{Segmentation cérébrale} \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image bateau} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{Segmentation cérébrale} \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image cerveau} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{Segmentation cérébrale} \\ \hline \end{array}\right) = ?$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Modélisation Bayésienne Markovienne :

- vraisemblance des observations $P(f | u)$

$$P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image bruitée} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{Segmentation } u \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image bateau} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{Segmentation } u \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image cerveau} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{Segmentation } u \\ \hline \end{array}\right) = ?$$

- on connaît u (répartition et localisation des différentes zones texturées)

Méthodes markoviennes en segmentation

Modélisation Bayésienne Markovienne :

- vraisemblance des observations $\mathbf{P}(f | u)$

$$\mathbf{P}\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image bruitée} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{U} \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad \mathbf{P}\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image bateau} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{U} \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad \mathbf{P}\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image cerveau} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{U} \\ \hline \end{array}\right) = ?$$

- on connaît u (répartition et localisation des différentes zones texturées)
- Pour un u donné, la probabilité $\mathbf{P}(f|u)$ sera grande (par définition) si f est "cohérent" avec u

Méthodes markoviennes en segmentation

Modélisation Bayésienne Markovienne :

- vraisemblance des observations $\mathbf{P}(f | u)$

$$\mathbf{P}\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image bruitée} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{Mappe } u \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad \mathbf{P}\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image bateau} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{Mappe } u \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad \mathbf{P}\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{Image cerveau} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{Mappe } u \\ \hline \end{array}\right) = ?$$

- on connaît u (répartition et localisation des différentes zones texturées)
- Pour un u donné, la probabilité $\mathbf{P}(f|u)$ sera grande (par définition) si f est "cohérent" avec u , i.e. si les textures présentes dans f sont dans les zones indiquées par u

Méthodes markoviennes en segmentation

Modélisation Bayésienne Markovienne :

- vraisemblance des observations $P(f | u)$

$$P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{grainy texture} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{brain MRI with mask} \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{boat image} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{brain MRI with mask} \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{brain MRI slice} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{brain MRI with mask} \\ \hline \end{array}\right) = ?$$

- on connaît u (répartition et localisation des différentes zones texturées)
- Pour un u donné, la probabilité $P(f|u)$ sera grande (par définition) si f est "cohérent" avec u , i.e. si les textures présentes dans f sont dans les zones indiquées par u
- on choisit de représenter une "texture" par : cste + bruit blanc

Méthodes markoviennes en segmentation

Modélisation Bayésienne Markovienne :

- **vraisemblance des observations $P(f | u)$**

$$P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{[Noise]} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{[Brain Mask]} \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{[Ship]} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{[Brain Mask]} \\ \hline \end{array}\right) = ? \quad P\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{[Brain MRI]} \\ \hline \end{array} \mid \begin{array}{|c|} \hline \text{[Brain Mask]} \\ \hline \end{array}\right) = ?$$

- on connaît u (répartition et localisation des différentes zones texturées)
- Pour un u donné, la probabilité $P(f|u)$ sera grande (par définition) si f est "cohérent" avec u , i.e. si les textures présentes dans f sont dans les zones indiquées par u
- on choisit de représenter une "texture" par : cste + bruit blanc
- Pour un u donné (à valeurs dans $\{0, \dots, M - 1\}$), on choisit donc M textures, c'est à dire M moyennes μ_i et M écart-types σ_i

Méthodes markoviennes en segmentation

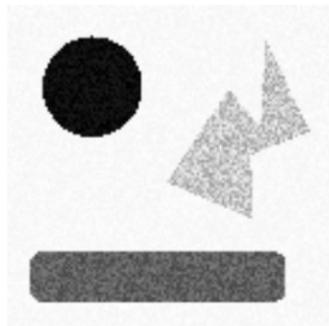
Modélisation Bayésienne Markovienne :

- **vraisemblance des observations $P(f | u)$**

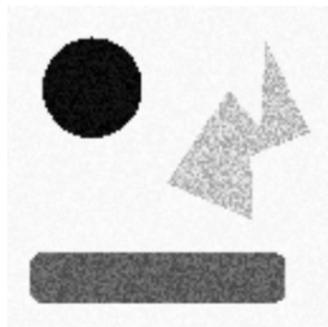
$$P\left(\text{[Image bruitée]} \mid \text{[Mappe de zones]} \right) = ? \quad P\left(\text{[Image bateau]} \mid \text{[Mappe de zones]} \right) = ? \quad P\left(\text{[Image cerveau]} \mid \text{[Mappe de zones]} \right) = ?$$

- on connaît u (répartition et localisation des différentes zones texturées)
- Pour un u donné, la probabilité $P(f|u)$ sera grande (par définition) si f est "cohérent" avec u , i.e. si les textures présentes dans f sont dans les zones indiquées par u
- on choisit de représenter une "texture" par : cste + bruit blanc
- Pour un u donné (à valeurs dans $\{0, \dots, M - 1\}$), on choisit donc M textures, c'est à dire M moyennes μ_i et M écart-types σ_i
- On choisit donc de dire que la valeur de f au point s , qui fait partie de la classe $i = u_s$, va suivre une loi gaussienne : $\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f_s - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)$

Méthodes markoviennes en segmentation



Méthodes markoviennes en segmentation



$$\mu = 15$$
$$\sigma = 10$$



$$\mu = 100$$
$$\sigma = 15$$

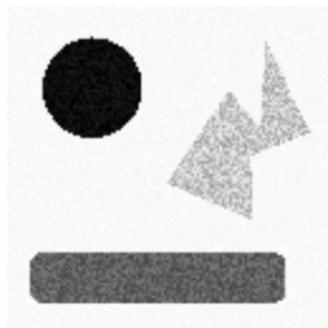


$$\mu = 200$$
$$\sigma = 25$$



$$\mu = 250$$
$$\sigma = 3$$

Méthodes markoviennes en segmentation



$$\mu = 15$$
$$\sigma = 10$$



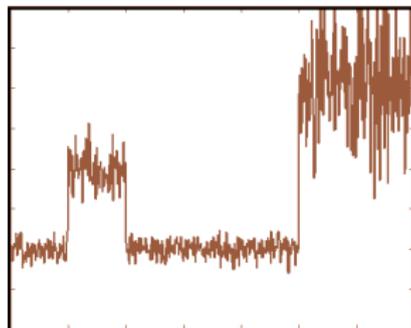
$$\mu = 100$$
$$\sigma = 15$$



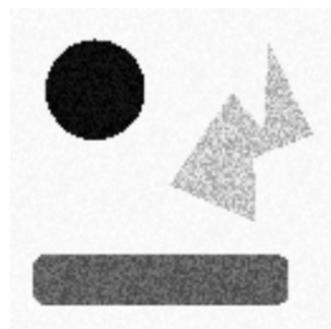
$$\mu = 200$$
$$\sigma = 25$$



$$\mu = 250$$
$$\sigma = 3$$



Méthodes markoviennes en segmentation



$\mu = 15$
 $\sigma = 10$



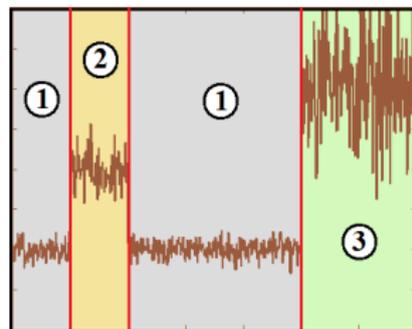
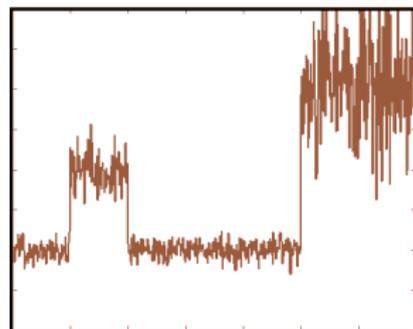
$\mu = 100$
 $\sigma = 15$



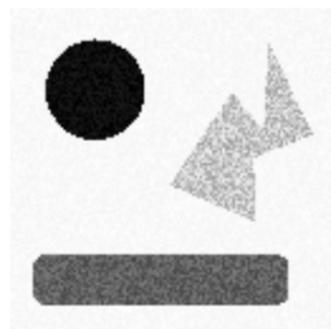
$\mu = 200$
 $\sigma = 25$



$\mu = 250$
 $\sigma = 3$



Méthodes markoviennes en segmentation



$\mu = 15$
 $\sigma = 10$



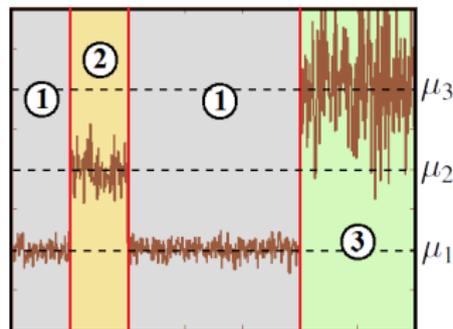
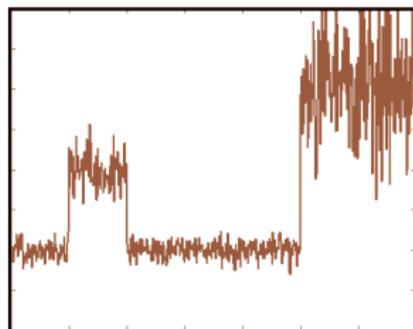
$\mu = 100$
 $\sigma = 15$



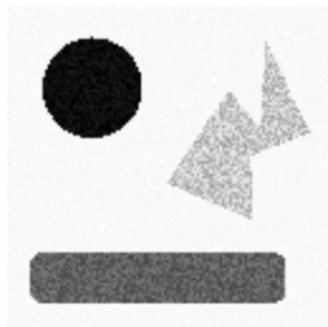
$\mu = 200$
 $\sigma = 25$



$\mu = 250$
 $\sigma = 3$



Méthodes markoviennes en segmentation



$\mu = 15$
 $\sigma = 10$



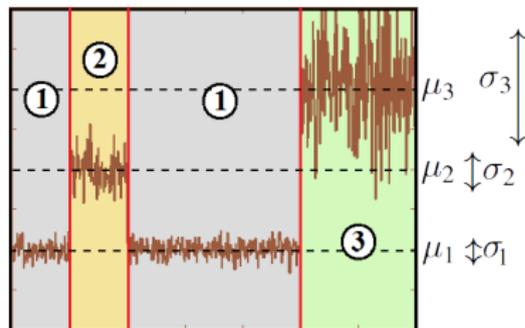
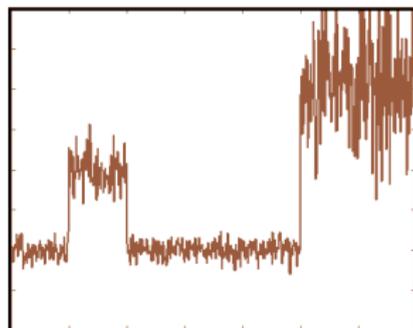
$\mu = 100$
 $\sigma = 15$



$\mu = 200$
 $\sigma = 25$



$\mu = 250$
 $\sigma = 3$



Méthodes markoviennes en segmentation

- vraisemblance des **observations** (proba. de transition) :
 - → loi gaussienne :

$$F_s \mid U_s = i \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

- vraisemblance des **observations** (proba. de transition) :
 - → loi gaussienne :

$$F_s \mid U_s = i \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i)$$

$$\mathbf{P}(F_s = f_s \mid U_s = i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f_s - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

- vraisemblance des **observations** (proba. de transition) :
 - → loi gaussienne :

$$F_s \mid U_s = i \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i)$$

$$\mathbf{P}(F_s = f_s \mid U_s = i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f_s - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

$$\mathbf{P}(F = f \mid U = u) = \prod_s \mathbf{P}(F_s = f_s \mid U_s = u_s)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

- vraisemblance des **observations** (proba. de transition) :
 - → loi gaussienne :

$$F_s \mid U_s = i \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i)$$

$$\mathbf{P}(F_s = f_s \mid U_s = i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f_s - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

$$\mathbf{P}(F = f \mid U = u) = \prod_s \mathbf{P}(F_s = f_s \mid U_s = u_s)$$

- **Remarque** : en quoi la probabilité $\mathbf{P}(F_s = f_s \mid U_s = i)$ dépend-elle de U ?

Méthodes markoviennes en segmentation

- vraisemblance des **observations** (proba. de transition) :
 - → loi gaussienne :

$$F_s \mid U_s = i \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i)$$

$$\mathbf{P}(F_s = f_s \mid U_s = i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f_s - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

$$\mathbf{P}(F = f \mid U = u) = \prod_s \mathbf{P}(F_s = f_s \mid U_s = u_s)$$

- **Remarque** : en quoi la probabilité $\mathbf{P}(F_s = f_s \mid U_s = i)$ dépend-elle de U ?
- L'étiquette donnée par u n'intervient donc "que" par i : si on sait que le pixel s est d'étiquette u_s alors la probabilité de f_s est donnée par une loi gaussienne de moyenne $\boxed{\mu_{u_s}}$ et d'écart-type $\boxed{\sigma_{u_s}}$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Modélisation Bayésienne Markovienne :
 - **a posteriori** :

$$\mathbf{P}(U = u \mid F = f) \propto \mathbf{P}(F = f \mid U = u) \mathbf{P}(U = u)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Modélisation Bayésienne Markovienne :
 - **a posteriori** :

$$\mathbf{P}(U = u \mid F = f) \propto \mathbf{P}(F = f \mid U = u) \mathbf{P}(U = u)$$
$$\propto \left(\prod_s \frac{1}{\sigma_{u_s} \sqrt{2\pi}} \exp \left(- \frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2} \right) \right) \exp \left(- \beta \sum_{\langle s,t \rangle} \phi(u_s, u_t) \right)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Modélisation Bayésienne Markovienne :

- **a posteriori** :

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(U = u \mid F = f) &\propto \mathbf{P}(F = f \mid U = u) \mathbf{P}(U = u) \\ &\propto \left(\prod_s \frac{1}{\sigma_{u_s} \sqrt{2\pi}} \exp \left(- \frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2} \right) \right) \exp \left(- \beta \sum_{\langle s,t \rangle} \phi(u_s, u_t) \right) \\ &\propto \exp \left[\ln \left(\prod_s \frac{1}{\sigma_{u_s} \sqrt{2\pi}} \exp \left(- \frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2} \right) \right) - \beta \sum_{\langle s,t \rangle} \phi(u_s, u_t) \right] \end{aligned}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Modélisation Bayésienne Markovienne :

- **a posteriori** :

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(U = u \mid F = f) &\propto \mathbf{P}(F = f \mid U = u) \mathbf{P}(U = u) \\ &\propto \left(\prod_s \frac{1}{\sigma_{u_s} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2}\right) \right) \exp\left(-\beta \sum_{\langle s,t \rangle} \phi(u_s, u_t)\right) \\ &\propto \exp\left[\ln\left(\prod_s \frac{1}{\sigma_{u_s} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2}\right)\right) - \beta \sum_{\langle s,t \rangle} \phi(u_s, u_t)\right] \\ &\propto \exp\left[\sum_s \ln\left(\frac{1}{\sigma_{u_s} \sqrt{2\pi}}\right) - \sum_s \frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2} - \beta \sum_{\langle s,t \rangle} \phi(u_s, u_t)\right] \end{aligned}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Modélisation Bayésienne Markovienne :

- **a posteriori** :

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}(U = u \mid F = f) &\propto \mathbf{P}(F = f \mid U = u) \mathbf{P}(U = u) \\
 &\propto \left(\prod_s \frac{1}{\sigma_{u_s} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2}\right) \right) \exp\left(-\beta \sum_{\langle s,t \rangle} \phi(u_s, u_t)\right) \\
 &\propto \exp\left[\ln\left(\prod_s \frac{1}{\sigma_{u_s} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2}\right)\right) - \beta \sum_{\langle s,t \rangle} \phi(u_s, u_t)\right] \\
 &\propto \exp\left[\sum_s \ln\left(\frac{1}{\sigma_{u_s} \sqrt{2\pi}}\right) - \sum_s \frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2} - \beta \sum_{\langle s,t \rangle} \phi(u_s, u_t)\right] \\
 &\propto \exp\left[-\sum_s \ln \sigma_{u_s} - \sum_s \frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2} - \beta \sum_{\langle s,t \rangle} \phi(u_s, u_t)\right]
 \end{aligned}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

- On a donc construit un modèle probabiliste qui donne la probabilité d'avoir une segmentation u étant donné une image f (à un facteur de normalisation près)

Méthodes markoviennes en segmentation

- On a donc construit un modèle probabiliste qui donne la probabilité d'avoir une segmentation u étant donné une image f (à un facteur de normalisation près)
- Cette probabilité peut s'écrire sous la forme d'un champ de Gibbs/Markov :

$$\mathbf{P}(U = u \mid F = f) \propto \exp \left(- H(u, f) \right)$$

$$\text{avec } H(u, f) = \sum_s \ln \sigma_{u_s} + \sum_s \frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2} + \beta \sum_{\langle s, t \rangle} \phi(u_s, u_t)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

- On a donc construit un modèle probabiliste qui donne la probabilité d'avoir une segmentation u étant donné une image f (à un facteur de normalisation près)
- Cette probabilité peut s'écrire sous la forme d'un champ de Gibbs/Markov :

$$\mathbf{P}(U = u \mid F = f) \propto \exp \left(- H(u, f) \right)$$

$$\text{avec } H(u, f) = \sum_s \ln \sigma_{u_s} + \sum_s \frac{(f_s - \mu_{u_s})^2}{2\sigma_{u_s}^2} + \beta \sum_{\langle s, t \rangle} \phi(u_s, u_t)$$

- Remarque : Maximiser $\mathbf{P}(U = u \mid F = f)$ revient à minimiser $H(u, f)$

Méthodes markoviennes en segmentation

Maximum A Posteriori

estimateur MAP (Maximum A Posteriori) :

- u tel que $\mathbf{P}(U = u \mid F = f)$ maximum (pour f donné)
- i.e. u tel que $H(u, f)$ minimum

Méthodes markoviennes en segmentation

Maximum A Posteriori

estimateur MAP (Maximum A Posteriori) :

- u tel que $\mathbf{P}(U = u \mid F = f)$ maximum (pour f donné)
- i.e. u tel que $H(u, f)$ minimum

- Comment minimiser ? énergie trop irrégulière pour descente de gradient ou similaire
- Algorithme stochastique \rightarrow **recuit simulé**
- Besoin d'un outil permettant d'échantillonner une distribution de probabilité \rightarrow **Algorithme de Metropolis-Hastings**

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

- réaliser le tirage d'une config. en suivant une loi de probabilité donnée ?

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

- réaliser le tirage d'une config. en suivant une loi de probabilité donnée ?
- Exemples
 - Tirage à Pile ou Face : $\mathbf{P}(Pile) = \mathbf{P}(Face) = \frac{1}{2}$

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

- réaliser le tirage d'une config. en suivant une loi de probabilité donnée ?
- Exemples
 - Tirage à Pile ou Face : $\mathbf{P}(Pile) = \mathbf{P}(Face) = \frac{1}{2}$
 - Lancer d'un dé truqué : 3 fois plus de chance pour $\{4, 5, 6\}$ que pour $\{1, 2, 3\}$

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

- réaliser le tirage d'une config. en suivant une loi de probabilité donnée ?
- Exemples
 - Tirage à Pile ou Face : $\mathbf{P}(Pile) = \mathbf{P}(Face) = \frac{1}{2}$
 - Lancer d'un dé truqué : 3 fois plus de chance pour $\{4, 5, 6\}$ que pour $\{1, 2, 3\}$

$$\mathbf{P}(D = i) = p_i, p_1 = p_2 = p_3 = \frac{1}{12}, p_4 = p_5 = p_6 = \frac{3}{12}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

- réaliser le tirage d'une config. en suivant une loi de probabilité donnée ?
- Exemples
 - Tirage à Pile ou Face : $\mathbf{P}(Pile) = \mathbf{P}(Face) = \frac{1}{2}$
 - Lancer d'un dé truqué : 3 fois plus de chance pour $\{4, 5, 6\}$ que pour $\{1, 2, 3\}$

$$\mathbf{P}(D = i) = p_i, p_1 = p_2 = p_3 = \frac{1}{12}, p_4 = p_5 = p_6 = \frac{3}{12}$$

```
r = rand();  
if (r<1/12)  
    result = 1;  
elseif (r<2/12)  
    result = 2;  
elseif (r<3/12)  
    result = 3;  
elseif (r<6/12)  
    result = 4;  
elseif (r<9/12)  
    result = 5;  
else  
    result = 6;  
end  
disp(result);
```

→ 4

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

- réaliser le tirage d'une config. en suivant une loi de probabilité donnée ?
- Exemples
 - Tirage à Pile ou Face : $\mathbf{P}(Pile) = \mathbf{P}(Face) = \frac{1}{2}$
 - Lancer d'un dé truqué : 3 fois plus de chance pour $\{4, 5, 6\}$ que pour $\{1, 2, 3\}$

$$\mathbf{P}(D = i) = p_i, p_1 = p_2 = p_3 = \frac{1}{12}, p_4 = p_5 = p_6 = \frac{3}{12}$$

```
r = rand();
if (r<1/12)
    result = 1;
elseif (r<2/12)
    result = 2;
elseif (r<3/12)
    result = 3;
elseif (r<6/12)
    result = 4;
elseif (r<9/12)
    result = 5;
else
    result = 6;
end
disp(result);
```

→ 6

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

- réaliser le tirage d'une config. en suivant une loi de probabilité donnée ?
- Exemples
 - Tirage à Pile ou Face : $\mathbf{P}(Pile) = \mathbf{P}(Face) = \frac{1}{2}$
 - Lancer d'un dé truqué : 3 fois plus de chance pour $\{4, 5, 6\}$ que pour $\{1, 2, 3\}$

$$\mathbf{P}(D = i) = p_i, p_1 = p_2 = p_3 = \frac{1}{12}, p_4 = p_5 = p_6 = \frac{3}{12}$$

```
r = rand();
if (r<1/12)
    result = 1;
elseif (r<2/12)
    result = 2;
elseif (r<3/12)
    result = 3;
elseif (r<6/12)
    result = 4;
elseif (r<9/12)
    result = 5;
else
    result = 6;
end
disp(result);
```

→ 4

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

- réaliser le tirage d'une config. en suivant une loi de probabilité donnée ?
- Exemples
 - Tirage à Pile ou Face : $\mathbf{P}(Pile) = \mathbf{P}(Face) = \frac{1}{2}$
 - Lancer d'un dé truqué : 3 fois plus de chance pour $\{4, 5, 6\}$ que pour $\{1, 2, 3\}$

$$\mathbf{P}(D = i) = p_i, p_1 = p_2 = p_3 = \frac{1}{12}, p_4 = p_5 = p_6 = \frac{3}{12}$$

```
r = rand();  
if (r<1/12)  
    result = 1;  
elseif (r<2/12)  
    result = 2;  
elseif (r<3/12)  
    result = 3;  
elseif (r<6/12)  
    result = 4;  
elseif (r<9/12)  
    result = 5;  
else  
    result = 6;  
end  
disp(result);
```

→ 1

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

- réaliser le tirage d'une config. en suivant une loi de probabilité donnée ?
- Exemples
 - Tirage à Pile ou Face : $\mathbf{P}(Pile) = \mathbf{P}(Face) = \frac{1}{2}$
 - Lancer d'un dé truqué : 3 fois plus de chance pour $\{4, 5, 6\}$ que pour $\{1, 2, 3\}$

$$\mathbf{P}(D = i) = p_i, p_1 = p_2 = p_3 = \frac{1}{12}, p_4 = p_5 = p_6 = \frac{3}{12}$$

```
r = rand();  
if (r<1/12)  
    result = 1;  
elseif (r<2/12)  
    result = 2;  
elseif (r<3/12)  
    result = 3;  
elseif (r<6/12)  
    result = 4;  
elseif (r<9/12)  
    result = 5;  
else  
    result = 6;  
end  
disp(result);
```

→ 5

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

- réaliser le tirage d'une config. en suivant une loi de probabilité donnée ?
- Exemples
 - Tirage à Pile ou Face : $\mathbf{P}(Pile) = \mathbf{P}(Face) = \frac{1}{2}$
 - Lancer d'un dé truqué : 3 fois plus de chance pour $\{4, 5, 6\}$ que pour $\{1, 2, 3\}$

$$\mathbf{P}(D = i) = p_i, p_1 = p_2 = p_3 = \frac{1}{12}, p_4 = p_5 = p_6 = \frac{3}{12}$$

```
r = rand();  
if (r<1/12)  
    result = 1;  
elseif (r<2/12)  
    result = 2;  
elseif (r<3/12)  
    result = 3;  
elseif (r<6/12)  
    result = 4;  
elseif (r<9/12)  
    result = 5;  
else  
    result = 6;  
end  
disp(result);
```

→ 6

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

Problème

- Donnée : un champ de Markov π , i.e. un système de voisinage et des potentiels de cliques

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

Problème

- Donnée : un champ de Markov π , i.e. un système de voisinage et des potentiels de cliques
- Comment tirer une réalisation selon la loi $\pi(X) \propto \exp\left(-\sum_{C \in \mathcal{C}} V_C(x_C)\right)$? On ne connaît généralement pas le facteur de normalisation Z .

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

Problème

- Donnée : un champ de Markov π , i.e. un système de voisinage et des potentiels de cliques
- Comment tirer une réalisation selon la loi $\pi(X) \propto \exp\left(-\sum_{C \in \mathcal{C}} V_C(x_C)\right)$? On ne connaît généralement pas le facteur de normalisation Z .

Méthodes de Monte-Carlo

- Toute méthode d'approximation utilisant un générateur de nombres (pseudo-)aléatoires

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

Problème

- Donnée : un champ de Markov π , i.e. un système de voisinage et des potentiels de cliques
- Comment tirer une réalisation selon la loi $\pi(X) \propto \exp\left(-\sum_{C \in \mathcal{C}} V_C(x_C)\right)$? On ne connaît généralement pas le facteur de normalisation Z .

Méthodes de Monte-Carlo

- Toute méthode d'approximation utilisant un générateur de nombres (pseudo-)aléatoires

Chaîne de Markov Monte-Carlo (MCMC)

- **but** : générer une chaîne de Markov X^0, X^1, \dots, X^m "convergeant" vers la distribution cible π

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

Problème

- Donnée : un champ de Markov π , i.e. un système de voisinage et des potentiels de cliques
- Comment tirer une réalisation selon la loi $\pi(X) \propto \exp\left(-\sum_{C \in \mathcal{C}} V_C(x_C)\right)$? On ne connaît généralement pas le facteur de normalisation Z .

Méthodes de Monte-Carlo

- Toute méthode d'approximation utilisant un générateur de nombres (pseudo-)aléatoires

Chaîne de Markov Monte-Carlo (MCMC)

- **but** : générer une chaîne de Markov X^0, X^1, \dots, X^m "convergeant" vers la distribution cible π

$$\forall x^0 \in \Omega, \mathbf{P}(X^m = x | X^0 = x^0) \xrightarrow{m \rightarrow +\infty} \pi(x)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction

Problème

- Donnée : un champ de Markov π , i.e. un système de voisinage et des potentiels de cliques
- Comment tirer une réalisation selon la loi $\pi(X) \propto \exp\left(-\sum_{C \in \mathcal{C}} V_C(x_C)\right)$? On ne connaît généralement pas le facteur de normalisation Z .

Méthodes de Monte-Carlo

- Toute méthode d'approximation utilisant un générateur de nombres (pseudo-)aléatoires

Chaîne de Markov Monte-Carlo (MCMC)

- **but** : générer une chaîne de Markov X^0, X^1, \dots, X^m "convergeant" vers la distribution cible π

$$\forall x^0 \in \Omega, \mathbf{P}(X^m = x | X^0 = x^0) \xrightarrow{m \rightarrow +\infty} \pi(x)$$

- **moyen** : concevoir des "remises à jours" exploitant la décomposition locale du champ de Markov

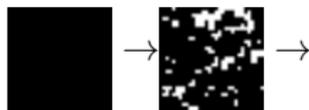
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



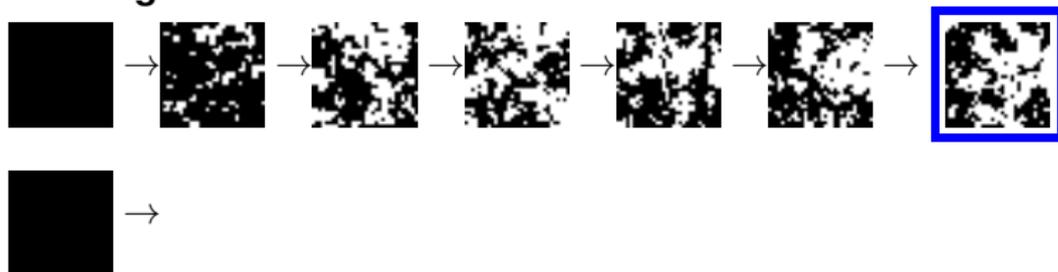
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



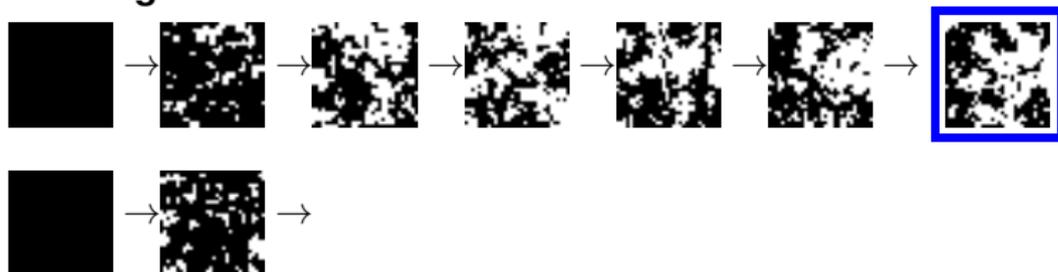
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



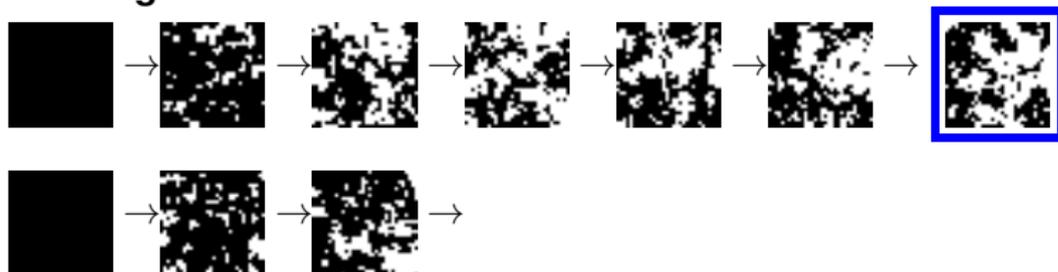
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



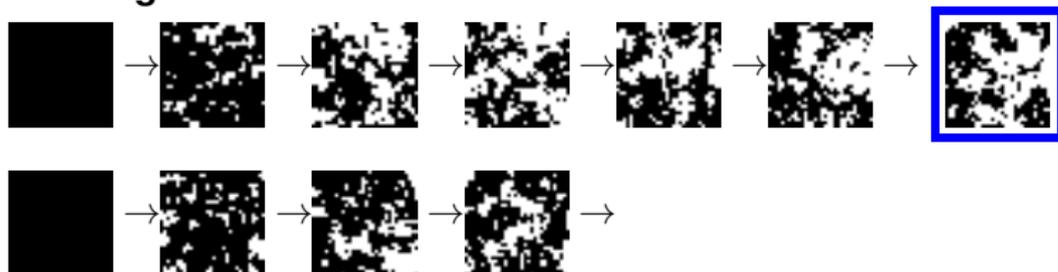
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



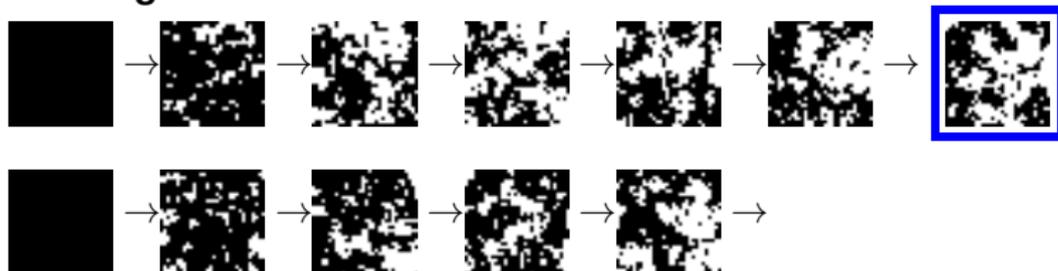
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



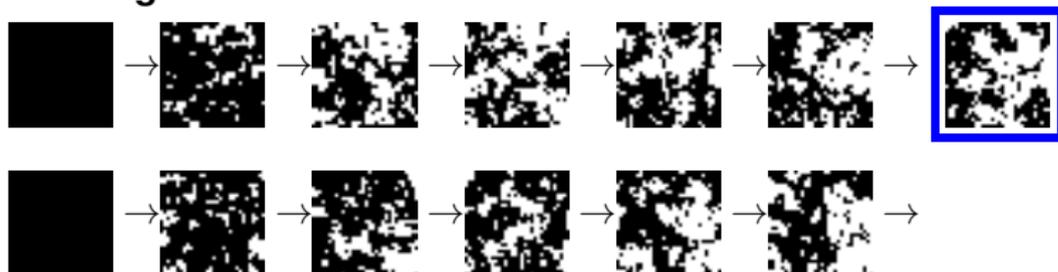
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



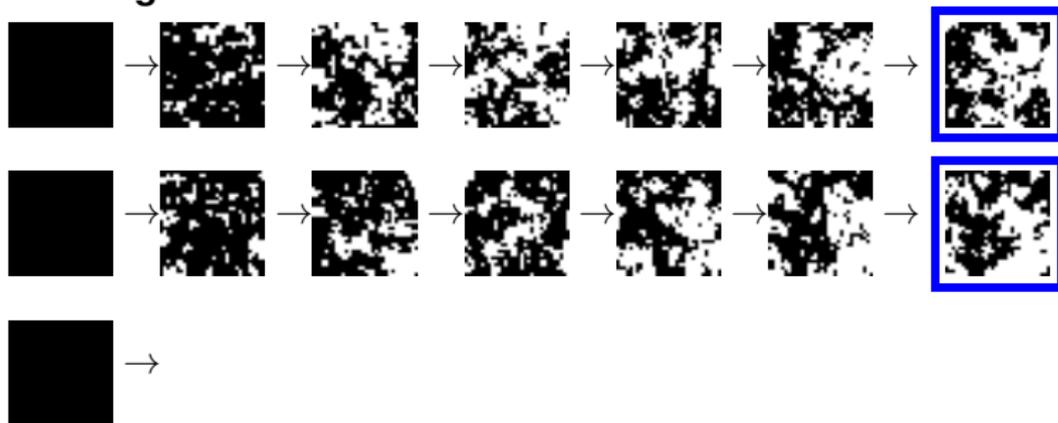
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



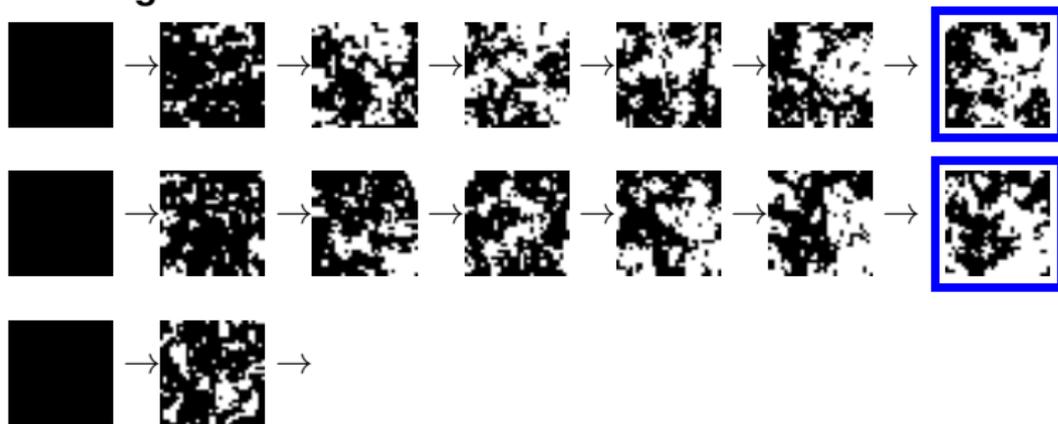
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



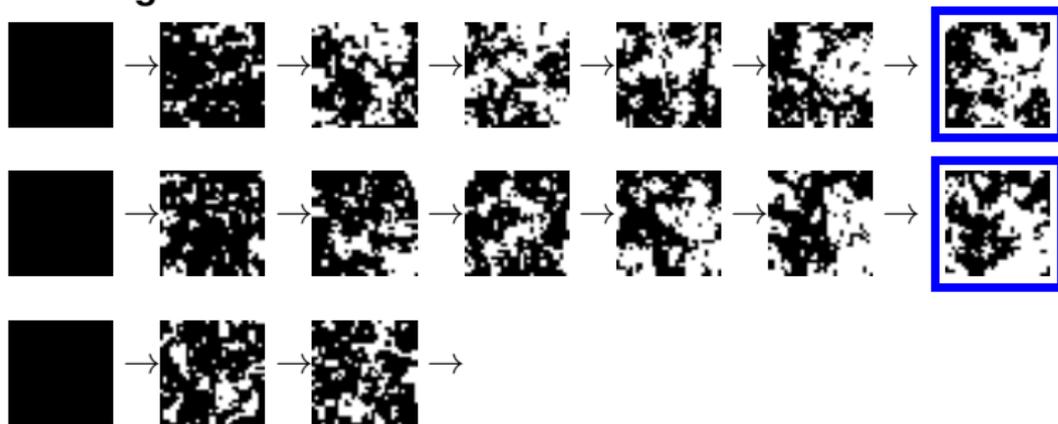
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



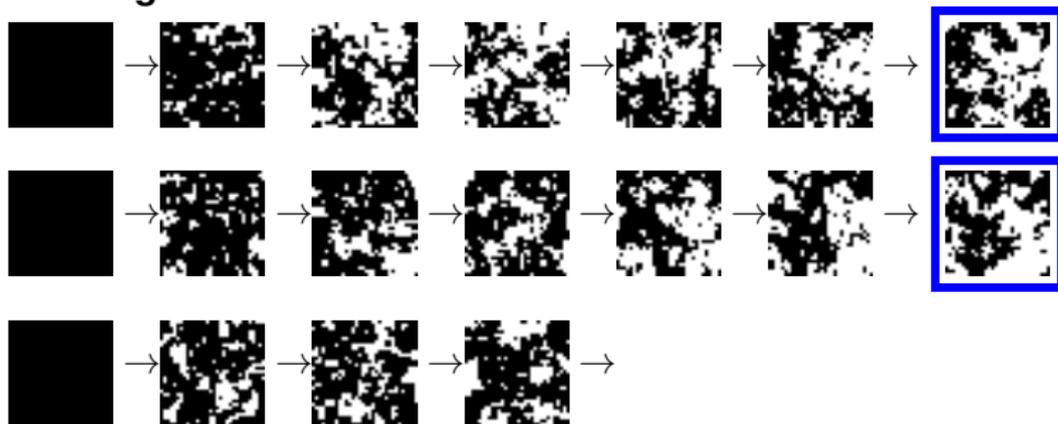
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



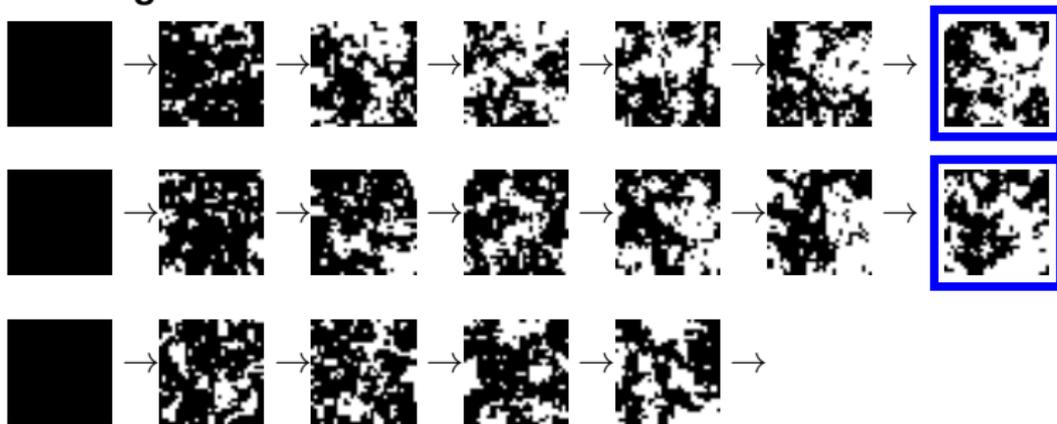
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



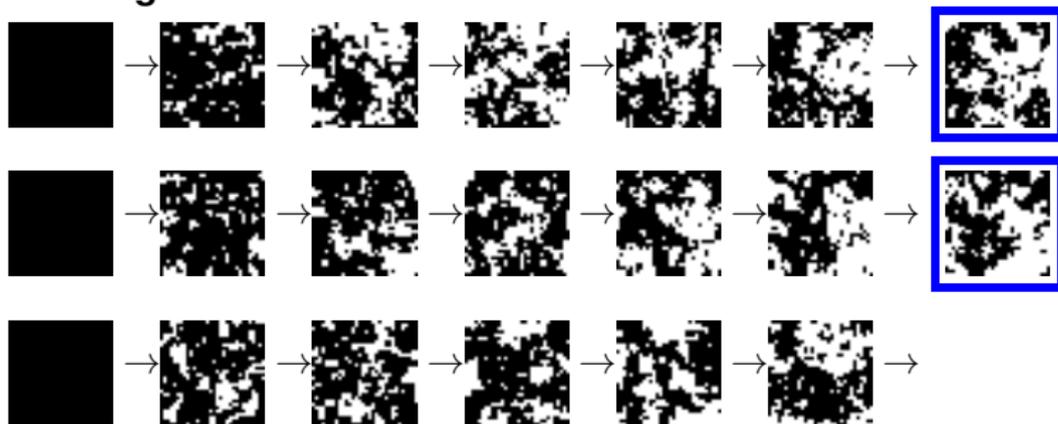
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



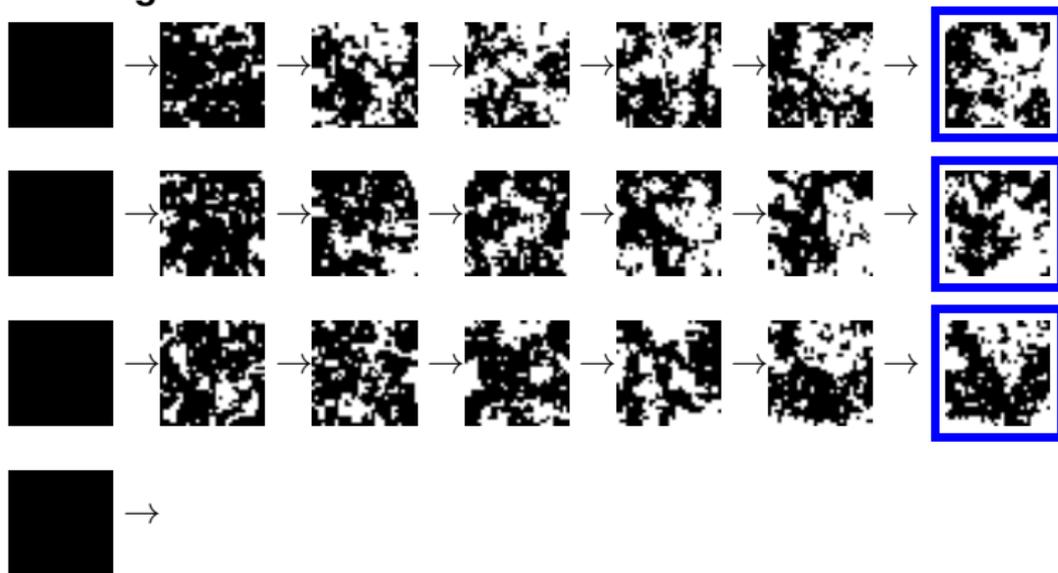
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



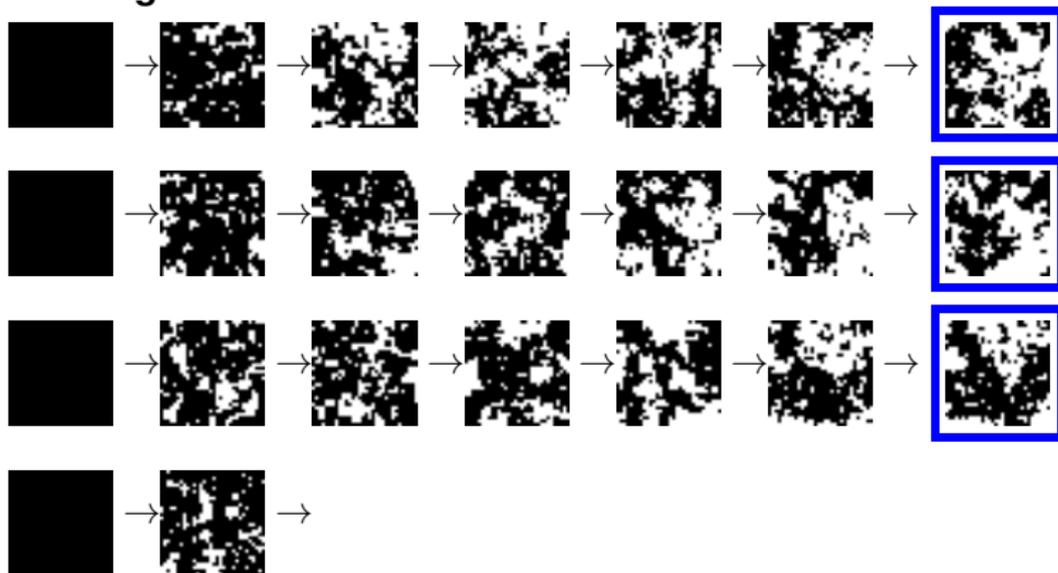
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



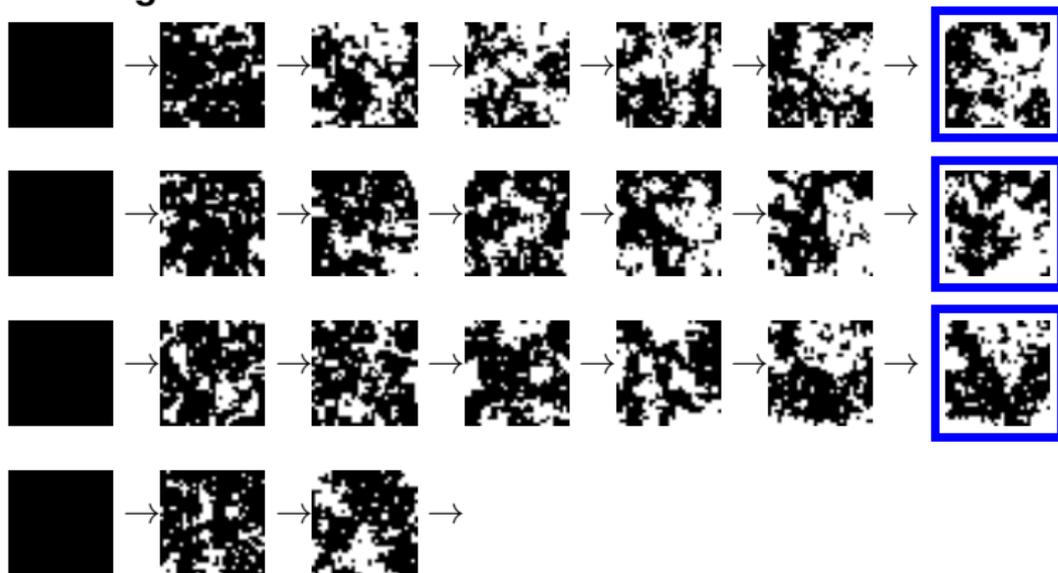
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



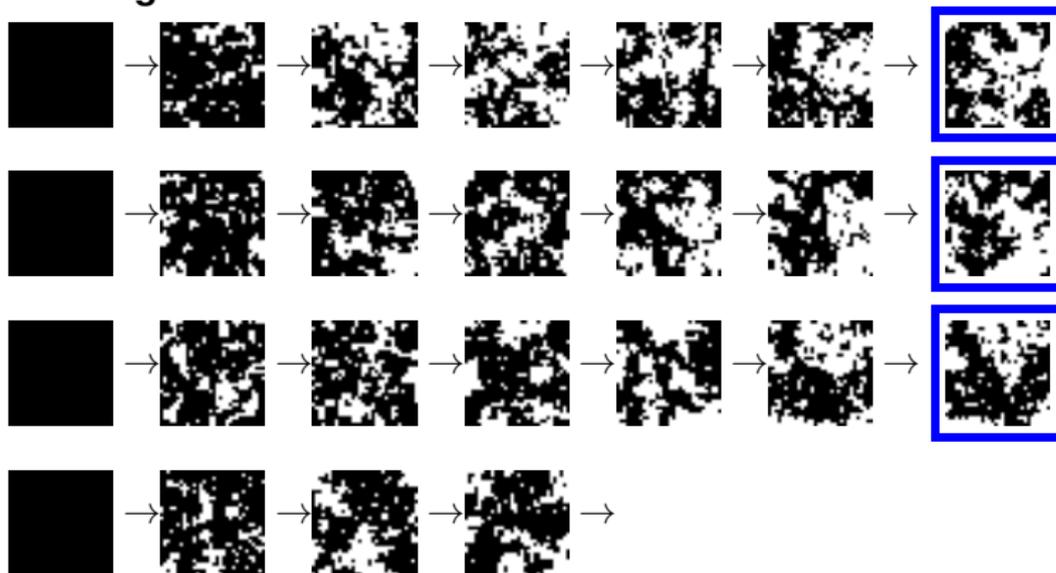
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



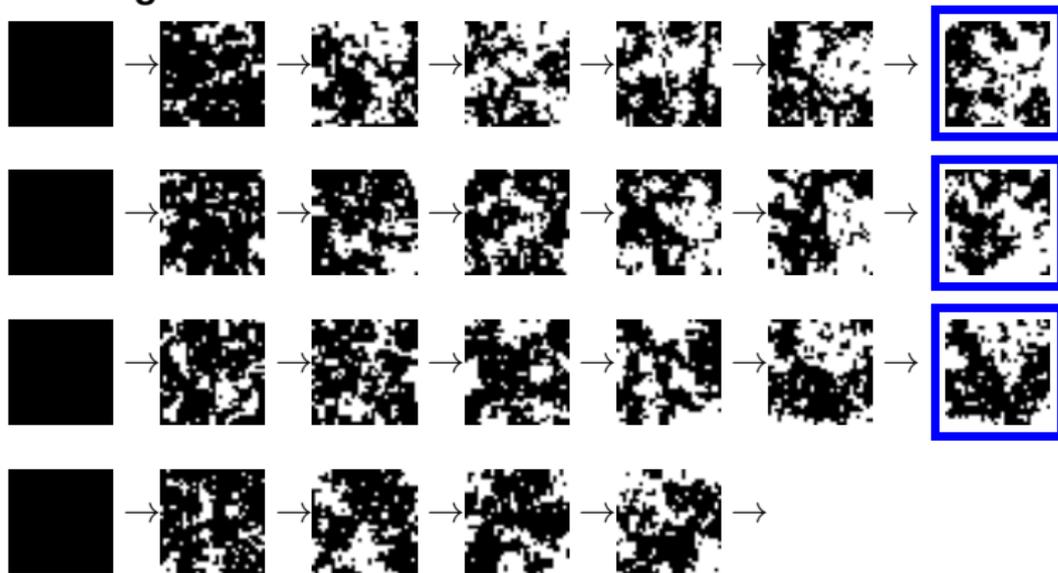
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



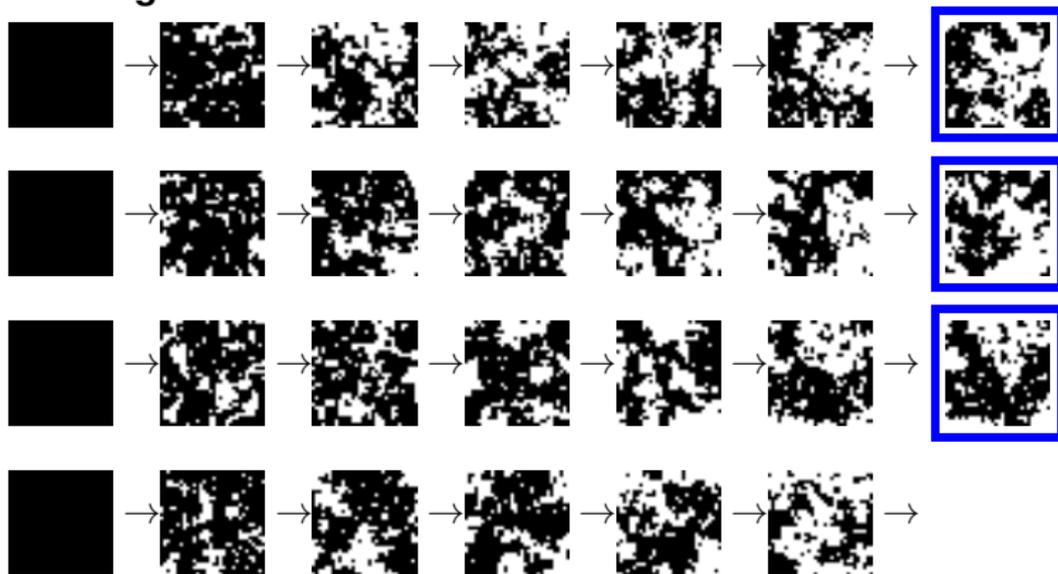
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



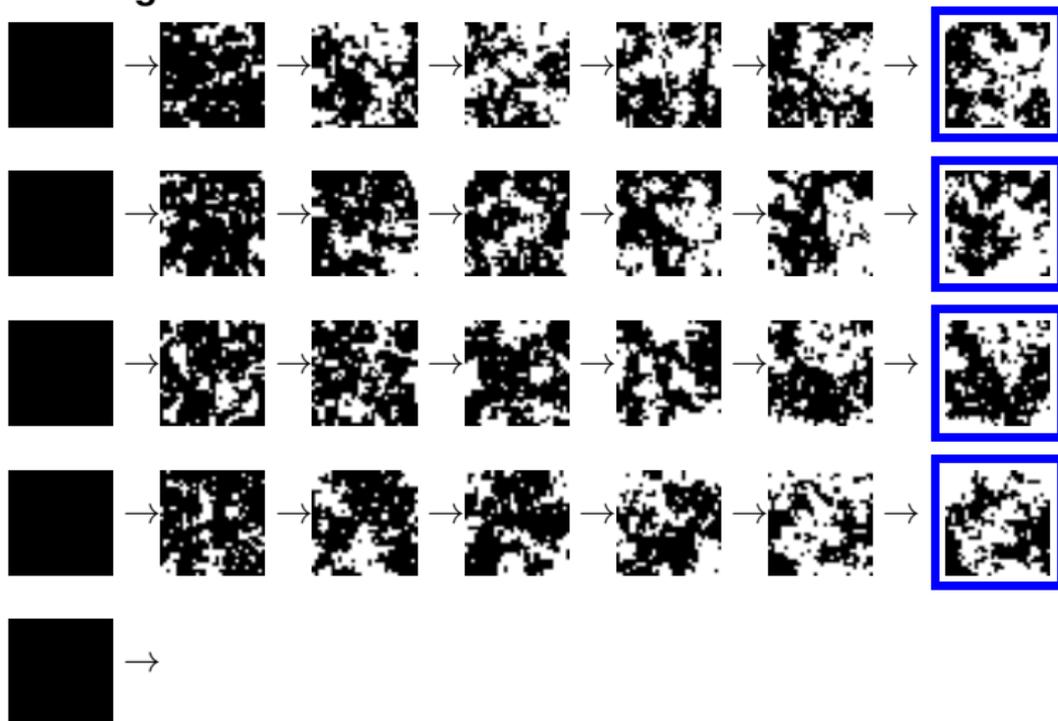
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



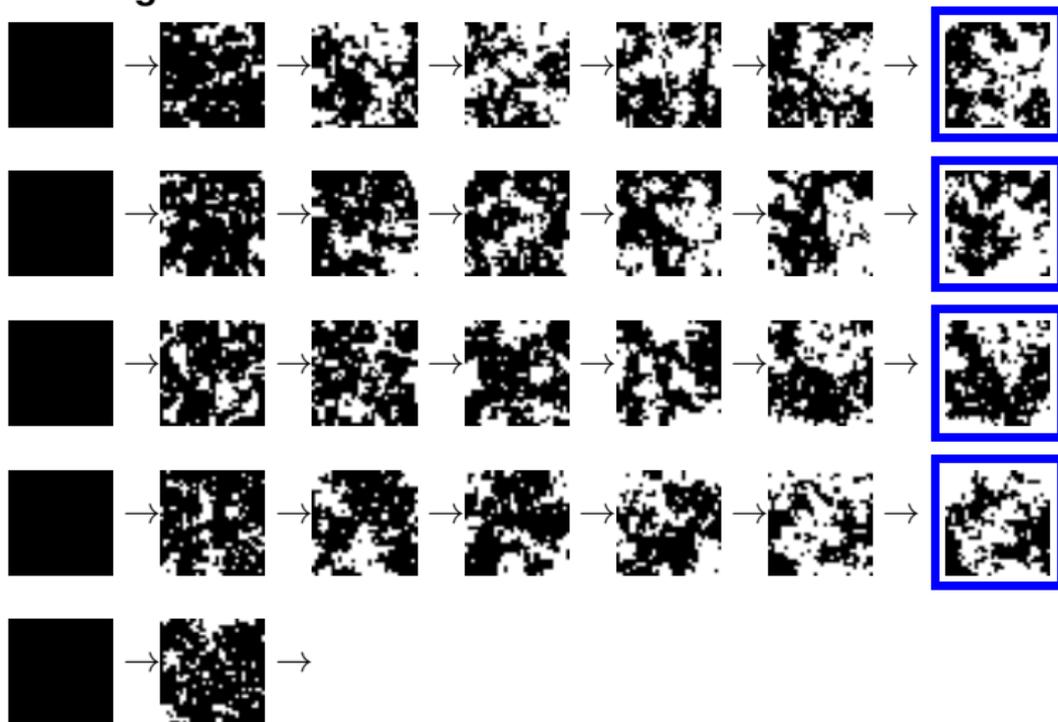
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



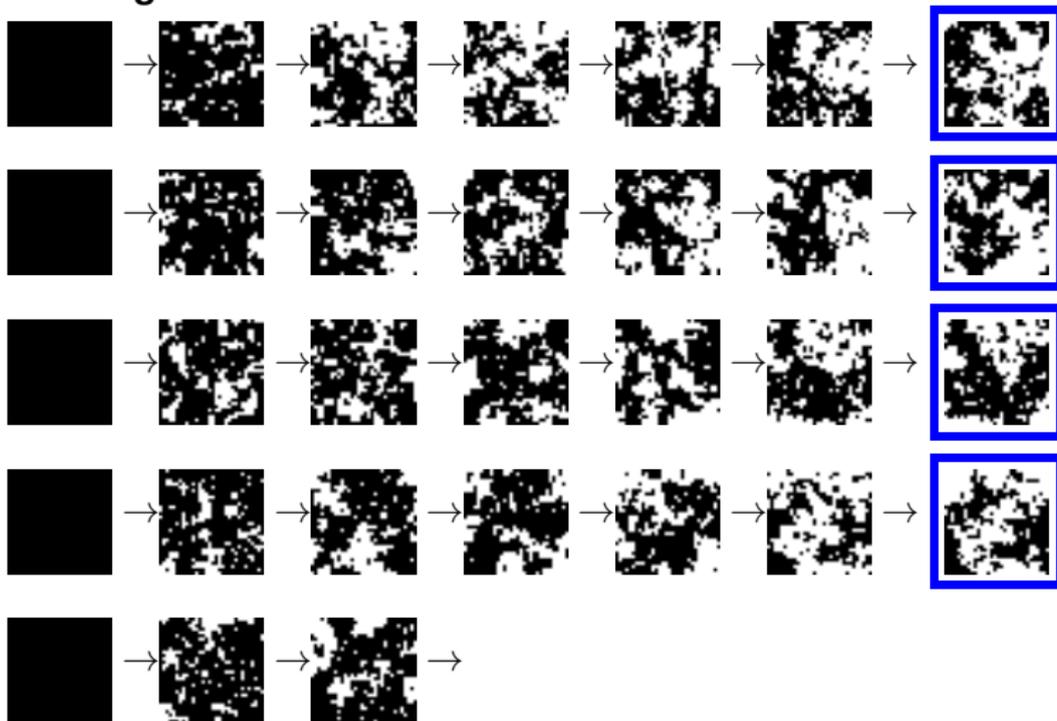
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



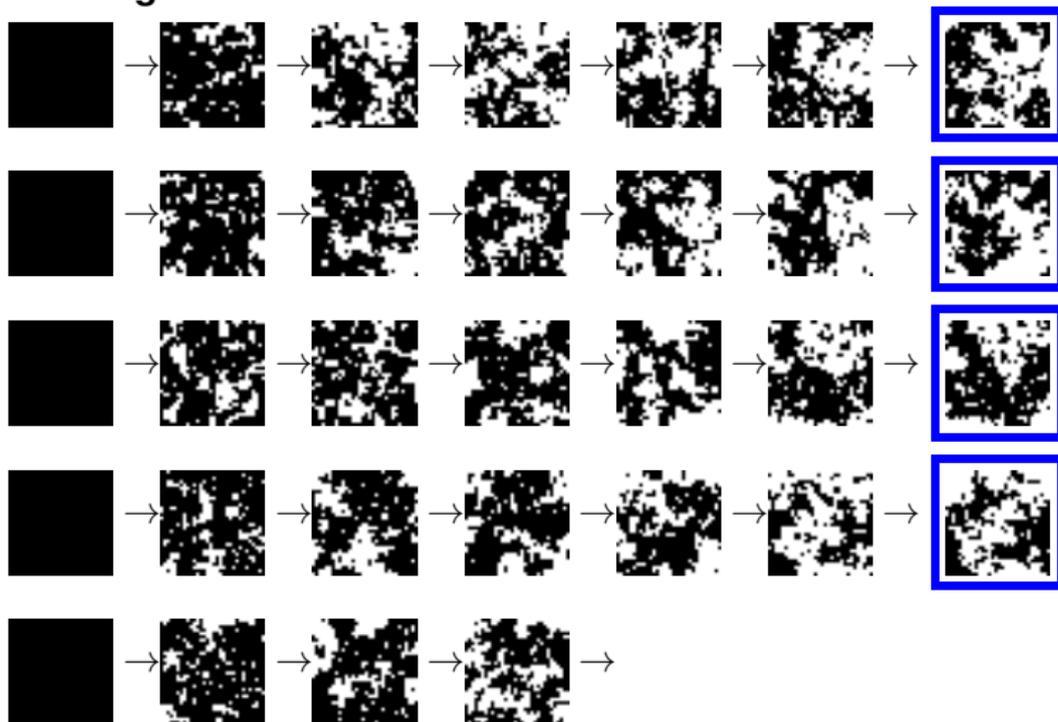
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



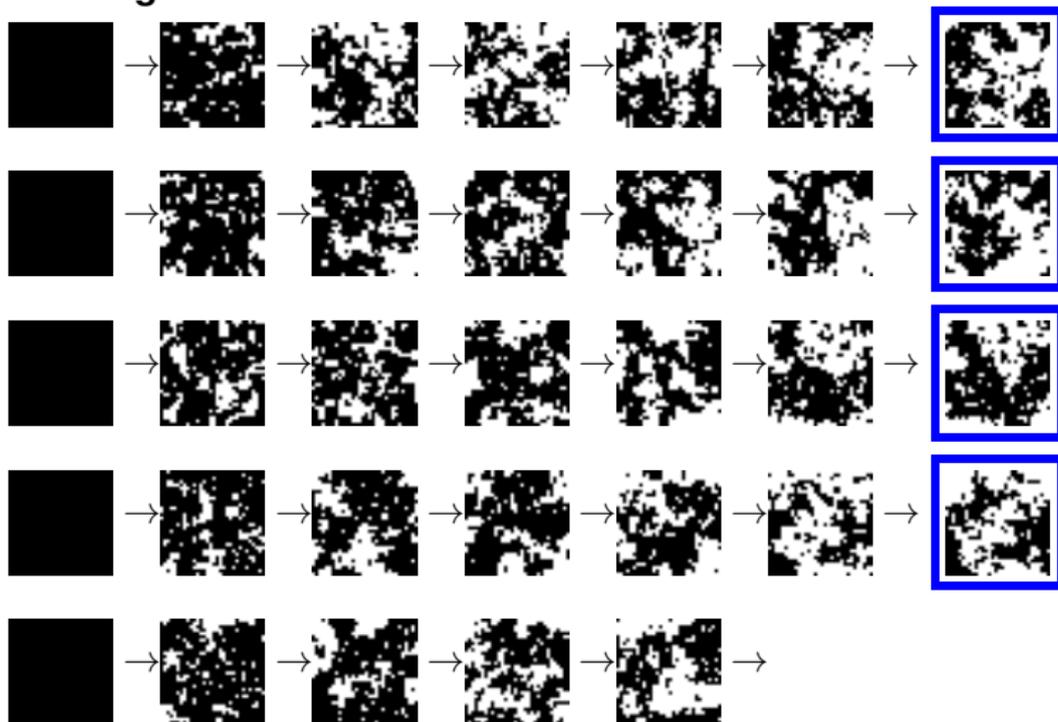
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



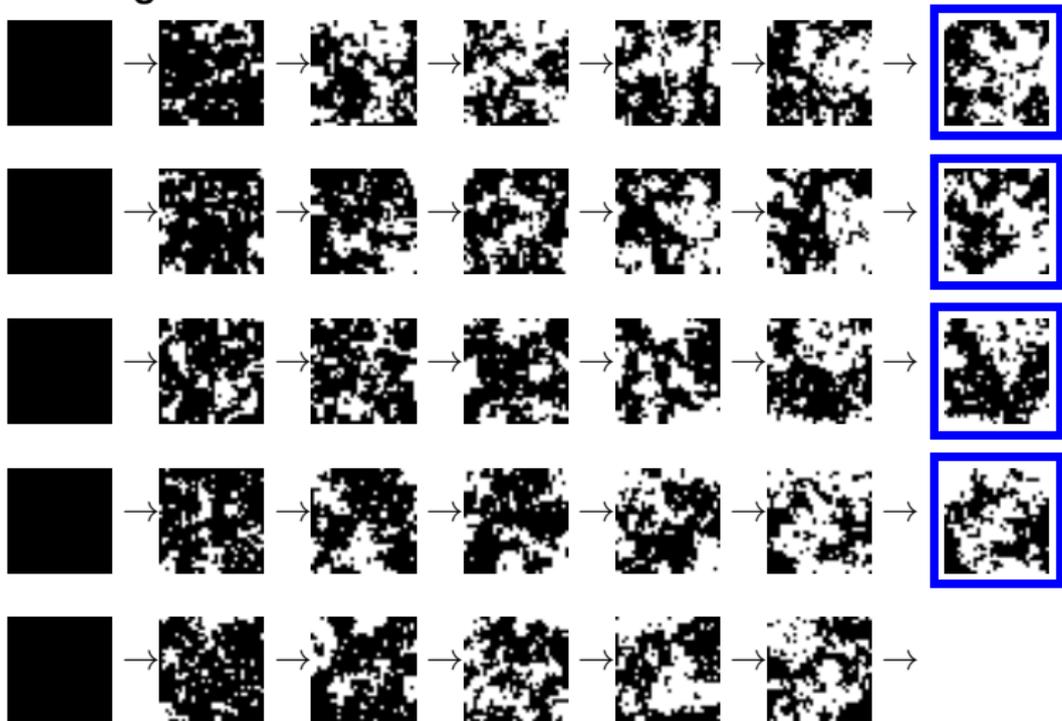
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



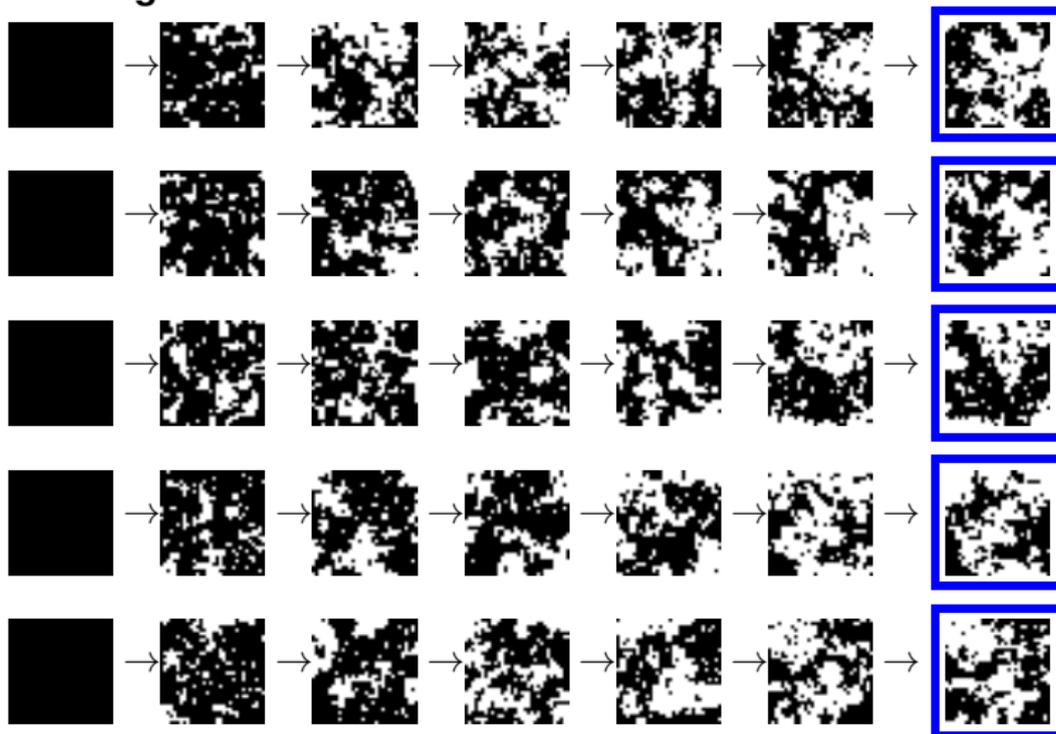
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



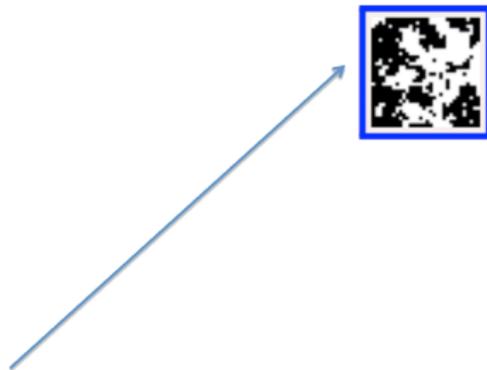
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



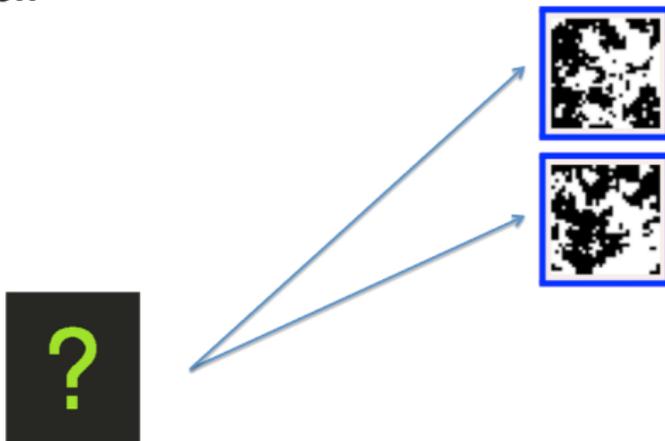
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



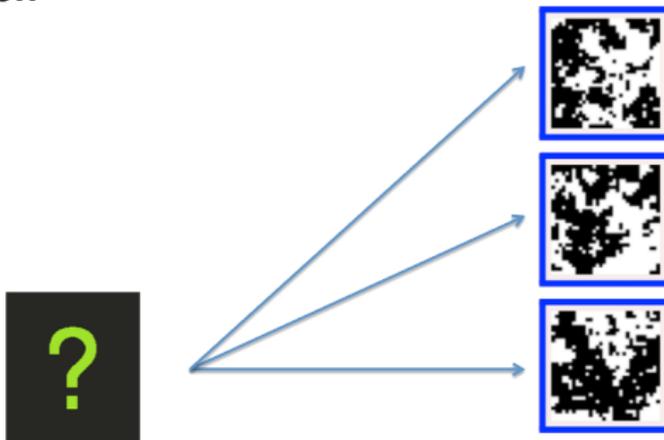
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



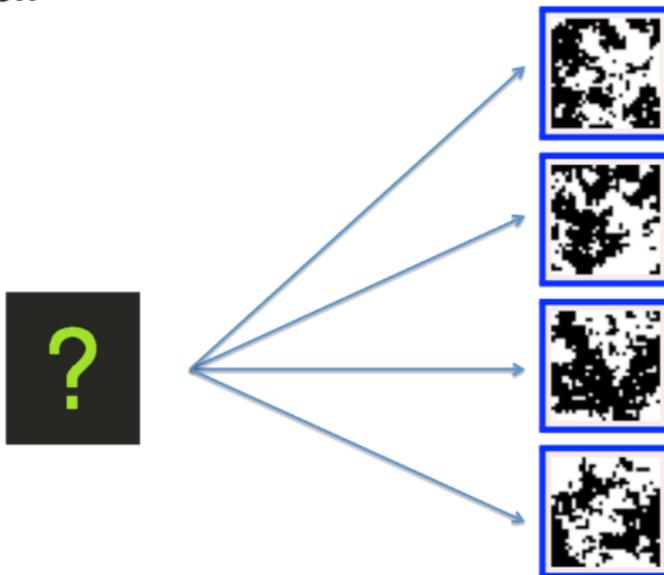
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



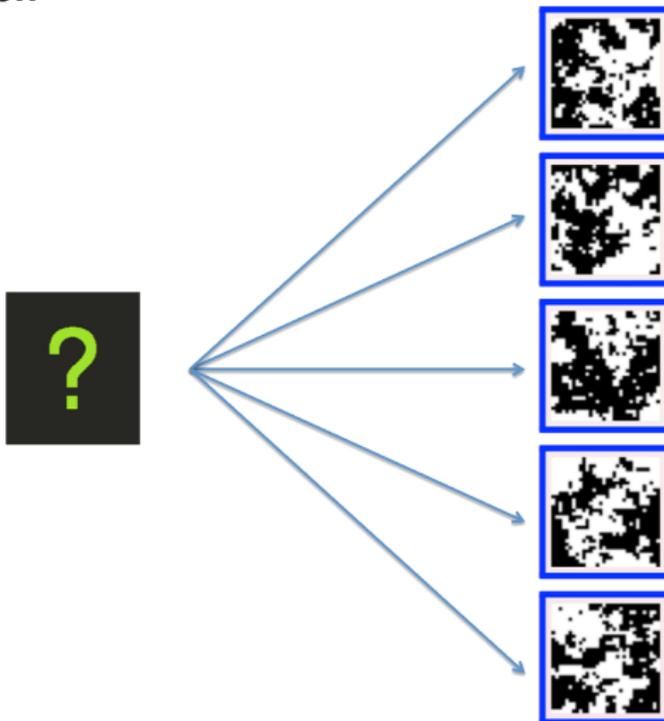
Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



Méthodes markoviennes en segmentation

Échantillonnage : Introduction



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Principe

- On veut échantillonner la loi

$$\pi(x) = \frac{1}{Z} \exp(-H(x)) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_C V_C(x_C)\right)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Principe

- On veut échantillonner la loi

$$\pi(x) = \frac{1}{Z} \exp(-H(x)) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_C V_C(x_C)\right)$$

- Principe : Transition pour un site courant s

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Principe

- On veut échantillonner la loi

$$\pi(x) = \frac{1}{Z} \exp(-H(x)) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_C V_C(x_C)\right)$$

- Principe : Transition pour un site courant s
 - Tirer une valeur λ uniformément dans Λ (ens. des valeurs possibles)

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Principe

- On veut échantillonner la loi

$$\pi(x) = \frac{1}{Z} \exp(-H(x)) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_C V_C(x_C)\right)$$

- Principe : Transition pour un site courant s
 - Tirer une valeur λ uniformément dans Λ (ens. des valeurs possibles)
 - **Proposer** λ comme nouvelle valeur pour le site s (définissant une nouvelle image y)

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Principe

- On veut échantillonner la loi

$$\pi(x) = \frac{1}{Z} \exp(-H(x)) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_C V_C(x_C)\right)$$

- Principe : Transition pour un site courant s
 - Tirer une valeur λ uniformément dans Λ (ens. des valeurs possibles)
 - **Proposer** λ comme nouvelle valeur pour le site s (définissant une nouvelle image y)
 - **L'accepter** si elle fait diminuer H

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Principe

- On veut échantillonner la loi

$$\pi(x) = \frac{1}{Z} \exp(-H(x)) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_C V_C(x_C)\right)$$

- Principe : Transition pour un site courant s
 - Tirer une valeur λ uniformément dans Λ (ens. des valeurs possibles)
 - **Proposer** λ comme nouvelle valeur pour le site s (définissant une nouvelle image y)
 - **L'accepter** si elle fait diminuer H
 - **L'accepter** avec probabilité $\exp(H(x) - H(y))$ si elle fait augmenter H

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Principe

- On veut échantillonner la loi

$$\pi(x) = \frac{1}{Z} \exp(-H(x)) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_C V_C(x_C)\right)$$

- Principe : Transition pour un site courant s
 - Tirer une valeur λ uniformément dans Λ (ens. des valeurs possibles)
 - Proposer** λ comme nouvelle valeur pour le site s (définissant une nouvelle image y)
 - L'accepter** si elle fait diminuer H
 - L'accepter** avec probabilité $\exp(H(x) - H(y))$ si elle fait augmenter H
 - Si λ est rejetée alors x_s ne change pas

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

$$\text{Probabilité d'acceptation de } y : \min\left(1, \exp\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)\right)$$

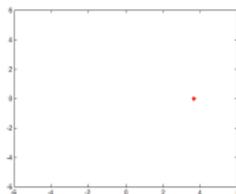
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

Probabilité d'acceptation de y : $\min\left(1, \exp\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)\right)$



Itération : 0

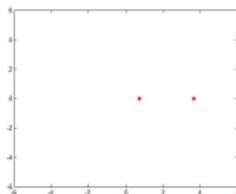
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

$$\text{Probabilité d'acceptation de } y : \min\left(1, \exp\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)\right)$$



Itération : 1

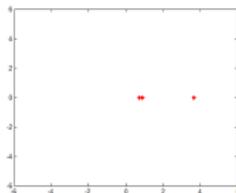
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

Probabilité d'acceptation de y : $\min\left(1, \exp\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)\right)$



Itération : 2

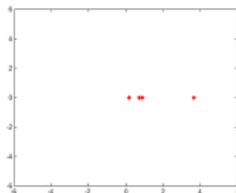
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

$$\text{Probabilité d'acceptation de } y : \min\left(1, \exp\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)\right)$$



Itération : 3

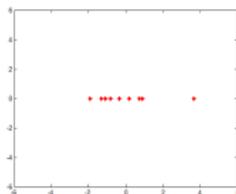
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

Probabilité d'acceptation de y : $\min\left(1, \exp\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)\right)$



Itération : 10

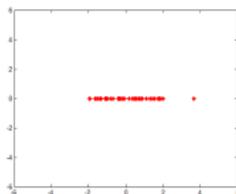
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

Probabilité d'acceptation de y : $\min\left(1, \exp\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)\right)$



Itération : 100

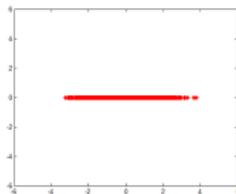
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

Probabilité d'acceptation de y : $\min\left(1, \exp\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)\right)$



Itération : 1000

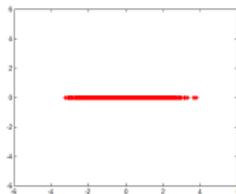
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

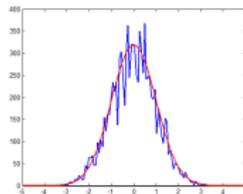
Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

Probabilité d'acceptation de y : $\min\left(1, \exp\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)\right)$



Itération : 1000



Répartition (10 000 tirages)

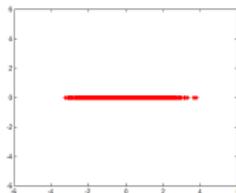
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

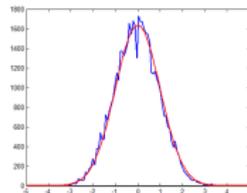
Exemple 1 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$ 1D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 : $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- On choisit un intervalle d'étude : $[-6, 6]$
- On tire aléatoirement une valeur initiale dans cet intervalle : x
- on tire une nouvelle valeur y qui sera acceptée avec une probabilité :

Probabilité d'acceptation de y : $\min\left(1, \exp\left(\frac{x^2 - y^2}{2}\right)\right)$



Itération : 1000



Répartition (50 000 tirages)

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 2 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, \sigma)$ 2D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type σ : $f_X(x, y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$

DEMO MATLAB

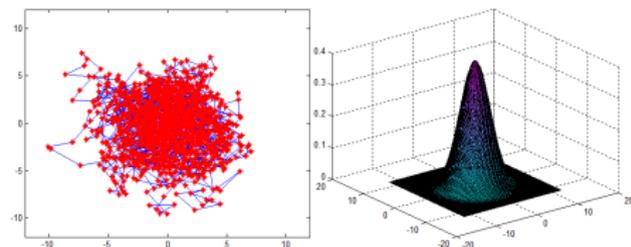
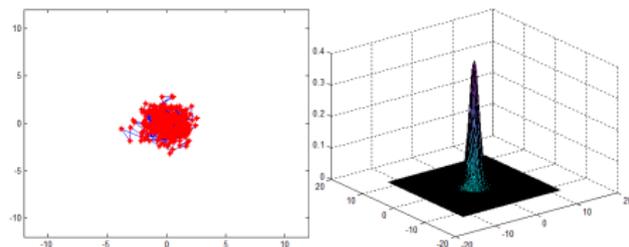
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Exemple 2 : simulation de la loi normale $\mathcal{N}(0, \sigma)$ 2D

- Loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type σ : $f_X(x, y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$

DEMO MATLAB



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Algorithme final

- choisir une image initiale x^0 aléatoirement

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Algorithme final

- choisir une image initiale x^0 aléatoirement
- à l'étape m , remettre à jour le site $s_m[n]$ selon la procédure précédente

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Algorithme final

- choisir une image initiale x^0 aléatoirement
- à l'étape m , remettre à jour le site $s_m[n]$ selon la procédure précédente
- au bout d'un certain temps les images x^{r^n} obtenues suivent la loi $\pi(x)$

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme de Metropolis

Algorithme final

- choisir une image initiale x^0 aléatoirement
- à l'étape m , remettre à jour le site $s_m[n]$ selon la procédure précédente
- au bout d'un certain temps les images x^{r^n} obtenues suivent la loi $\pi(x)$

Application aux modèles d'Ising et Potts ($B = 0$)

DEMO MATLAB



$\beta = 0$



$\beta = 0.5$



$\beta = 1$



$\beta = 10$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ?

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} < \mathbf{P("que des piles")} < \mathbf{P("proportion } p \text{ de piles")}$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?
 $\mathbf{P}(\text{"600 piles puis 400 faces"}) < \mathbf{P}(\text{"que des piles"}) < \mathbf{P}(\text{"proportion } p \text{ de piles"})$
 - Exemple : deux lancers et $p = 0.6$
 $\mathbf{P}(PP) =$ $\mathbf{P}(PF) =$ $\mathbf{P}(FP) =$ $\mathbf{P}(FF) =$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} < \mathbf{P("que des piles")} < \mathbf{P("proportion } p \text{ de piles")}$
 - Exemple : deux lancers et $p = 0.6$
 $\mathbf{P(PP)} = 0.6 * 0.6$ $\mathbf{P(PF)} = 0.6 * 0.4$ $\mathbf{P(FP)} = 0.4 * 0.6$ $\mathbf{P(FF)} = 0.4 * 0.4$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?
 $\mathbf{P}(\text{"600 piles puis 400 faces"}) < \mathbf{P}(\text{"que des piles"}) < \mathbf{P}(\text{"proportion } p \text{ de piles"})$
 - Exemple : deux lancers et $p = 0.6$
 $\mathbf{P}(PP) = 0.6 * 0.6$ $\mathbf{P}(PF) = 0.6 * 0.4$ $\mathbf{P}(FP) = 0.4 * 0.6$ $\mathbf{P}(FF) = 0.4 * 0.4$
 $\mathbf{P}(PP) = 0.36$ $\mathbf{P}(PF) = 0.24$ $\mathbf{P}(FP) = 0.24$ $\mathbf{P}(FF) = 0.16$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} < \mathbf{P("que des piles")} < \mathbf{P("proportion } p \text{ de piles")}$
 - Exemple : deux lancers et $p = 0.6$
 $\mathbf{P(PP)} = 0.6 * 0.6$ $\mathbf{P(PF)} = 0.6 * 0.4$ $\mathbf{P(FP)} = 0.4 * 0.6$ $\mathbf{P(FF)} = 0.4 * 0.4$

 $\mathbf{P(PP)} = 0.36$ $\mathbf{P(PF)} = 0.24$ $\mathbf{P(FP)} = 0.24$ $\mathbf{P(FF)} = 0.16$

 $\mathbf{P(PP)} = 0.36$ $\mathbf{P("un pile et un face")} = \mathbf{P(PF)} + \mathbf{P(FP)} = 0.48$
 - 1000 lancers et $p = 0.6$: $\mathbf{P("que des piles")} =$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?
 $\mathbf{P}(\text{"600 piles puis 400 faces"}) < \mathbf{P}(\text{"que des piles"}) < \mathbf{P}(\text{"proportion } p \text{ de piles"})$
 - Exemple : deux lancers et $p = 0.6$
 $\mathbf{P}(PP) = 0.6 * 0.6$ $\mathbf{P}(PF) = 0.6 * 0.4$ $\mathbf{P}(FP) = 0.4 * 0.6$ $\mathbf{P}(FF) = 0.4 * 0.4$

 $\mathbf{P}(PP) = 0.36$ $\mathbf{P}(PF) = 0.24$ $\mathbf{P}(FP) = 0.24$ $\mathbf{P}(FF) = 0.16$

 $\mathbf{P}(PP) = 0.36$ $\mathbf{P}(\text{"un pile et un face"}) = \mathbf{P}(PF) + \mathbf{P}(FP) = 0.48$
 - 1000 lancers et $p = 0.6$: $\mathbf{P}(\text{"que des piles"}) = p^{1000} \approx 1.4 * 10^{-222}$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} < \mathbf{P("que des piles")} < \mathbf{P("proportion } p \text{ de piles")}$
 - Exemple : deux lancers et $p = 0.6$
 $\mathbf{P(PP)} = 0.6 * 0.6$ $\mathbf{P(PF)} = 0.6 * 0.4$ $\mathbf{P(FP)} = 0.4 * 0.6$ $\mathbf{P(FF)} = 0.4 * 0.4$

 $\mathbf{P(PP)} = 0.36$ $\mathbf{P(PF)} = 0.24$ $\mathbf{P(FP)} = 0.24$ $\mathbf{P(FF)} = 0.16$

 $\mathbf{P(PP)} = 0.36$ $\mathbf{P("un pile et un face")} = \mathbf{P(PF)} + \mathbf{P(FP)} = 0.48$
 - 1000 lancers et $p = 0.6$: $\mathbf{P("que des piles")} = p^{1000} \approx 1.4 * 10^{-222}$
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} =$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations **"typiques"**. Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} < \mathbf{P("que des piles")} < \mathbf{P("proportion } p \text{ de piles")}$
 - Exemple : deux lancers et $p = 0.6$
 $\mathbf{P(PP)} = 0.6 * 0.6$ $\mathbf{P(PF)} = 0.6 * 0.4$ $\mathbf{P(FP)} = 0.4 * 0.6$ $\mathbf{P(FF)} = 0.4 * 0.4$

 $\mathbf{P(PP)} = 0.36$ $\mathbf{P(PF)} = 0.24$ $\mathbf{P(FP)} = 0.24$ $\mathbf{P(FF)} = 0.16$

 $\mathbf{P(PP)} = 0.36$ $\mathbf{P("un pile et un face")} = \mathbf{P(PF)} + \mathbf{P(FP)} = 0.48$
 - 1000 lancers et $p = 0.6$: $\mathbf{P("que des piles")} = p^{1000} \approx 1.4 * 10^{-222}$
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} = p^{600} (1 - p)^{400} \approx 5.1 * 10^{-293}$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} < \mathbf{P("que des piles")} < \mathbf{P("proportion } p \text{ de piles")}$
 - Exemple : deux lancers et $p = 0.6$
 $\mathbf{P(PP)} = 0.6 * 0.6$ $\mathbf{P(PF)} = 0.6 * 0.4$ $\mathbf{P(FP)} = 0.4 * 0.6$ $\mathbf{P(FF)} = 0.4 * 0.4$

 $\mathbf{P(PP)} = 0.36$ $\mathbf{P(PF)} = 0.24$ $\mathbf{P(FP)} = 0.24$ $\mathbf{P(FF)} = 0.16$

 $\mathbf{P(PP)} = 0.36$ $\mathbf{P("un pile et un face")} = \mathbf{P(PF)} + \mathbf{P(FP)} = 0.48$
 - 1000 lancers et $p = 0.6$: $\mathbf{P("que des piles")} = p^{1000} \approx 1.4 * 10^{-222}$
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} = p^{600} (1 - p)^{400} \approx 5.1 * 10^{-293}$
 $\mathbf{P("600 piles et 400 faces (ordre indifférent))} =$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations **"typiques"**. Exemples :
 - Pièce truquée : proba $p > 0.5$ de faire pile. On effectue 1000 lancers, les échantillons (construits par Metropolis par exple) ont environ une proportion p de piles.
 - quel est le x tel que $\pi(x)$ soit maximal ? → "que des piles"
 - Pourquoi n'observera-t-on "jamais" cette configuration en échantillonnant ?
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} < \mathbf{P("que des piles")} < \mathbf{P("proportion } p \text{ de piles")}$
 - Exemple : deux lancers et $p = 0.6$
 $\mathbf{P(PP)} = 0.6 * 0.6$ $\mathbf{P(PF)} = 0.6 * 0.4$ $\mathbf{P(FP)} = 0.4 * 0.6$ $\mathbf{P(FF)} = 0.4 * 0.4$

 $\mathbf{P(PP)} = 0.36$ $\mathbf{P(PF)} = 0.24$ $\mathbf{P(FP)} = 0.24$ $\mathbf{P(FF)} = 0.16$

 $\mathbf{P(PP)} = 0.36$ $\mathbf{P("un pile et un face")} = \mathbf{P(PF)} + \mathbf{P(FP)} = 0.48$
 - 1000 lancers et $p = 0.6$: $\mathbf{P("que des piles")} = p^{1000} \approx 1.4 * 10^{-222}$
 $\mathbf{P("600 piles puis 400 faces")} = p^{600} (1 - p)^{400} \approx 5.1 * 10^{-293}$
 $\mathbf{P("600 piles et 400 faces (ordre indifférent)")} = \binom{1000}{600} p^{600} (1 - p)^{400} \approx 0.025$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :
 - π , Ising/Potts (Metropolis)



$\beta = 0$



$\beta = 0.4$



$\beta = 3$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :

- π , Ising/Potts (Metropolis)



$\beta = 0$



$\beta = 0.4$



$\beta = 3$

- x les plus probables ?

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :

- π , Ising/Potts (Metropolis)



$\beta = 0$



$\beta = 0.4$



$\beta = 3$

- x les plus probables ? **images constantes**

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :

- π , Ising/Potts (Metropolis)



$\beta = 0$



$\beta = 0.4$



$\beta = 3$

- les plus probables ? **images constantes**

- $\pi(\text{image noire}) = \pi(\text{image blanche}) > \pi(\text{image typique}) \quad \forall \beta$

Méthodes markoviennes en segmentation

- Les méthodes d'échantillonnage vu précédemment produisent des configurations "**typiques**". Exemples :

- π , Ising/Potts (Metropolis)



$\beta = 0$



$\beta = 0.4$



$\beta = 3$

- x les plus probables ? **images constantes**

$$\pi(\text{image noire}) = \pi(\text{image blanche}) > \pi(\text{image typique}) \quad \forall \beta$$

- Même "phénomène" que précédemment

$$\pi(\text{image blanche}) < \pi(\text{"une image qui ressemble à [image typique]"})$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Le recuit simulé est une méthode inspirée d'un processus utilisé en métallurgie (et datant de la préhistoire !). Ce processus alterne des cycles de refroidissement lent et de réchauffage (recuit) qui tendent à minimiser l'énergie du matériau.

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Le recuit simulé est une méthode inspirée d'un processus utilisé en métallurgie (et datant de la préhistoire !). Ce processus alterne des cycles de refroidissement lent et de réchauffage (recuit) qui tendent à minimiser l'énergie du matériau.
- Le recuit simulé s'appuie sur l'algorithme de Metropolis-Hastings (dans notre cas, l'algorithme de Metropolis ou l'échantillonneur de Gibbs) → **BUT : trouver le Maximum A Posteriori, la configuration la plus probable.**

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Le recuit simulé est une méthode inspirée d'un processus utilisé en métallurgie (et datant de la préhistoire !). Ce processus alterne des cycles de refroidissement lent et de réchauffage (recuit) qui tendent à minimiser l'énergie du matériau.
- Le recuit simulé s'appuie sur l'algorithme de Metropolis-Hastings (dans notre cas, l'algorithme de Metropolis ou l'échantillonneur de Gibbs) → **BUT : trouver le Maximum A Posteriori, la configuration la plus probable.**
- Étant donné une distribution de Gibbs $\pi(x) = \frac{1}{Z} \exp(-H(x))$, on cherche le x tel que $H(x)$ soit minimal

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Le recuit simulé est une méthode inspirée d'un processus utilisé en métallurgie (et datant de la préhistoire !). Ce processus alterne des cycles de refroidissement lent et de réchauffage (recuit) qui tendent à minimiser l'énergie du matériau.
- Le recuit simulé s'appuie sur l'algorithme de Metropolis-Hastings (dans notre cas, l'algorithme de Metropolis ou l'échantillonneur de Gibbs) → **BUT : trouver le Maximum A Posteriori, la configuration la plus probable.**
- Étant donné une distribution de Gibbs $\pi(x) = \frac{1}{Z} \exp(-H(x))$, on cherche le x tel que $H(x)$ soit minimal
- Considérons la distribution de Gibbs **avec température** associée :

$$\pi_T(x) = \frac{1}{Z_T} \exp\left(-\frac{H(x)}{T}\right)$$

$$\text{avec } H(x) = \sum_{c \in \mathcal{C}} V_C(x_C) \quad \text{et} \quad Z_T = \sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y)}{T}\right)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Comportement aux températures limites

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Comportement aux températures limites

- Comment se comporte $\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)}$ lorsque $T \rightarrow 0$ et $T \rightarrow \infty$?

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Comportement aux températures limites

- Comment se comporte $\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)}$ lorsque $T \rightarrow 0$ et $T \rightarrow \infty$?

- $$\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} = \exp\left(-\frac{H(y) - H(x)}{T}\right)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Comportement aux températures limites

- Comment se comporte $\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)}$ lorsque $T \rightarrow 0$ et $T \rightarrow \infty$?

- $$\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} = \exp\left(-\frac{H(y) - H(x)}{T}\right)$$

- $T \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} \rightarrow$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Comportement aux températures limites

- Comment se comporte $\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)}$ lorsque $T \rightarrow 0$ et $T \rightarrow \infty$?

- $$\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} = \exp\left(-\frac{H(y) - H(x)}{T}\right)$$

- $$T \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} \rightarrow 1$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Comportement aux températures limites

- Comment se comporte $\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)}$ lorsque $T \rightarrow 0$ et $T \rightarrow \infty$?

- $$\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} = \exp\left(-\frac{H(y) - H(x)}{T}\right)$$

- $$T \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} \rightarrow 1$$

- $$T \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} \rightarrow$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Comportement aux températures limites

- Comment se comporte $\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)}$ lorsque $T \rightarrow 0$ et $T \rightarrow \infty$?

- $$\frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} = \exp\left(-\frac{H(y) - H(x)}{T}\right)$$

- $$T \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} \rightarrow 1$$

- $$T \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{\pi_T(y)}{\pi_T(x)} \rightarrow 0, \text{ si } H(y) > H(x)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow +\infty$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x)}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y)}{T}\right)}$$

$$\pi_T(x) =$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow +\infty$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x)}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y)}{T}\right)}$$

$$\pi_T(x) = \frac{1}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y) - H(x)}{T}\right)}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow +\infty$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x)}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y)}{T}\right)}$$

$$\pi_T(x) = \frac{1}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y) - H(x)}{T}\right)}$$

$$\pi_T(x) \xrightarrow{T \rightarrow +\infty} \delta_x$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow +\infty$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x)}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y)}{T}\right)}$$

$$\pi_T(x) = \frac{1}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y) - H(x)}{T}\right)}$$

$$\pi_T(x) \xrightarrow{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{\text{card } \Omega}, \quad \forall x \in \Omega$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow +\infty$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x)}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y)}{T}\right)}$$

$$\pi_T(x) = \frac{1}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y) - H(x)}{T}\right)}$$

$$\pi_T(x) \xrightarrow{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{\text{card } \Omega}, \quad \forall x \in \Omega$$

Plus la température est élevée et plus la distribution π_T se rapproche de la distribution uniforme sur Ω .

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow 0$

- On pose $H^* = \min_{x \in \Omega} H(x)$ et $\Omega^* = \arg \min_{x \in \Omega} H(x) = \underbrace{\{x \in \Omega \mid H(x) = H^*\}}_{\text{ce qu'on cherche, } x^{\text{map}}}$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow 0$

- On pose $H^* = \min_{x \in \Omega} H(x)$ et $\Omega^* = \arg \min_{x \in \Omega} H(x) = \underbrace{\{x \in \Omega \mid H(x) = H^*\}}_{\text{ce qu'on cherche, } x^{\text{map}}}$
- On multiplie, dans $\pi_T(x)$, le numérateur et le dénominateur par $\exp\left(\frac{H^*}{T}\right)$

$$\pi_T(x) =$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow 0$

- On pose $H^* = \min_{x \in \Omega} H(x)$ et $\Omega^* = \arg \min_{x \in \Omega} H(x) = \underbrace{\{x \in \Omega \mid H(x) = H^*\}}_{\text{ce qu'on cherche, } x^{\text{map}}}$
- On multiplie, dans $\pi_T(x)$, le numérateur et le dénominateur par $\exp\left(\frac{H^*}{T}\right)$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow 0$

- On pose $H^* = \min_{x \in \Omega} H(x)$ et $\Omega^* = \arg \min_{x \in \Omega} H(x) = \underbrace{\{x \in \Omega \mid H(x) = H^*\}}_{\text{ce qu'on cherche, } x^{\text{map}}}$

- On multiplie, dans $\pi_T(x)$, le numérateur et le dénominateur par $\exp\left(\frac{H^*}{T}\right)$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)} = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\text{card } \Omega^* + \sum_{y \in \Omega, y \notin \Omega^*} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow 0$

- On pose $H^* = \min_{x \in \Omega} H(x)$ et $\Omega^* = \arg \min_{x \in \Omega} H(x) = \underbrace{\{x \in \Omega \mid H(x) = H^*\}}_{\text{ce qu'on cherche, } x^{\text{map}}}$

- On multiplie, dans $\pi_T(x)$, le numérateur et le dénominateur par $\exp\left(\frac{H^*}{T}\right)$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)} = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\text{card } \Omega^* + \sum_{y \in \Omega, y \notin \Omega^*} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)}$$

- et donc finalement : $\pi_T(x) \xrightarrow{T \rightarrow 0} \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin \Omega^* \\ 1 & \text{si } x \in \Omega^* \end{cases}$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow 0$

- On pose $H^* = \min_{x \in \Omega} H(x)$ et $\Omega^* = \arg \min_{x \in \Omega} H(x) = \underbrace{\{x \in \Omega \mid H(x) = H^*\}}_{\text{ce qu'on cherche, } x^{\text{map}}}$

- On multiplie, dans $\pi_T(x)$, le numérateur et le dénominateur par $\exp\left(\frac{H^*}{T}\right)$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)} = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\text{card } \Omega^* + \sum_{y \in \Omega, y \notin \Omega^*} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)}$$

- et donc finalement : $\pi_T(x) \xrightarrow{T \rightarrow 0} \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin \Omega^* \\ 1 & \text{si } x \in \Omega^* \end{cases}$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow 0$

- On pose $H^* = \min_{x \in \Omega} H(x)$ et $\Omega^* = \arg \min_{x \in \Omega} H(x) = \underbrace{\{x \in \Omega \mid H(x) = H^*\}}_{\text{ce qu'on cherche, } x^{\text{map}}}$

- On multiplie, dans $\pi_T(x)$, le numérateur et le dénominateur par $\exp\left(\frac{H^*}{T}\right)$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)} = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\text{card } \Omega^* + \sum_{y \in \Omega, y \notin \Omega^*} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)}$$

- et donc finalement : $\pi_T(x) \xrightarrow{T \rightarrow 0} \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin \Omega^* \\ \frac{1}{\text{card } \Omega^*} & \text{si } x \in \Omega^* \end{cases}$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Démonstration pour $T \rightarrow 0$

- On pose $H^* = \min_{x \in \Omega} H(x)$ et $\Omega^* = \arg \min_{x \in \Omega} H(x) = \underbrace{\{x \in \Omega \mid H(x) = H^*\}}_{\text{ce qu'on cherche, } x^{\text{map}}}$

- On multiplie, dans $\pi_T(x)$, le numérateur et le dénominateur par $\exp\left(\frac{H^*}{T}\right)$

$$\pi_T(x) = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\sum_{y \in \Omega} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)} = \frac{\exp\left(-\frac{H(x) - H^*}{T}\right)}{\text{card } \Omega^* + \sum_{y \in \Omega, y \notin \Omega^*} \exp\left(-\frac{H(y) - H^*}{T}\right)}$$

- et donc finalement : $\pi_T(x) \xrightarrow{T \rightarrow 0} \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin \Omega^* \\ \frac{1}{\text{card } \Omega^*} & \text{si } x \in \Omega^* \end{cases}$

Plus la température est faible et plus la distribution π_T se rapproche de la distribution uniforme sur Ω^* et est nulle ailleurs.

Méthodes markoviennes en segmentation

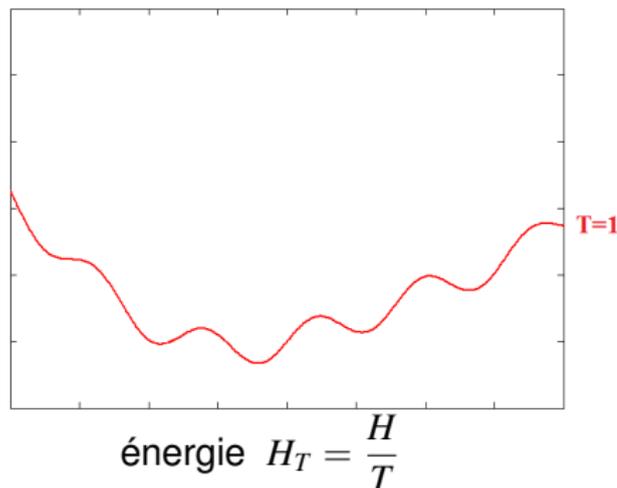
Recuit simulé : Effet de la température

Quand $T \rightarrow 0$, si on échantillonne π_T on a de plus en plus de chances de "tomber" sur x^{map}

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Effet de la température

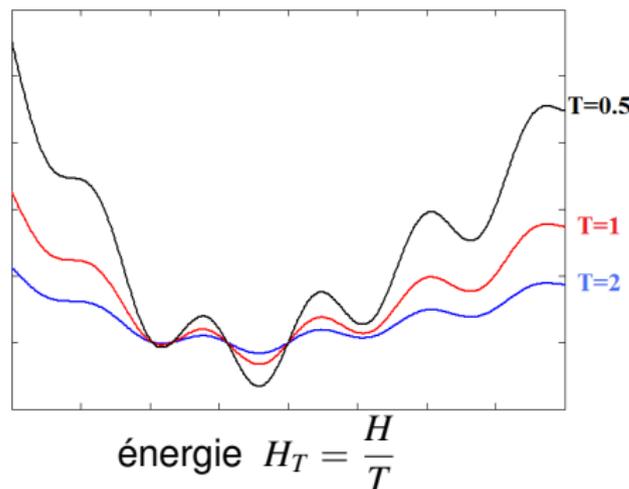
Quand $T \rightarrow 0$, si on échantillonne π_T on a de plus en plus de chances de "tomber" sur x^{map}



Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Effet de la température

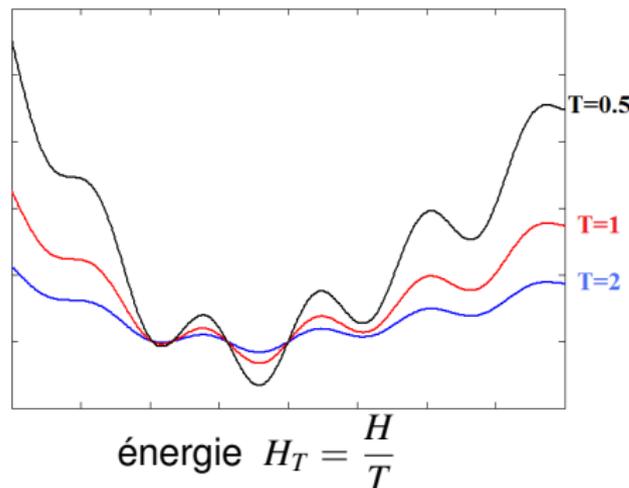
Quand $T \rightarrow 0$, si on échantillonne π_T on a de plus en plus de chances de "tomber" sur x^{map}



Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Effet de la température

Quand $T \rightarrow 0$, si on échantillonne π_T on a de plus en plus de chances de "tomber" sur x^{map}

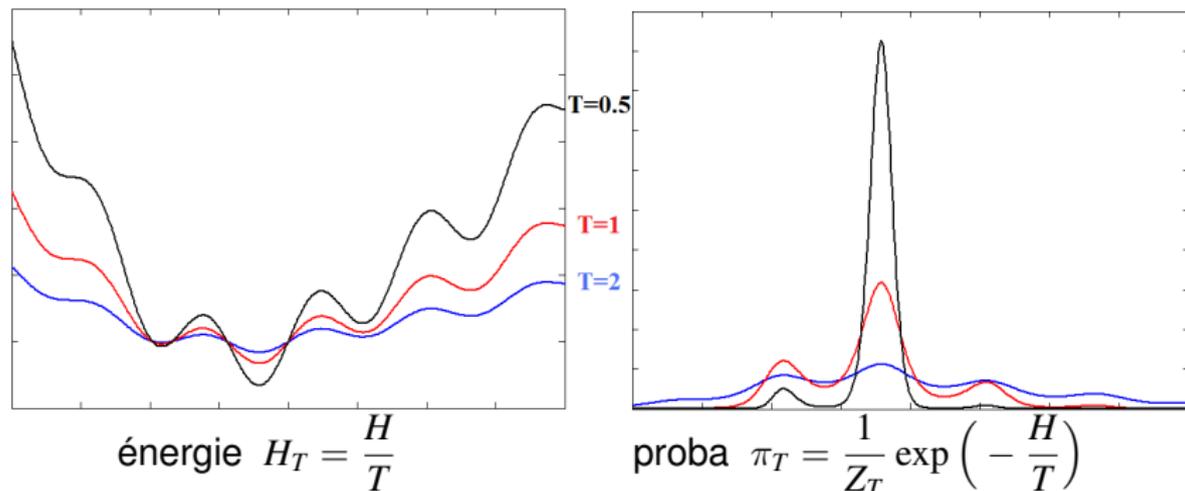


$$\text{proba } \pi_T = \frac{1}{Z_T} \exp\left(-\frac{H}{T}\right)$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé : Effet de la température

Quand $T \rightarrow 0$, si on échantillonne π_T on a de plus en plus de chances de "tomber" sur x^{map}



DEMO MATLAB

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Si on échantillonne le champs de Gibbs avec température (par Metropolis-Hastings) et que l'on fait diminuer la température à chaque itération, va-t-on minimiser H ?

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Si on échantillonne le champs de Gibbs avec température (par Metropolis-Hastings) et que l'on fait diminuer la température à chaque itération, va-t-on minimiser H ?

Théorème (Geman and Geman 1984)

Il existe une température initiale T_0 telle que

$$\text{si } T_n \geq \frac{T_0}{\ln(1+n)} \text{ (pour tout } n) \text{ alors } \lim_{n \rightarrow +\infty} \mathbf{P}(X^n \in \Omega^*) = 1, \forall X^0.$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Si on échantillonne le champs de Gibbs avec température (par Metropolis-Hastings) et que l'on fait diminuer la température à chaque itération, va-t-on minimiser H ?

Théorème (Geman and Geman 1984)

Il existe une température initiale T_0 telle que

$$\text{si } T_n \geq \frac{T_0}{\ln(1+n)} \text{ (pour tout } n) \text{ alors } \lim_{n \rightarrow +\infty} \mathbf{P}(X^n \in \Omega^*) = 1, \forall X^0.$$

- \rightarrow Si T_n diminue très lentement (logarithmiquement), alors l'algorithme de Metropolis ou l'échantillonneur de Gibbs (en prenant T_n à l'itération n) converge vers un **minimum global** de l'énergie.

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Si on échantillonne le champs de Gibbs avec température (par Metropolis-Hastings) et que l'on fait diminuer la température à chaque itération, va-t-on minimiser H ?

Théorème (Geman and Geman 1984)

Il existe une température initiale T_0 telle que

$$\text{si } T_n \geq \frac{T_0}{\ln(1+n)} \text{ (pour tout } n) \text{ alors } \lim_{n \rightarrow +\infty} \mathbf{P}(X^n \in \Omega^*) = 1, \forall X^0.$$

- \rightarrow Si T_n diminue très lentement (logarithmiquement), alors l'algorithme de Metropolis ou l'échantillonneur de Gibbs (en prenant T_n à l'itération n) converge vers un **minimum global** de l'énergie.
- Condition théorique : $T_0 = \max_{s, \lambda, \mu} |H(x^{s, \lambda}) - H(x^{s, \mu})|$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Lien avec physique statistique : silicate fondu refroidi trop rapidement → matériaux métastable (verre) au lieu de l'état fondamental d'énergie minimale (cristal)

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Lien avec physique statistique : silicate fondu refroidi trop rapidement → matériaux métastable (verre) au lieu de l'état fondamental d'énergie minimale (cristal)
- Théorème → résultat théorique très intéressant

le recuit simulé peut trouver le minimum global de toute énergie, si on le laisse chercher indéfiniment.

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Lien avec physique statistique : silicate fondu refroidi trop rapidement → matériaux métastable (verre) au lieu de l'état fondamental d'énergie minimale (cristal)
- Théorème → résultat théorique très intéressant

le recuit simulé peut trouver le minimum global de toute énergie, si on le laisse chercher indéfiniment.

- En pratique : "indéfiniment" = "trop long" !

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Lien avec physique statistique : silicate fondu refroidi trop rapidement → matériaux métastable (verre) au lieu de l'état fondamental d'énergie minimale (cristal)
- Théorème → résultat théorique très intéressant

le recuit simulé peut trouver le minimum global de toute énergie, si on le laisse chercher indéfiniment.

- En pratique : "indéfiniment" = "trop long" !
- On utilise donc des heuristiques de refroidissement inspirées de la méthode initiale mais qui vont converger plus rapidement ... mais pas forcément vers le minimum global

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

- Lien avec physique statistique : silicate fondu refroidi trop rapidement → matériaux métastable (verre) au lieu de l'état fondamental d'énergie minimale (cristal)
- Théorème → résultat théorique très intéressant

le recuit simulé peut trouver le minimum global de toute énergie, si on le laisse chercher indéfiniment.

- En pratique : "indéfiniment" = "trop long" !
- On utilise donc des heuristiques de refroidissement inspirées de la méthode initiale mais qui vont converger plus rapidement ... mais pas forcément vers le minimum global
- exemples :
 - $T_n = T_0 a^n$ avec $a \approx 0.98$ ou refroidissement par palier : $T_n = T_0 a^{\lfloor n/p \rfloor}$
 - critère d'arrêt (sur le nb de transitions "nulles")

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

Comparaison entre

- La décroissance **théorique** du théorème (qui assure la convergence)

$$T_n \geq \frac{T_0}{\ln(1+n)}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

Comparaison entre

- La décroissance **théorique** du théorème (qui assure la convergence)

$$T_n \geq \frac{T_0}{\ln(1+n)}$$

- Celle utilisée classiquement **en pratique** (qui assure un temps de calcul plus "raisonnable")

$$T_n = T_0 a^n \quad \text{avec} \quad a \approx 0.98 \text{ par exemple}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Recuit simulé

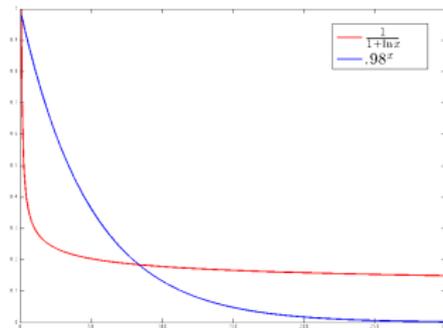
Comparaison entre

- La décroissance **théorique** du théorème (qui assure la convergence)

$$T_n \geq \frac{T_0}{\ln(1+n)}$$

- Celle utilisée classiquement **en pratique** (qui assure un temps de calcul plus "raisonnable")

$$T_n = T_0 a^n \quad \text{avec} \quad a \approx 0.98 \text{ par exemple}$$



Méthodes markoviennes en segmentation

méthode ICM (Iterated Conditional Modes)

- Sorte de recuit simulé à température nulle (proposé par Besag en 1983)

Méthodes markoviennes en segmentation

méthode ICM (Iterated Conditional Modes)

- Sorte de recuit simulé à température nulle (proposé par Besag en 1983)
- algorithme déterministe : au site courant **maximiser la descente d'énergie**

Méthodes markoviennes en segmentation

méthode ICM (Iterated Conditional Modes)

- Sorte de recuit simulé à température nulle (proposé par Besag en 1983)
- algorithme déterministe : au site courant **maximiser la descente d'énergie**
 - ▷ Initialisation x^0 proche de la solution

Méthodes markoviennes en segmentation

méthode ICM (Iterated Conditional Modes)

- Sorte de recuit simulé à température nulle (proposé par Besag en 1983)
- algorithme déterministe : au site courant **maximiser la descente d'énergie**
 - ▷ Initialisation x^0 proche de la solution
 - ▷ Suite d'images x^n

Méthodes markoviennes en segmentation

méthode ICM (Iterated Conditional Modes)

- Sorte de recuit simulé à température nulle (proposé par Besag en 1983)
- algorithme déterministe : au site courant **maximiser la descente d'énergie**

- ▷ Initialisation x^0 proche de la solution
- ▷ Suite d'images x^n
- ▷ à l'étape n , on balaye tous les sites s et

$$x_s^n \leftarrow \arg \max_{\lambda \in \Lambda} \mathbf{P}(X_s = \lambda | y, x_{\partial(s)}^{n-1})$$

Méthodes markoviennes en segmentation

méthode ICM (Iterated Conditional Modes)

- Sorte de recuit simulé à température nulle (proposé par Besag en 1983)
- algorithme déterministe : au site courant **maximiser la descente d'énergie**

- ▷ Initialisation x^0 proche de la solution
- ▷ Suite d'images x^n
- ▷ à l'étape n , on balaye tous les sites s et

$$x_s^n \leftarrow \arg \max_{\lambda \in \Lambda} \mathbf{P}(X_s = \lambda | y, x_{\partial(s)}^{n-1})$$

Propriétés

- Algorithme **déterministe**, résultat dépendant de l'initialisation

Méthodes markoviennes en segmentation

méthode ICM (Iterated Conditional Modes)

- Sorte de recuit simulé à température nulle (proposé par Besag en 1983)
- algorithme déterministe : au site courant **maximiser la descente d'énergie**

- ▷ Initialisation x^0 proche de la solution
- ▷ Suite d'images x^n
- ▷ à l'étape n , on balaye tous les sites s et

$$x_s^n \leftarrow \arg \max_{\lambda \in \Lambda} \mathbf{P}(X_s = \lambda | y, x_{\partial(s)}^{n-1})$$

Propriétés

- Algorithme **déterministe**, résultat dépendant de l'initialisation
- Convergence rapide (quelques balayages)

Méthodes markoviennes en segmentation

méthode ICM (Iterated Conditional Modes)

- Sorte de recuit simulé à température nulle (proposé par Besag en 1983)
- algorithme déterministe : au site courant **maximiser la descente d'énergie**

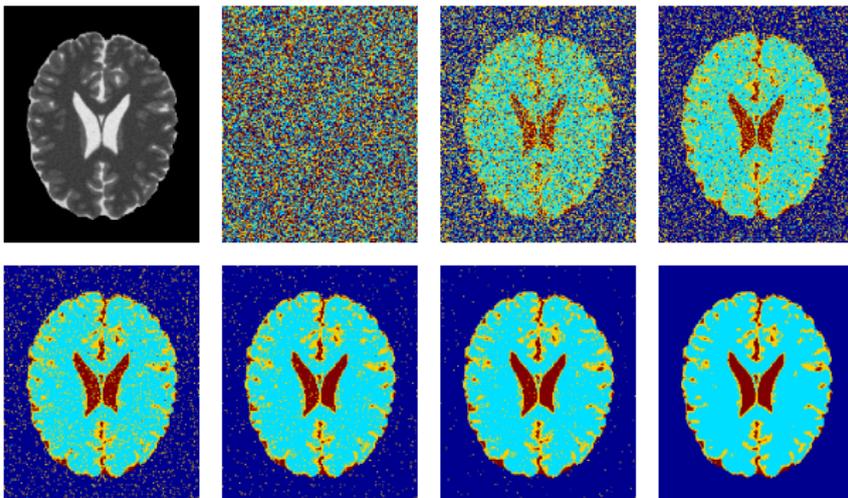
- ▷ Initialisation x^0 proche de la solution
- ▷ Suite d'images x^n
- ▷ à l'étape n , on balaye tous les sites s et

$$x_s^n \leftarrow \arg \max_{\lambda \in \Lambda} \mathbf{P}(X_s = \lambda | y, x_{\partial(s)}^{n-1})$$

Propriétés

- Algorithme **déterministe**, résultat dépendant de l'initialisation
- Convergence rapide (quelques balayages)
- Risque de converger vers un minimum local de H

Exemple : segmentation texturale (recuit simulé)



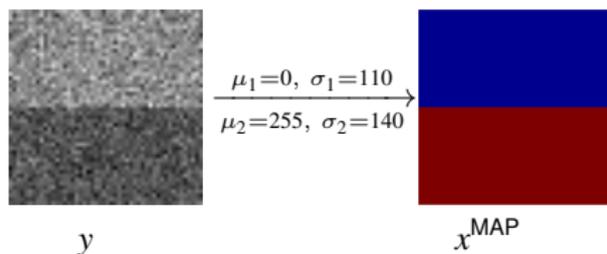
■ matière blanche ■ matière grise ■ liquide céphalo-rachidien

DEMO MATLAB

DEMO MATLAB

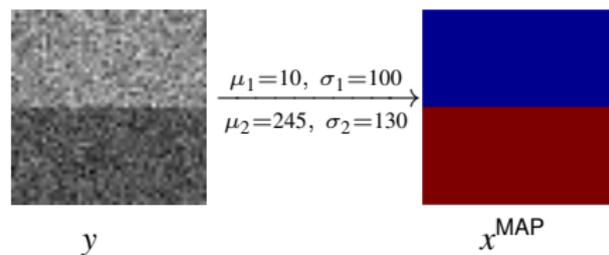
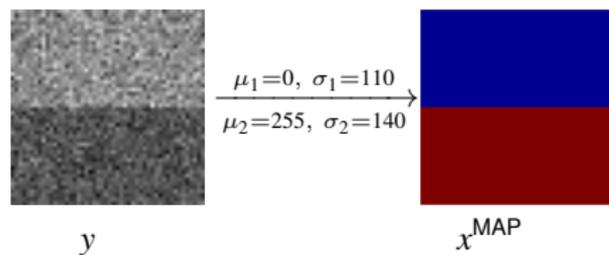
Méthodes markoviennes en segmentation

- Problème : dépend beaucoup des choix qu'on a fait pour μ_i et σ_i



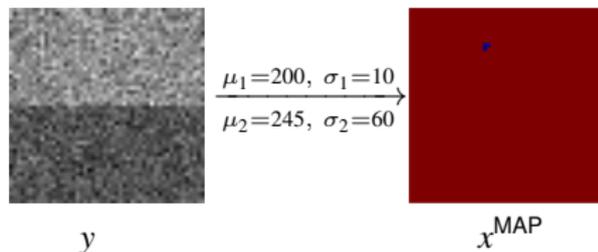
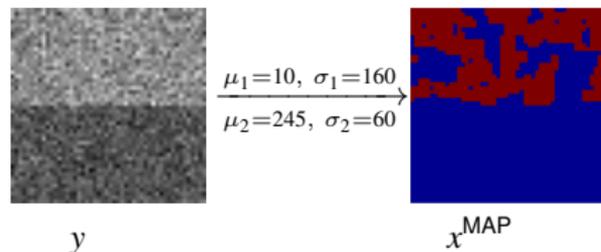
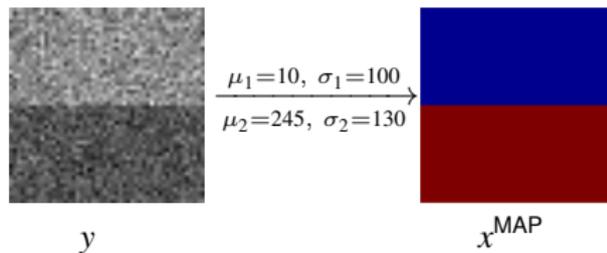
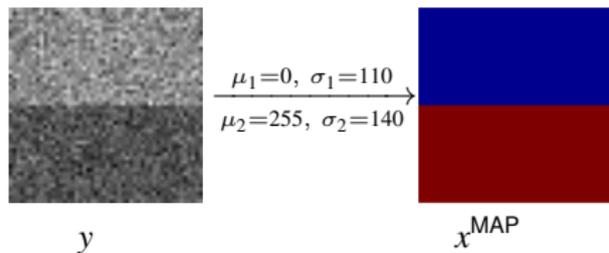
Méthodes markoviennes en segmentation

- Problème : dépend beaucoup des choix qu'on a fait pour μ_i et σ_i



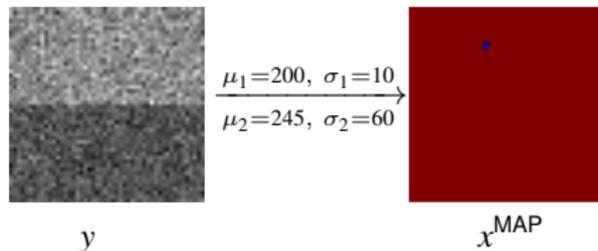
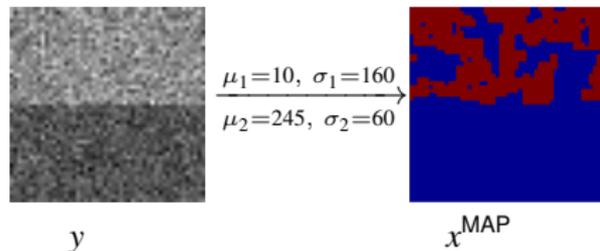
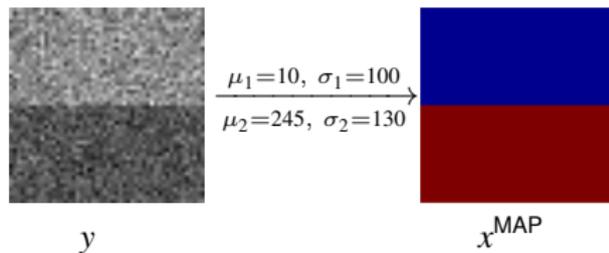
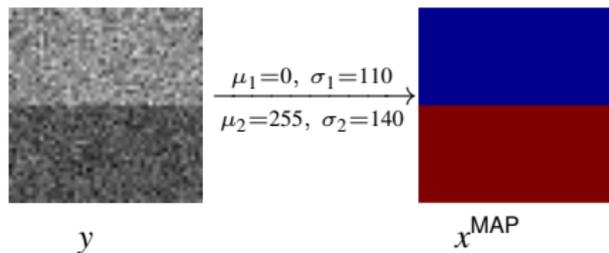
Méthodes markoviennes en segmentation

- Problème : dépend beaucoup des choix qu'on a fait pour μ_i et σ_i



Méthodes markoviennes en segmentation

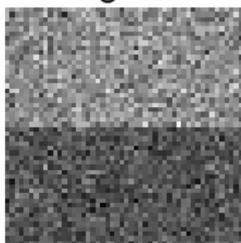
- Problème : dépend beaucoup des choix qu'on a fait pour μ_i et σ_i



- Comment estimer/choisir ces paramètres *avant* de lancer l'optimisation ?

Méthodes markoviennes en segmentation

- utiliser une première segmentation basique → exemple : seuillage



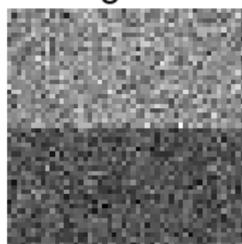
y



$y < 128$

Méthodes markoviennes en segmentation

- utiliser une première segmentation basique → exemple : seuillage



y



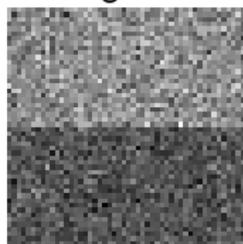
$y < 128$

- $\text{mean}(Y(Y < 128)) \rightarrow -9.0961$

$\text{mean}(Y(Y \geq 128)) \rightarrow 283.2623$

Méthodes markoviennes en segmentation

- utiliser une première segmentation basique → exemple : seuillage



y



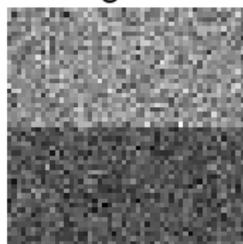
$y < 128$

- $\text{mean}(Y(Y < 128)) \rightarrow -9.0961$
- $\text{std}(Y(Y < 128)) \rightarrow 93.4191$

- $\text{mean}(Y(Y \geq 128)) \rightarrow 283.2623$
- $\text{std}(Y(Y \geq 128)) \rightarrow 109.7665$

Méthodes markoviennes en segmentation

- utiliser une première segmentation basique → exemple : seuillage



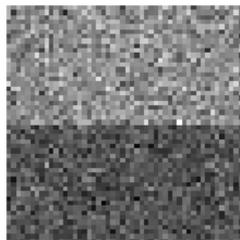
y



$y < 128$

- $\text{mean}(Y(Y < 128)) \rightarrow -9.0961$
- $\text{std}(Y(Y < 128)) \rightarrow 93.4191$

- $\text{mean}(Y(Y \geq 128)) \rightarrow 283.2623$
- $\text{std}(Y(Y \geq 128)) \rightarrow 109.7665$



y

$$\xrightarrow{\begin{matrix} \mu_1 = -9.0961, \sigma_1 = 93.4191 \\ \mu_2 = 283.2623, \sigma_2 = 109.7665 \end{matrix}}$$



x^{MAP}

Méthodes markoviennes en segmentation

- Mieux (mais plus long) → utiliser une méthode d'espérance-maximisation

1. http://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_espérance-maximisation

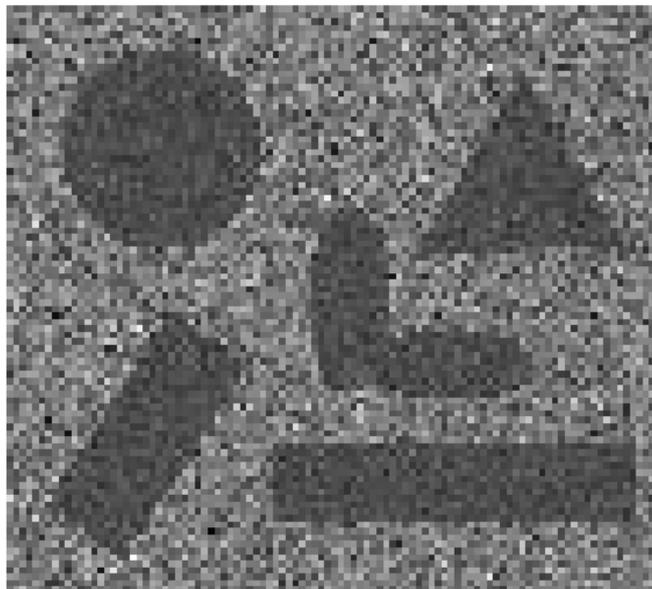
Méthodes markoviennes en segmentation

- Mieux (mais plus long) → utiliser une méthode d'espérance-maximisation
- Algorithme EM¹
 - On initialise les paramètres μ_i et σ_i , puis on alterne entre
 - 1 Segmentation en utilisant les μ_i et σ_i actuels
 - 2 Remise à jour des μ_i et σ_i , en calculant moyenne et écart-type de chaque classe obtenue à l'étape précédente
 - On s'arrête lorsque les paramètres ne changent plus suffisamment (et donc la segmentation associée non plus)

1. http://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_espérance-maximisation

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture



$$\begin{array}{ll} \mu_1 = 128 & \sigma_1 = 30 \\ \mu_2 = 255 & \sigma_2 = 90 \end{array}$$

DEMO MATLAB

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{array}{ll} \mu_1 = 50 & \sigma_1 = 155 \\ \mu_2 = 100 & \sigma_2 = 60 \end{array}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 50 & \sigma_1 &= 155 \\ \mu_2 &= 100 & \sigma_2 &= 60\end{aligned}$$



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 50 & \sigma_1 &= 155 \\ \mu_2 &= 100 & \sigma_2 &= 60\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\mu_1 &= 283 & \sigma_1 &= 260 \\ \mu_2 &= 212 & \sigma_2 &= 111\end{aligned}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 50 & \sigma_1 &= 155 \\ \mu_2 &= 100 & \sigma_2 &= 60\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 283 & \sigma_1 &= 260 \\ \mu_2 &= 212 & \sigma_2 &= 111\end{aligned}$$



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 50 & \sigma_1 &= 155 \\ \mu_2 &= 100 & \sigma_2 &= 60\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 283 & \sigma_1 &= 260 \\ \mu_2 &= 212 & \sigma_2 &= 111\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 275 & \sigma_1 &= 112 \\ \mu_2 &= 215 & \sigma_2 &= 96\end{aligned}$$



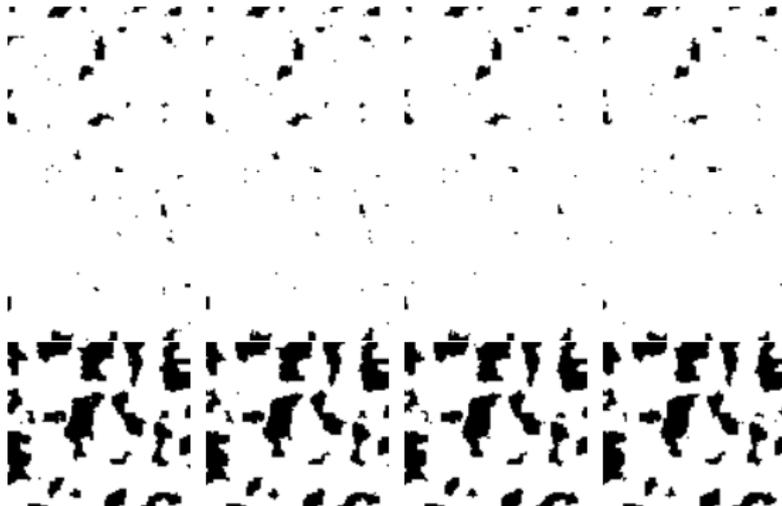
Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 50 & \sigma_1 &= 155 \\ \mu_2 &= 100 & \sigma_2 &= 60\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 283 & \sigma_1 &= 260 \\ \mu_2 &= 212 & \sigma_2 &= 111\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 275 & \sigma_1 &= 112 \\ \mu_2 &= 215 & \sigma_2 &= 96\end{aligned}$$



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 50 & \sigma_1 &= 155 \\ \mu_2 &= 100 & \sigma_2 &= 60 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 283 & \sigma_1 &= 260 \\ \mu_2 &= 212 & \sigma_2 &= 111 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 275 & \sigma_1 &= 112 \\ \mu_2 &= 215 & \sigma_2 &= 96 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 264 & \sigma_1 &= 94 \\ \mu_2 &= 197 & \sigma_2 &= 93 \end{aligned}$$



Méthodes markoviennes en segmentation

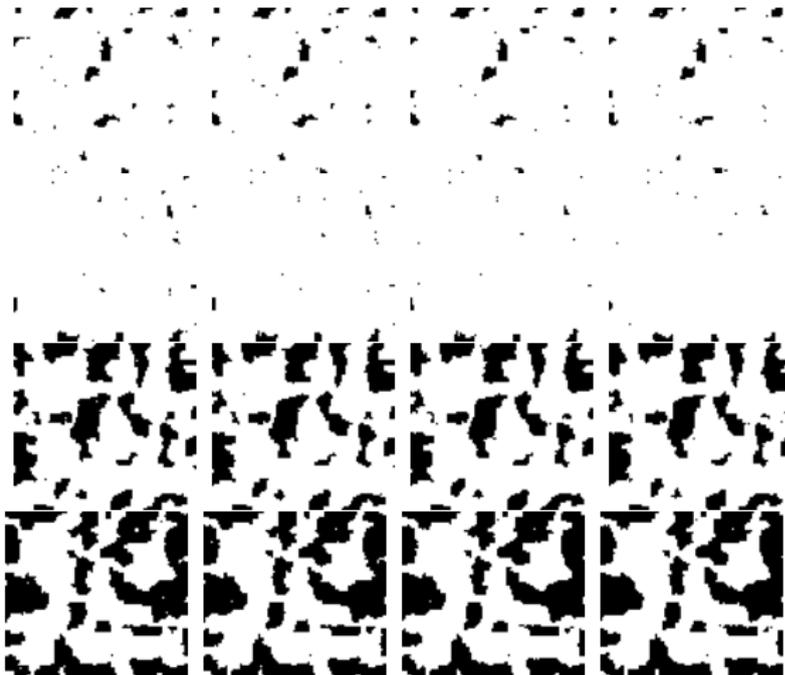
Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 50 & \sigma_1 &= 155 \\ \mu_2 &= 100 & \sigma_2 &= 60 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 283 & \sigma_1 &= 260 \\ \mu_2 &= 212 & \sigma_2 &= 111 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 275 & \sigma_1 &= 112 \\ \mu_2 &= 215 & \sigma_2 &= 96 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 264 & \sigma_1 &= 94 \\ \mu_2 &= 197 & \sigma_2 &= 93 \end{aligned}$$



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 261 & \sigma_1 &= 90 \\ \mu_2 &= 181 & \sigma_2 &= 89\end{aligned}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 261 & \sigma_1 &= 90 \\ \mu_2 &= 181 & \sigma_2 &= 89\end{aligned}$$



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 261 & \sigma_1 &= 90 \\ \mu_2 &= 181 & \sigma_2 &= 89\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\mu_1 &= 262 & \sigma_1 &= 89 \\ \mu_2 &= 167 & \sigma_2 &= 81\end{aligned}$$

Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 261 & \sigma_1 &= 90 \\ \mu_2 &= 181 & \sigma_2 &= 89 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 262 & \sigma_1 &= 89 \\ \mu_2 &= 167 & \sigma_2 &= 81 \end{aligned}$$



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 261 & \sigma_1 &= 90 \\ \mu_2 &= 181 & \sigma_2 &= 89 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 262 & \sigma_1 &= 89 \\ \mu_2 &= 167 & \sigma_2 &= 81 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 259 & \sigma_1 &= 89 \\ \mu_2 &= 147 & \sigma_2 &= 65 \end{aligned}$$



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\mu_1 = 261 \quad \sigma_1 = 90$$

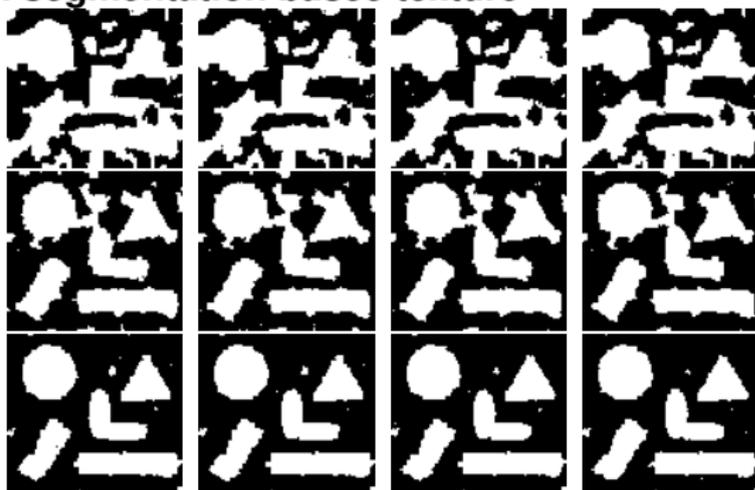
$$\mu_2 = 181 \quad \sigma_2 = 89$$

$$\mu_1 = 262 \quad \sigma_1 = 89$$

$$\mu_2 = 167 \quad \sigma_2 = 81$$

$$\mu_1 = 259 \quad \sigma_1 = 89$$

$$\mu_2 = 147 \quad \sigma_2 = 65$$



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\mu_1 = 261 \quad \sigma_1 = 90$$

$$\mu_2 = 181 \quad \sigma_2 = 89$$

$$\mu_1 = 262 \quad \sigma_1 = 89$$

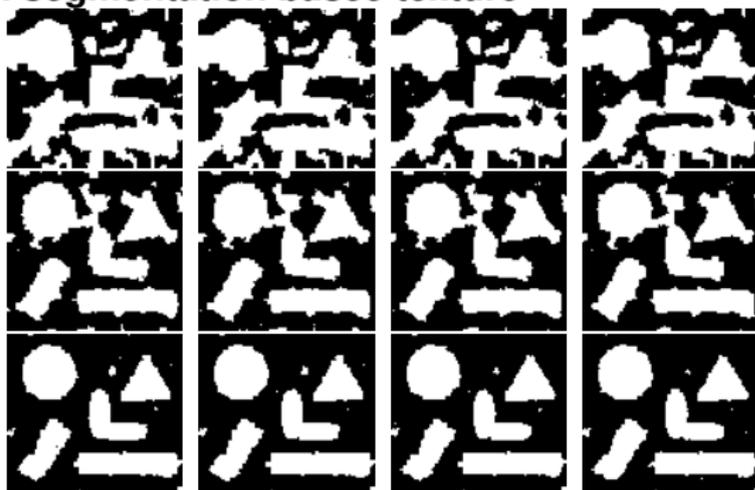
$$\mu_2 = 167 \quad \sigma_2 = 81$$

$$\mu_1 = 259 \quad \sigma_1 = 89$$

$$\mu_2 = 147 \quad \sigma_2 = 65$$

$$\mu_1 = 257 \quad \sigma_1 = 90$$

$$\mu_2 = 130 \quad \sigma_2 = 39$$



Méthodes markoviennes en segmentation

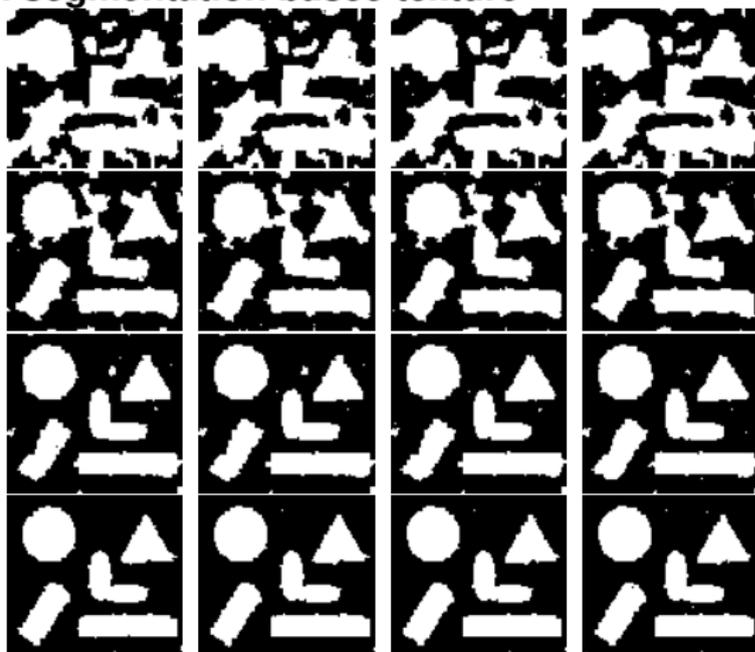
Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 261 & \sigma_1 &= 90 \\ \mu_2 &= 181 & \sigma_2 &= 89 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 262 & \sigma_1 &= 89 \\ \mu_2 &= 167 & \sigma_2 &= 81 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 259 & \sigma_1 &= 89 \\ \mu_2 &= 147 & \sigma_2 &= 65 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 257 & \sigma_1 &= 90 \\ \mu_2 &= 130 & \sigma_2 &= 39 \end{aligned}$$



Méthodes markoviennes en segmentation

Algorithme EM. exemple : segmentation basée texture

$$\mu_1 = 261 \quad \sigma_1 = 90$$

$$\mu_2 = 181 \quad \sigma_2 = 89$$

$$\mu_1 = 262 \quad \sigma_1 = 89$$

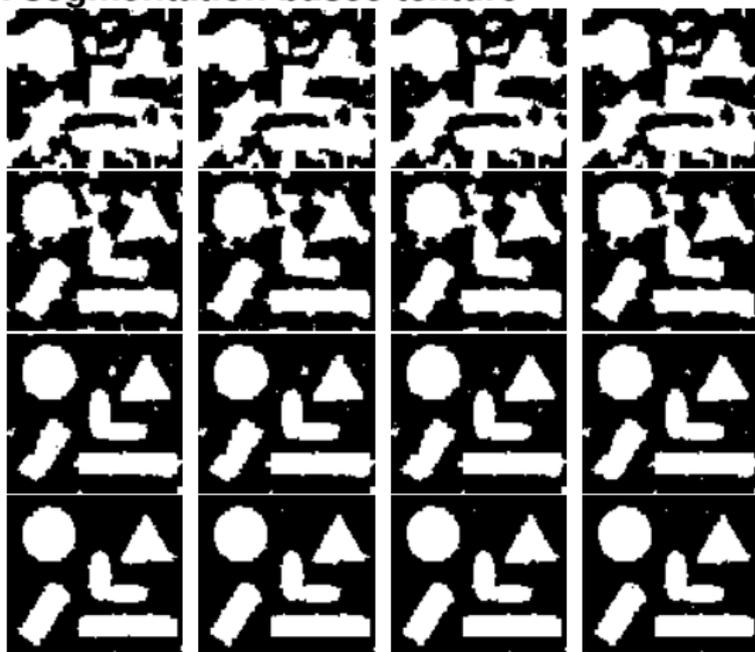
$$\mu_2 = 167 \quad \sigma_2 = 81$$

$$\mu_1 = 259 \quad \sigma_1 = 89$$

$$\mu_2 = 147 \quad \sigma_2 = 65$$

$$\mu_1 = 257 \quad \sigma_1 = 90$$

$$\mu_2 = 130 \quad \sigma_2 = 39$$



$$\mu_1 = 256 \quad \sigma_1 = 90$$

$$\mu_2 = 127 \quad \sigma_2 = 30$$

Méthodes markoviennes

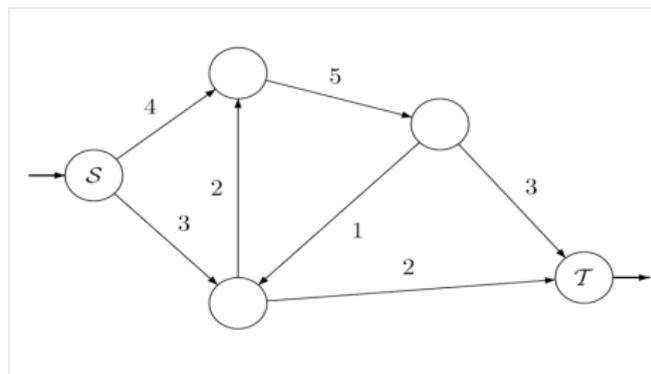
Bilan

- par rapport aux approches continues/variationnelles : modélisation du bruit, ajout d'a priori
- Très à la vogue dans les années 85-95 : elles ont été moins utilisées lorsque les images sont devenues trop grandes (temps de calcul)
- Regain d'intérêt depuis 5/10 ans grâce à l'apparition des techniques de coupure de graphe (Graph Cut) qui permettent une optimisation plus rapide

Approches d'optimisation par graphe : Méthode des "Graph-Cuts" ²

Notations

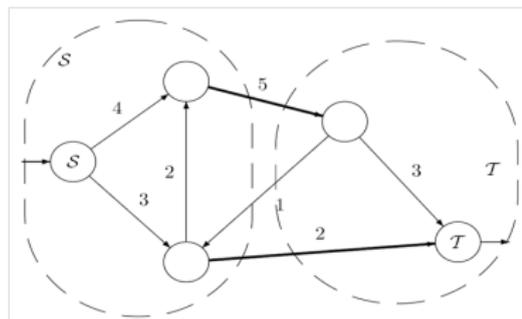
- $G = (V, E)$: Graphe Orienté
- V : sommets, E : arêtes
- pour chaque $(v_1, v_2) \in E$, une capacité w_{v_1, v_2} (poids des arêtes)
- S : source, T : puits



2. adapté de <http://mickaelpetchaud.free.fr/graphcuts.pdf>

Approches d'optimisation par graphe : Méthode des "Graph-Cuts"

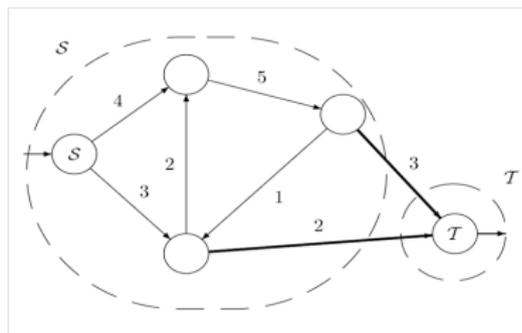
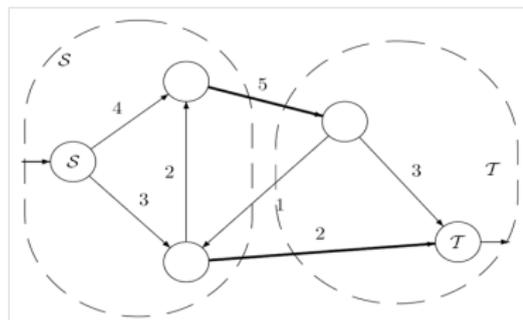
Coupe



- coupe = partition du graphe en deux régions S et T ($S \in S$ et $T \in T$)
- poids d'une coupe =
$$\sum_{\substack{(v_1, v_2) \in E \\ v_1 \in S, v_2 \in T}} w_{v_1, v_2}$$
- coupe minimale = coupe de poids minimal

Approches d'optimisation par graphe : Méthode des "Graph-Cuts"

Coupe



- coupe = partition du graphe en deux régions S et T ($S \in S$ et $T \in T$)
- poids d'une coupe =
$$\sum_{\substack{(v_1, v_2) \in E \\ v_1 \in S, v_2 \in T}} w_{v_1, v_2}$$
- coupe minimale = coupe de poids minimal

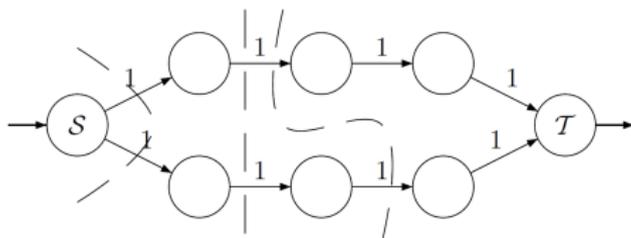
Approches d'optimisation par graphe : Méthode des "Graph-Cuts"

Théorème

Rechercher une coupe minimale dans un graphe est un problème P.

Remarques :

- beaucoup de problèmes sur les graphes sont NP (exemple : recherche de la coupe maximale)
- il peut y avoir plusieurs solutions



Approches d'optimisation par graphe : Méthode des "Graph-Cuts"

Reformulation en terme de flot maximal

On appelle flot, une fonction $f : E \mapsto \mathbb{R}$ vérifiant

- pour tout sommet $p \in V$ autre que S ou T , on a :

$$\sum_{e=(p,\cdot) \in E} f(e) = 0 \quad (1)$$

- pour toute arête $e \in E$, on a

$$f(e) \leq w_e \quad (2)$$

- (1) \rightarrow conservation du flot en chaque sommet
- (2) \rightarrow une arête ne peut contenir un flot dépassant sa capacité
- on définit la "valeur du flot"

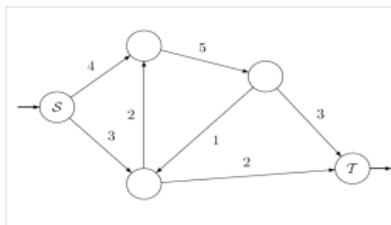
$$\sum_{e=(S,\cdot) \in E} f(e) = \sum_{e=(T,\cdot) \in E} f(e)$$

Approches d'optimisation par graphe : Méthode des "Graph-Cuts"

Reformulation en terme de flot maximal

Théorème

Pour un graphe G vérifiant nos hypothèses, la valeur d'une coupe minimale est égale à la valeur d'un flot maximal.

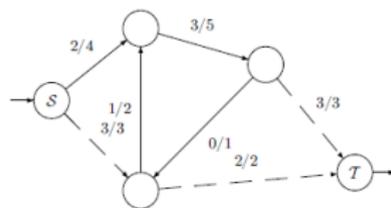
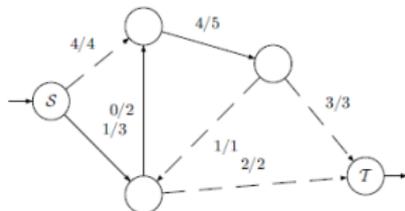
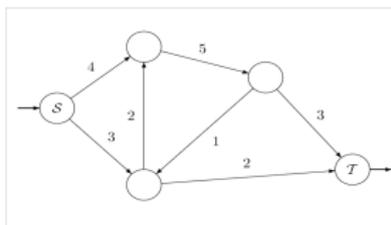


Approches d'optimisation par graphe : Méthode des "Graph-Cuts"

Reformulation en terme de flot maximal

Théorème

Pour un graphe G vérifiant nos hypothèses, la valeur d'une coupe minimale est égale à la valeur d'un flot maximal.



Approches d'optimisation par graphe : Méthode des "Graph-Cuts"

- De plus toute arête intervenant dans une coupe minimale est une arête saturée par un flot maximal
- Si on a trouvé un flot maximal, on regarde les arêtes saturées et on supprime itérativement les arêtes inutiles

Approches d'optimisation par graphe : Méthode des "Graph-Cuts"

- De plus toute arête intervenant dans une coupe minimale est une arête saturée par un flot maximal
- Si on a trouvé un flot maximal, on regarde les arêtes saturées et on supprime itérativement les arêtes inutiles
- Pour trouver flot maximal, plusieurs méthodes :
 - **saturation de chemins** : à partir du flot nul, trouver itérativement un chemin de S à T sur lequel il n'y a pas d'arête saturée. On rajoute alors autant de flot que possible à ce chemin
 - **poussage de flot** : on envoie autant de flot que l'on peut à partir de S . On se retrouve alors avec des noeuds dits actifs, c'est à dire qui reçoivent un excès de flot. On pousse alors ce flot excessif vers d'autres noeuds disponibles.

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

- Les "graph-cut" vont nous servir pour minimiser une énergie de la forme :

$$E(x) = \sum_i D_i(x_i) + \alpha \sum_{i,j} V_{ij}(x_i, x_j)$$

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

- Les "graph-cut" vont nous servir pour minimiser une énergie de la forme :

$$E(x) = \sum_i D_i(x_i) + \alpha \sum_{i,j} V_{ij}(x_i, x_j)$$

- typiquement :
 - $D \rightarrow$ attache aux données :
 - $V \rightarrow$ critère de régularité (non nul uniquement si i et j sont voisins)

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

- Les "graph-cut" vont nous servir pour minimiser une énergie de la forme :

$$E(x) = \sum_i D_i(x_i) + \alpha \sum_{i,j} V_{ij}(x_i, x_j)$$

- typiquement :
 - $D \rightarrow$ attache aux données :
 - $V \rightarrow$ critère de régularité (non nul uniquement si i et j sont voisins)
- Exemple : segmentation binaire d'une image bruitée I ($0 \leq I_i \leq 1$)
 - pour chaque pixel i , on cherche donc une étiquette $x_i \in \{0, 1\}$

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

- Les "graph-cut" vont nous servir pour minimiser une énergie de la forme :

$$E(x) = \sum_i D_i(x_i) + \alpha \sum_{i,j} V_{ij}(x_i, x_j)$$

- typiquement :
 - $D \rightarrow$ attache aux données :
 - $V \rightarrow$ critère de régularité (non nul uniquement si i et j sont voisins)
- Exemple : segmentation binaire d'une image bruitée I ($0 \leq I_i \leq 1$)
 - pour chaque pixel i , on cherche donc une étiquette $x_i \in \{0, 1\}$
 - on prend

$$\begin{cases} D_i(0) = I_i \\ D_i(1) = 1 - I_i \end{cases} \quad \text{et} \quad V_{ij}(x_i, x_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } x_i = x_j \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image



Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image



Seuillage
→



Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image



Seuillage
→



Seuillage
→



Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

Minimisation (par Graph-Cuts) de l'énergie précédente



$\alpha = 0.2$



$\alpha = 0.3$



$\alpha = 0.4$



$\alpha = 0.5$

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

- Les "graph-cut" vont nous servir pour minimiser une énergie de la forme :

$$E(x) = \underbrace{\sum_i D_i(x_i)}_{\text{terme de fidélité, attache aux données}} + \alpha \underbrace{\sum_{i,j} V_{ij}(x_i, x_j)}_{\text{régularisation}}$$

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

- Les "graph-cut" vont nous servir pour minimiser une énergie de la forme :

$$E(x) = \underbrace{\sum_i D_i(x_i)}_{\text{terme de fidélité, attache aux données}} + \alpha \underbrace{\sum_{i,j} V_{ij}(x_i, x_j)}_{\text{régularisation}}$$

- Lien avec le cadre Bayésien :

$$\mathbf{P}(X|I) = \mathbf{P}(I|X) \mathbf{P}(X)$$
$$\Rightarrow \log(\mathbf{P}(X|I)) = \log(\mathbf{P}(I|X)) + \log(\mathbf{P}(X))$$

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

- Les "graph-cut" vont nous servir pour minimiser une énergie de la forme :

$$E(x) = \underbrace{\sum_i D_i(x_i)}_{\text{terme de fidélité, attache aux données}} + \alpha \underbrace{\sum_{i,j} V_{ij}(x_i, x_j)}_{\text{régularisation}}$$

- Lien avec le cadre Bayésien :

$$\mathbf{P}(X|I) = \mathbf{P}(I|X) \mathbf{P}(X)$$

$$\Rightarrow \log(\mathbf{P}(X|I)) = \underbrace{\log(\mathbf{P}(I|X))}_{\text{terme de fidélité, attache aux données}} + \underbrace{\log(\mathbf{P}(X))}_{\text{régularisation}}$$

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

- Les "graph-cut" vont nous servir pour minimiser une énergie de la forme :

$$E(x) = \underbrace{\sum_i D_i(x_i)}_{\text{terme de fidélité, attache aux données}} + \alpha \underbrace{\sum_{i,j} V_{ij}(x_i, x_j)}_{\text{régularisation}}$$

- Lien avec le cadre Bayésien :

$$\mathbf{P}(X|I) = \mathbf{P}(I|X) \mathbf{P}(X)$$

$$\Rightarrow \log(\mathbf{P}(X|I)) = \underbrace{\log(\mathbf{P}(I|X))}_{\text{terme de fidélité, attache aux données}} + \underbrace{\log(\mathbf{P}(X))}_{\text{régularisation}}$$

- Dans le cas général, minimiser

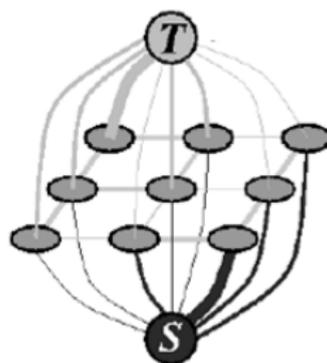
$$E(x) = \sum_i D_i(x_i) + \alpha \sum_{i,j} V_{ij}(x_i, x_j)$$

est un problème NP-complet ("arg")

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

Principe général

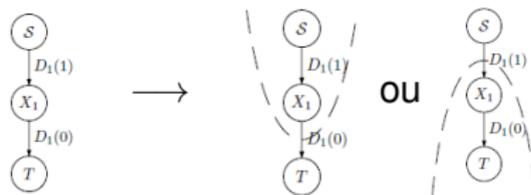
- On transforme le problème de minimisation en problème de coupe minimal dans un graphe
- On construit un graphe constitué d'un sommet par variable de l'énergie (pour chaque pixel)
- On ajoute une source et un puits, qui vont représenter en quelque sorte les valeurs possibles de chaque variable (0 pour la source et 1 pour le puits)



Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

exemples simples

- Un seul pixel : on veut minimiser $D_1(x_1)$.

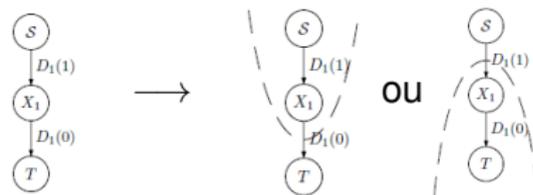


- Si $D_1(0) < D_1(1)$ la solution est donc $x_1 = 0$ et récip.

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

exemples simples

- Un seul pixel : on veut minimiser $D_1(x_1)$.

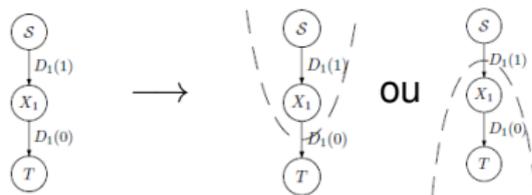


- Si $D_1(0) < D_1(1)$ la solution est donc $x_1 = 0$ et récip.
- avec $D_1(0) = I_1$, $D_1(1) = 1 - I_1 \rightarrow$

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

exemples simples

- Un seul pixel : on veut minimiser $D_1(x_1)$.

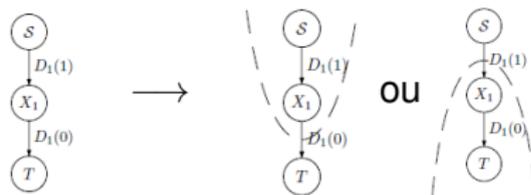


- Si $D_1(0) < D_1(1)$ la solution est donc $x_1 = 0$ et récip.
- avec $D_1(0) = I_1$, $D_1(1) = 1 - I_1 \rightarrow$ seuillage à $\frac{1}{2}$

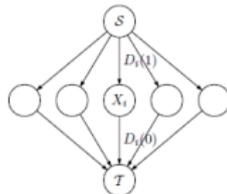
Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

exemples simples

- Un seul pixel : on veut minimiser $D_1(x_1)$.



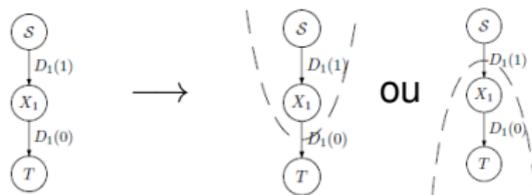
- Si $D_1(0) < D_1(1)$ la solution est donc $x_1 = 0$ et réciproq.
- avec $D_1(0) = I_1$, $D_1(1) = 1 - I_1 \rightarrow$ seuillage à $\frac{1}{2}$
- n pixels sans interaction ($\alpha = 0$) : on veut minimiser $\sum_i D(x_i)$.



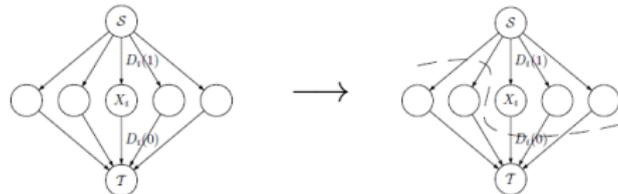
Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

exemples simples

- Un seul pixel : on veut minimiser $D_1(x_1)$.



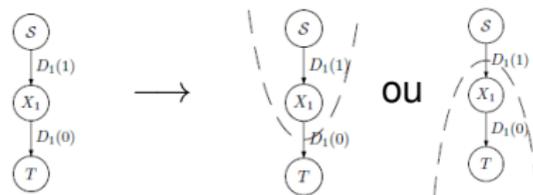
- Si $D_1(0) < D_1(1)$ la solution est donc $x_1 = 0$ et réciproq.
- avec $D_1(0) = I_1$, $D_1(1) = 1 - I_1 \rightarrow$ seuillage à $\frac{1}{2}$
- n pixels sans interaction ($\alpha = 0$) : on veut minimiser $\sum_i D(x_i)$.



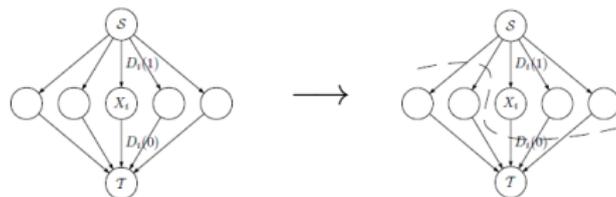
Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

exemples simples

- Un seul pixel : on veut minimiser $D_1(x_1)$.



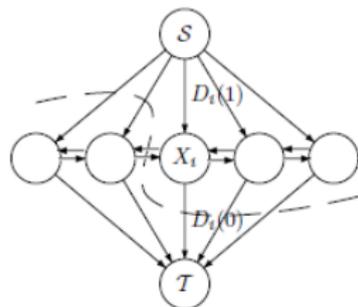
- Si $D_1(0) < D_1(1)$ la solution est donc $x_1 = 0$ et récip.
- avec $D_1(0) = I_1$, $D_1(1) = 1 - I_1 \rightarrow$ seuillage à $\frac{1}{2}$
- n pixels sans interaction ($\alpha = 0$) : on veut minimiser $\sum_i D(x_i)$.



Indep. des variables donc solution : $x_i = 0$ si $D_i(0) < D_i(1)$ (seuillage à $\frac{1}{2}$)

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

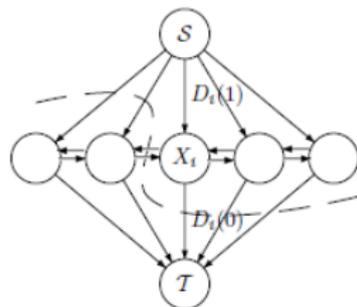
- n pixels avec interactions ($\alpha > 0$)



- il faut que la valeur d'une coupe, corresponde à l'énergie de la configuration associée Ainsi :
 Coupe minimale \leftrightarrow énergie minimale
- Les poids des arêtes sont plus compliqués à définir (en fonction de l'énergie, i.e. de D et V)
- Principe : deux voisins seront reliés par une arête de poids fort s'ils sont de valeurs proches

Méthode des "Graph-Cuts" : utilisation en image

- n pixels avec interactions ($\alpha > 0$)



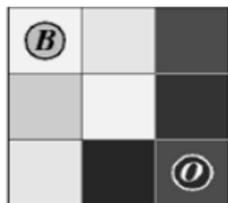
- il faut que la valeur d'une coupe, corresponde à l'énergie de la configuration associée Ainsi :
 Coupe minimale \leftrightarrow énergie minimale
- Les poids des arêtes sont plus compliqués à définir (en fonction de l'énergie, i.e. de D et V)
- Principe : deux voisins seront reliés par une arête de poids fort s'ils sont de valeurs proches

Attention !

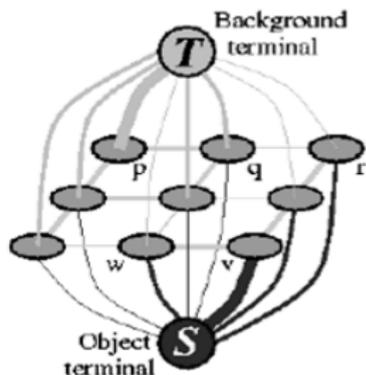
Toutes les énergies de la forme précédente ne sont pas minimisables par Graph-Cut

- Mais si l'énergie à minimiser vérifie certaines propriétés, alors on trouve le **minimum global** et la minimisation est **rapide**

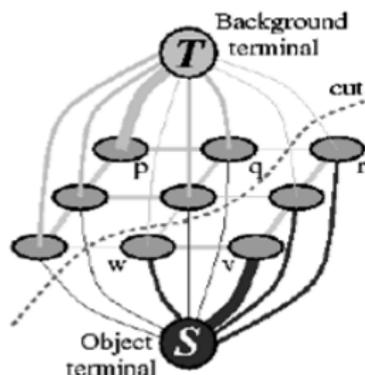
Méthode des "Graph-Cuts" : segmentation



(a) Image with seeds.

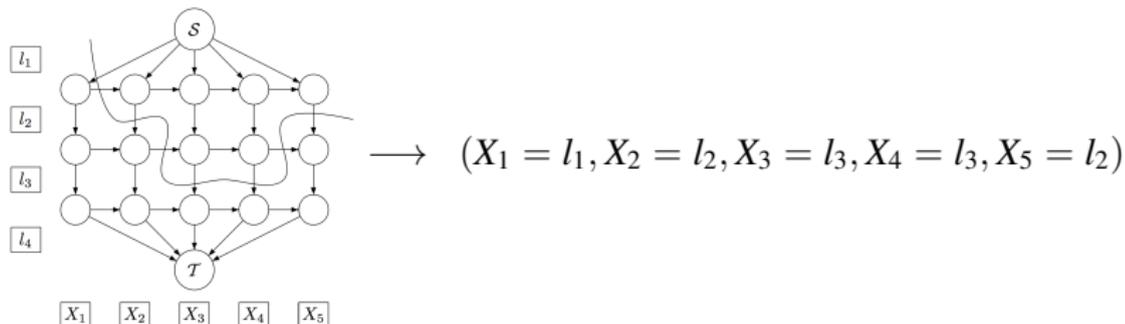


(d) Segmentation results.



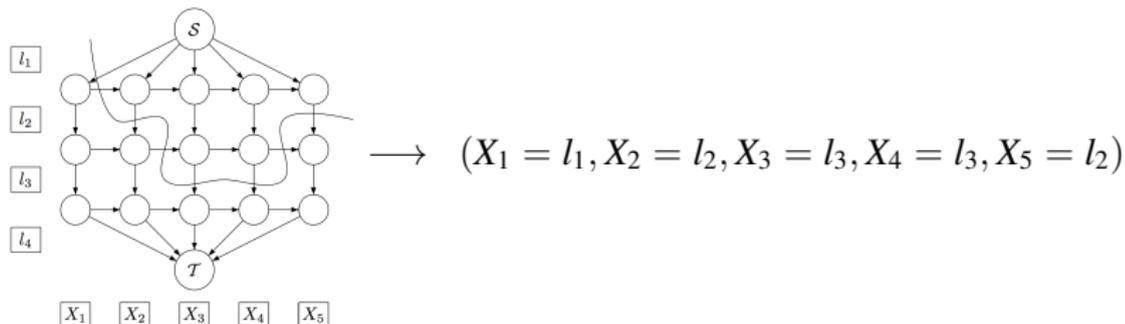
Méthode des "Graph-Cuts" : segmentation

- Le cas multi-étiquette

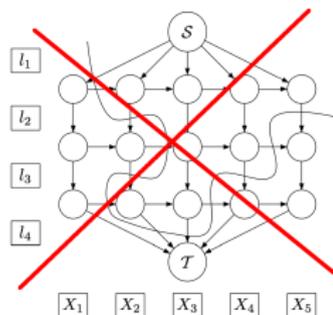


Méthode des "Graph-Cuts" : segmentation

- Le cas multi-étiquette

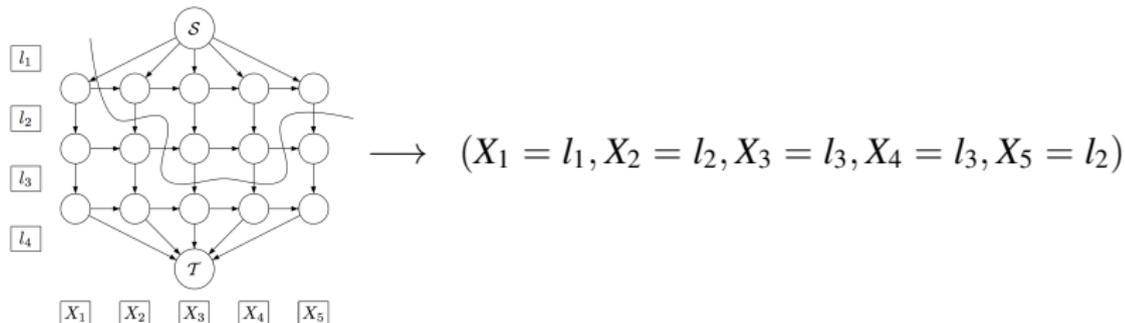


- Attention, des précautions à prendre :

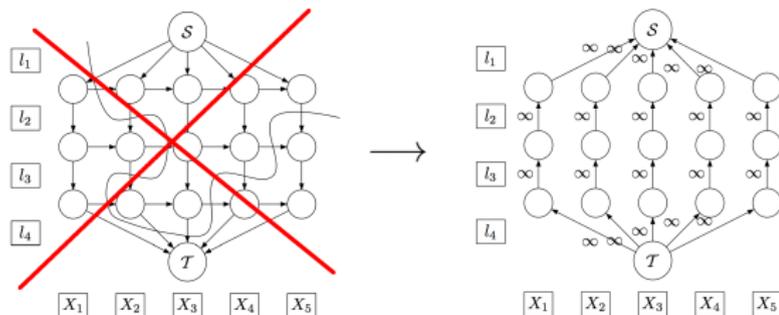


Méthode des "Graph-Cuts" : segmentation

- Le cas multi-étiquette



- Attention, des précautions à prendre :



Méthode des "Graph-Cuts" : segmentation

- Le cas multi-étiquette



4 niveaux de gris



16 n.d.g



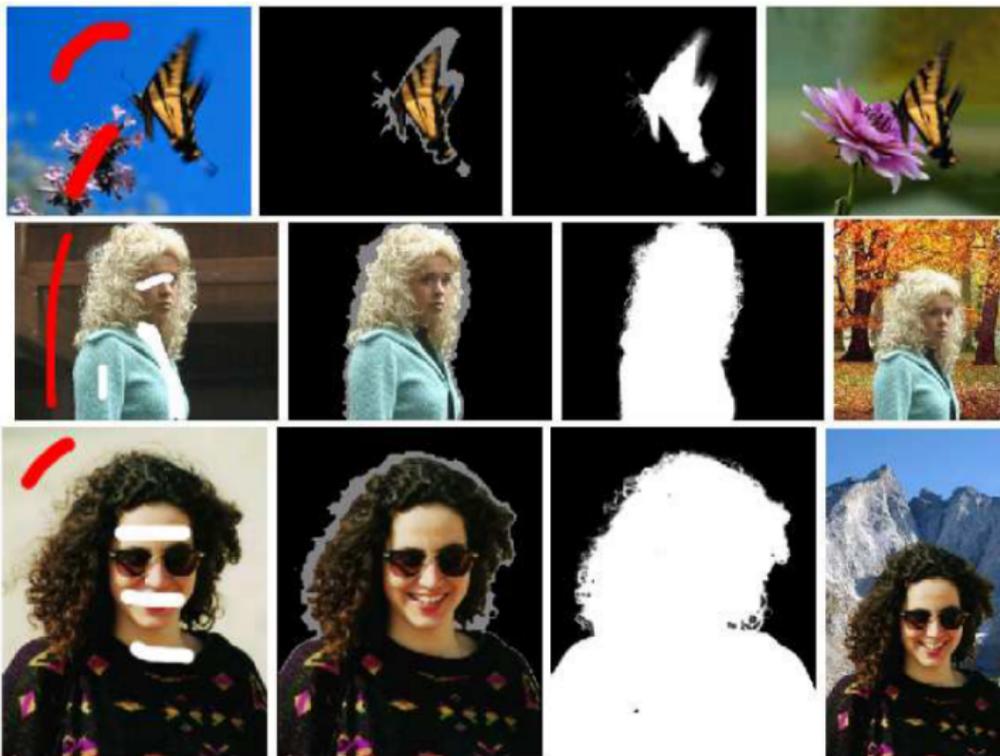
64 n.v.g

Méthode des "Graph-Cuts" : segmentation

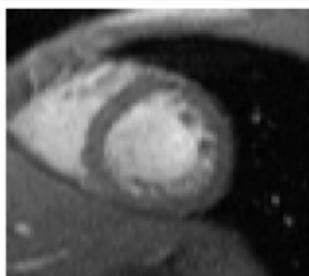


Boykov and Jolly. Interactive graph cuts for optimal boundary and region segmentation of objects in n-d images. 2001. On peut initialiser avec des "graines" (liens infini entre le puit et l'objet et la source et le fond par exemple)

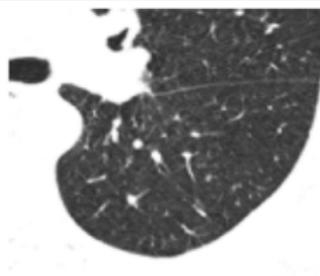
Méthode des "Graph-Cuts" : segmentation



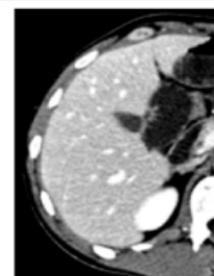
Méthode des "Graph-Cuts" : segmentation



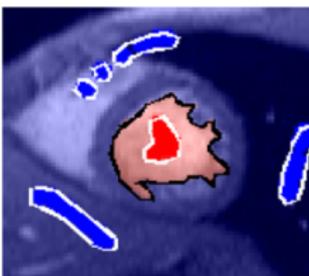
(c) Cardiac MR



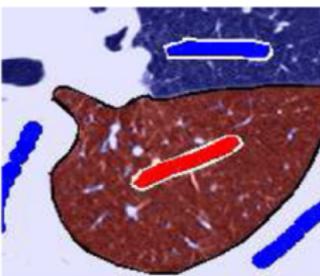
(e) Lung CT



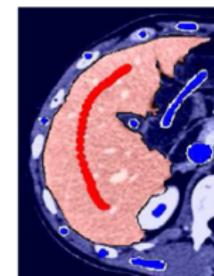
(g) Liver MR



(d) LV Segment

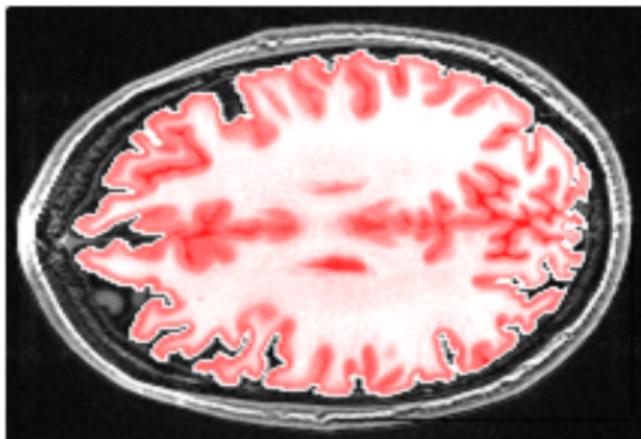


(f) Lobe Segment



(h) Liver Segment

Méthode des "Graph-Cuts" : segmentation



- Temps moyen en 2D (438×522) : 250ms
- Temps moyen en 3D ($256 \times 256 \times 124$) : 9.5s
- Pour aller plus loin

<http://mickaelpetchaud.free.fr/graphcuts.pdf>
et références associées

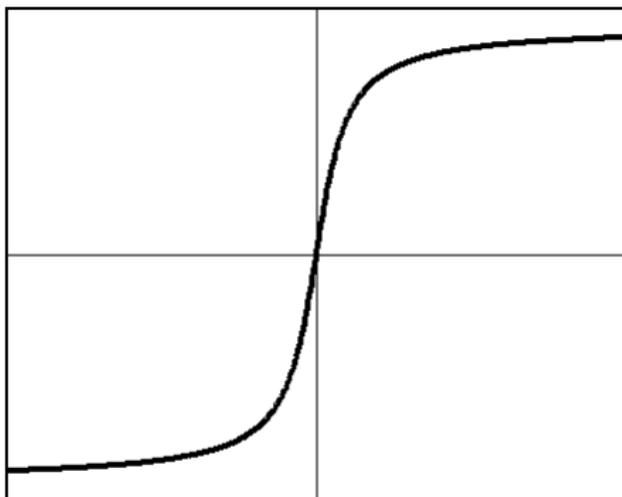
Approches "contours"

Approches "contours"

- contour = ensemble des pixels séparant deux régions
- correspond à une importante variation locale d'intensité

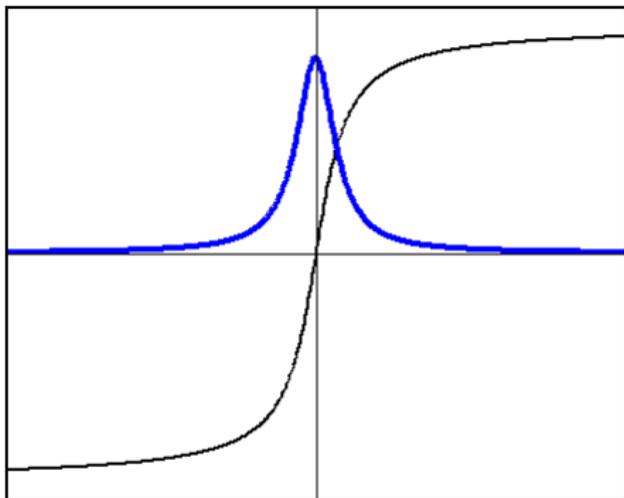
Approches "contours"

- contour = ensemble des pixels séparant deux régions
- correspond à une importante variation locale d'intensité
 - on regarde la variation d'**intensité** autour d'un contour



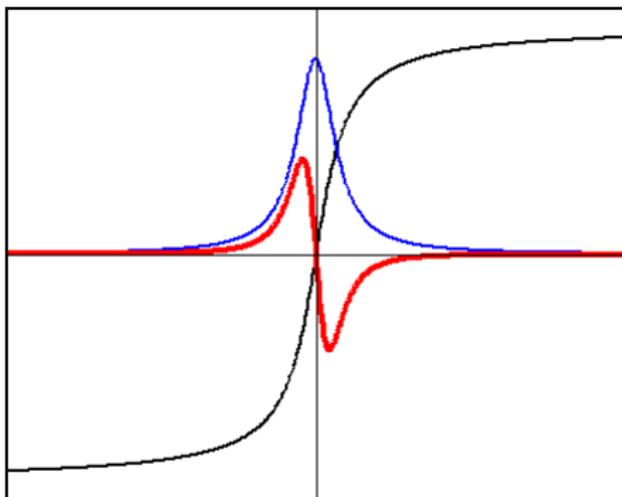
Approches "contours"

- contour = ensemble des pixels séparant deux régions
- correspond à une importante variation locale d'intensité
 - on regarde la variation d'**intensité** autour d'un contour
 - la **dérivée première** passe par un maximum



Approches "contours"

- contour = ensemble des pixels séparant deux régions
- correspond à une importante variation locale d'intensité
 - on regarde la variation d'**intensité** autour d'un contour
 - la **dérivée première** passe par un maximum
 - la **dérivée seconde** passe par un zéro



Gradient de l'image

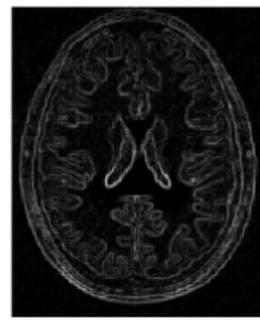
$$G = \overrightarrow{\text{grad}} f(x, y) \quad \left\{ \begin{array}{l} G_x = \frac{\partial f}{\partial x}(x, y) \\ G_y = \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \end{array} \right.$$



G_x



G_y



$\sqrt{G_x^2 + G_y^2}$

Seuillage de la norme du gradient de l'image lissée

$$\sigma = 1$$



seuil = 5

seuil = 10

seuil = 15

Seuillage de la norme du gradient de l'image lissée

$$\sigma = 2$$



seuil = 5

seuil = 10

seuil = 15

Seuillage de la norme du gradient de l'image lissée

$$\sigma = 3$$



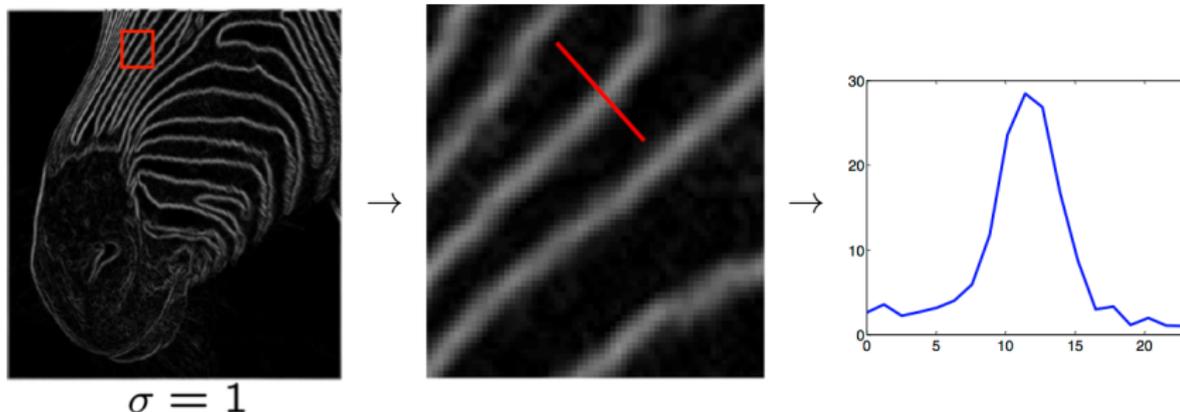
seuil = 5

seuil = 10

seuil = 15

Détecteur de Canny

- Profil dans la direction du gradient



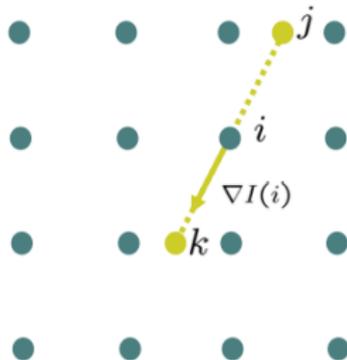
- Principe : ne garder que les maxima locaux (dans la direction du gradient) et supérieurs à un seuil

Détecteur de Canny

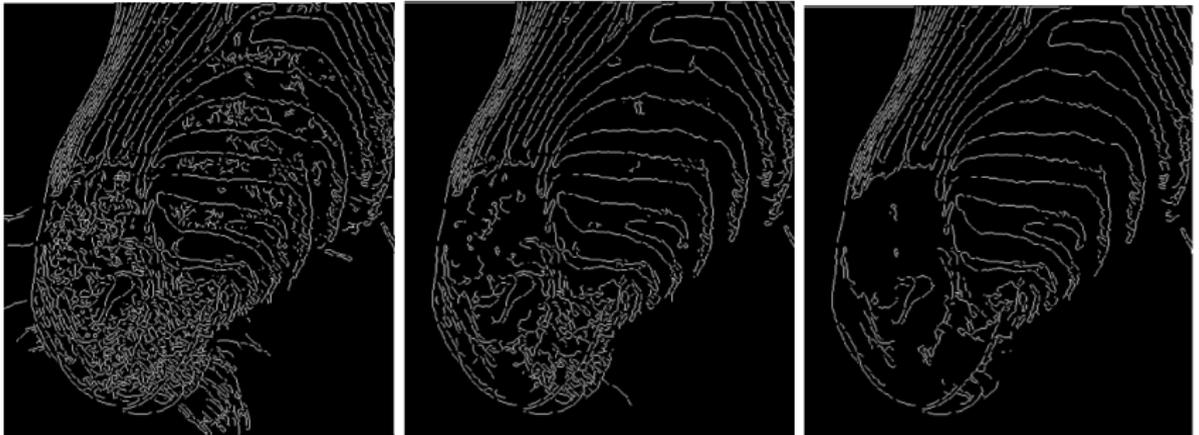
- Principe : ne garder que les maxima locaux (dans la direction du gradient) et supérieurs à un seuil

contour en i si

- $|\nabla I(i)| > |\narela I(j)|$
- $|\nabla I(i)| > |\nabla I(k)|$
- $|\nabla I(i)| > \text{seuil}$



Détecteur de Canny, résultats



Détecteur de Canny, résultats



Détecteur de Canny, résultats



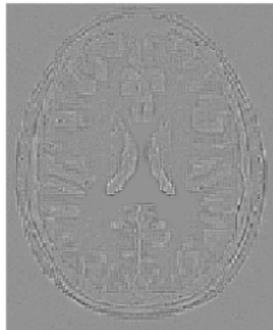
Détecteur de Canny, résultats



Laplacien de l'image

$$\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

"équivalent de la dérivée seconde" en 2D



Détection des passages par 0
du laplacien (Marr et Hildreth,
1976).

Passages par zéros du laplacien

- Lignes de niveau zéro (courbes fermées) du laplacien lissé (LoG) et interpolé spatialement



- Mais, soit trop de lignes (lissage faible), soit peu de lignes mais en partie décalées (lissage fort)

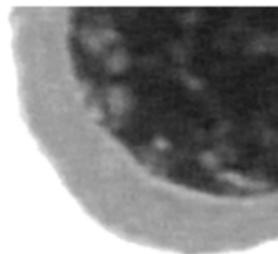
Approches "contours"

Seuillage par hystérésis

- compromis dans le choix du seuil sur la norme du gradient pour sélectionner les contours
 - fermeture des contours (peu de faux négatif)
 - immunité au bruit (peu de faux positifs)
- Choix de deux seuils, un haut (spécificité) et un bas (sensibilité)
 - 1 On sélectionne les points au-dessus du seuil haut
 - 2 pour tout point entre le seuil haut et le seuil bas, on regarde s'il existe un point de son voisinage $>$ seuil haut
- Principe utilisé dans le détecteur de Canny.

Approches "contours"

Seuillage par hystérésis



Seuillage simple
 $S=50$



Seuillage simple
 $S=100$



Seuillage par
hystérésis
 $S_h=100, S_b=50$

Extraction de chaînes de contours

- Problème : extraction d'une chaîne de contours entre deux points donnés
- Applications :
 - analyse automatique de certains types d'images (extraction de routes dans images satellite, d'artères en angiographie, etc.)
 - découpe interactive en édition d'image
- Approche classique
 - définir une fonction de coût pour une chaîne candidate
 - trouver la chaîne de coût minimum entre les deux extrémités par programmation dynamique : problème combinatoire de plus court chemin dans un graphe résolu par l'algorithme de Dijkstra

Coût d'une chaînes de pixels

- Chaîne : succession de pixels voisins au sens de la 4 ou 8 connexité



- Minimiser une somme de coûts élémentaires positifs

$$E_n(x_0, \dots, x_n; I) = \sum_{i=1}^n \phi(x_{i-1}, x_i; I)$$

- Exemple avec f décroissante et g croissante

$$\phi(x_{i-1}, x_i; I) = \alpha \|x_i - x_{i-1}\| + \beta f(\|\nabla I(x_i)\|) + \gamma g(|\nabla I(x_i)| \cdot (x_i - x_{i-1}))$$

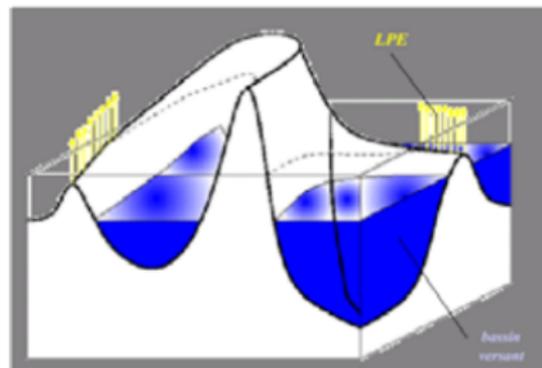
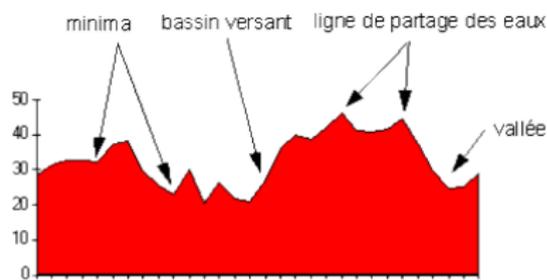
Lignes de partage des eaux (watershed)

- Digabel et Lantuéjou, 1972
- l'image est représenté par un relief que l'on inonde progressivement
- pour la segmentation, on travaille sur l'image de la norme du gradient

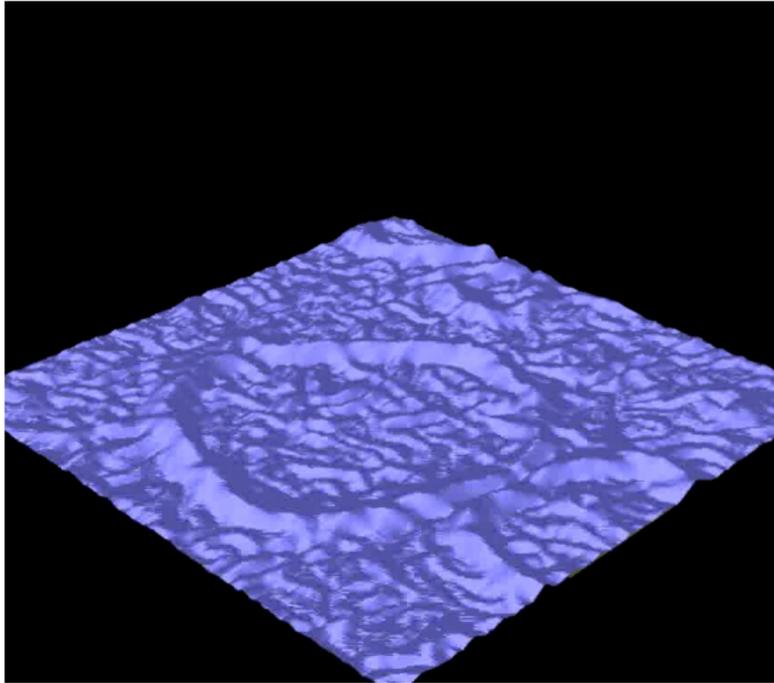


Lignes de partage des eaux (watershed)

- Points de départs : minima locaux
- montée des eaux
- barrage élémentaire à chaque rencontre de bassins : ligne de partage des eaux

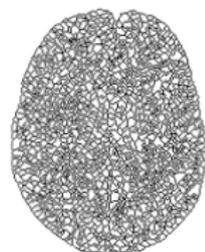
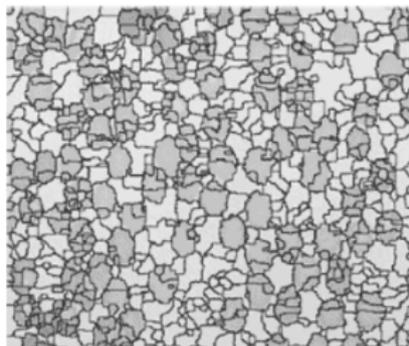
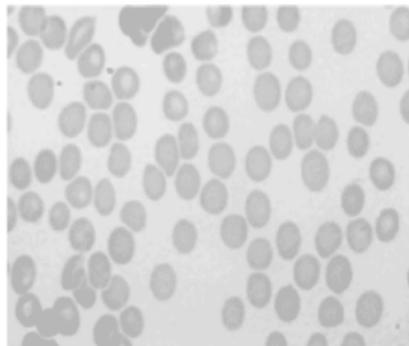


Lignes de partage des eaux (watershed)



<http://pmc.polytechnique.fr/~vta/water.mpeg>

Lignes de partage des eaux (watershed)



- algorithme non local
- problème de sur-segmentation
- sensibilité à tout minimum local, au bruit (→ lissage préventif)

Contours actifs

- Idée générale : on cherche la forme (courbe/surface) \mathcal{C} qui minimise une énergie

$$E(\mathcal{C}) = E_{\text{image}}(\mathcal{C}) + E_{\text{interne}}(\mathcal{C})$$

Contours actifs

- Idée générale : on cherche la forme (courbe/surface) \mathcal{C} qui minimise une énergie

$$E(\mathcal{C}) = E_{\text{image}}(\mathcal{C}) + E_{\text{interne}}(\mathcal{C})$$

- $E_{\text{image}}(\mathcal{C})$ va essayer d'attirer la courbe sur les contours de l'image

Contours actifs

- Idée générale : on cherche la forme (courbe/surface) \mathcal{C} qui minimise une énergie

$$E(\mathcal{C}) = E_{\text{image}}(\mathcal{C}) + E_{\text{interne}}(\mathcal{C})$$

- $E_{\text{image}}(\mathcal{C})$ va essayer d'attirer la courbe sur les contours de l'image
- $E_{\text{interne}}(\mathcal{C})$ permet d'ajouter des a priori sur la forme de la courbe que l'on cherche (régularité)

Contours actifs

- Idée générale : on cherche la forme (courbe/surface) \mathcal{C} qui minimise une énergie

$$E(\mathcal{C}) = E_{\text{image}}(\mathcal{C}) + E_{\text{interne}}(\mathcal{C})$$

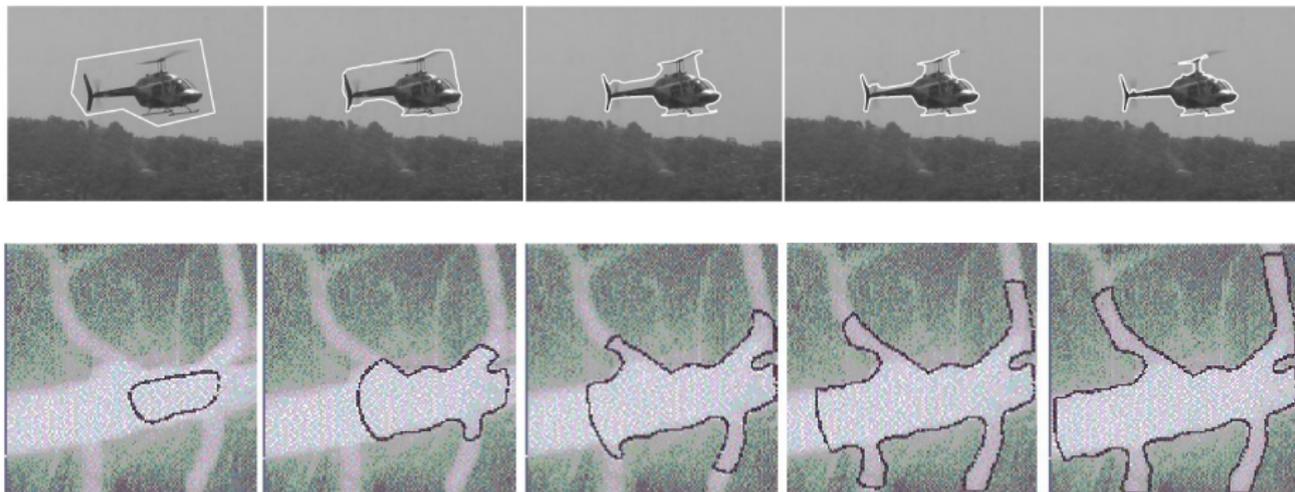
- $E_{\text{image}}(\mathcal{C})$ va essayer d'attirer la courbe sur les contours de l'image
- $E_{\text{interne}}(\mathcal{C})$ permet d'ajouter des a priori sur la forme de la courbe que l'on cherche (régularité)
- Contours actifs géodésiques :

$$E(\mathcal{C}) = \int_0^1 |\mathcal{C}'(p)|^2 dp + \beta \int_0^1 g_{\mathcal{I}}(\mathcal{C}(p)) dp$$

- la fonction de potentiel $g_{\mathcal{I}}$ vise à attirer la courbe vers les contours de l'objet à segmenter. Elle dépend donc de **l'image \mathcal{I} à segmenter**.
- Minimisation par "descente de gradient" : Euler-Lagrange

Approches "contours"

Contours actifs / Level-set



Contours actifs : exemple de fonction de potentiel

- pour la segmentation on veut avoir : $g_{\mathcal{I}}(x, y)$ proche de 1 loin des contours et minimal à proximité d'un contour

Contours actifs : exemple de fonction de potentiel

- pour la segmentation on veut avoir : $g_{\mathcal{I}}(x, y)$ proche de 1 loin des contours et minimal à proximité d'un contour
- ainsi, $\int_0^1 g_{\mathcal{I}}(\mathcal{C}(p)) dp$ sera petit uniquement si \mathcal{C} coïncide avec un contour.

Contours actifs : exemple de fonction de potentiel

- pour la segmentation on veut avoir : $g_{\mathcal{I}}(x, y)$ proche de 1 loin des contours et minimal à proximité d'un contour
- ainsi, $\int_0^1 g_{\mathcal{I}}(\mathcal{C}(p)) dp$ sera petit uniquement si \mathcal{C} coïncide avec un contour.
- exemple :

$$g_{\mathcal{I}}(x, y) = \frac{1}{1 + |\nabla \mathcal{I}(x, y)|}$$

Contours actifs : exemple de fonction de potentiel

- pour la segmentation on veut avoir : $g_{\mathcal{I}}(x, y)$ proche de 1 loin des contours et minimal à proximité d'un contour
- ainsi, $\int_0^1 g_{\mathcal{I}}(\mathcal{C}(p)) dp$ sera petit uniquement si \mathcal{C} coïncide avec un contour.
- exemple :

$$g_{\mathcal{I}}(x, y) = \frac{1}{1 + |\nabla \mathcal{I}(x, y)|}$$

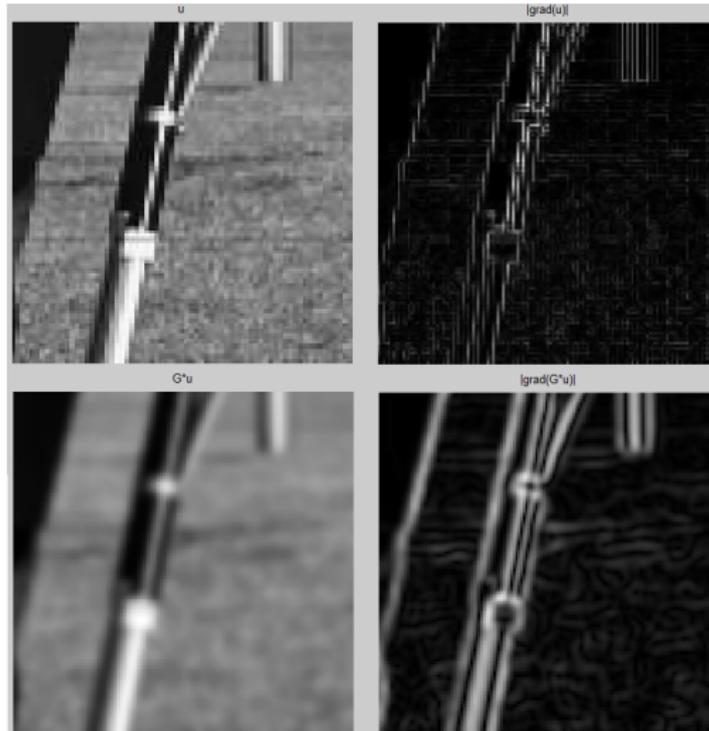
- pas robuste au bruit \rightarrow on lisse avant de prendre le gradient :

$$g_{\mathcal{I}}(x, y) = \frac{1}{1 + |\nabla (G_{\sigma} * \mathcal{I}(x, y))|}$$

fonction de potentiel image



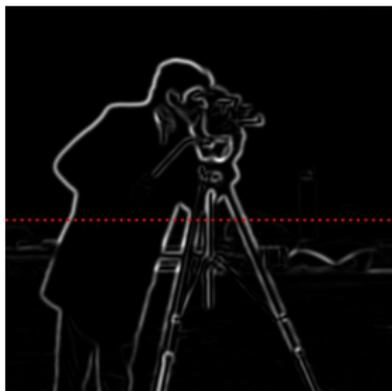
fonction de potentiel image



Contours actifs ou snakes : fonction de potentiel image



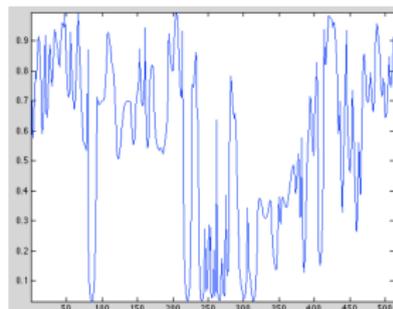
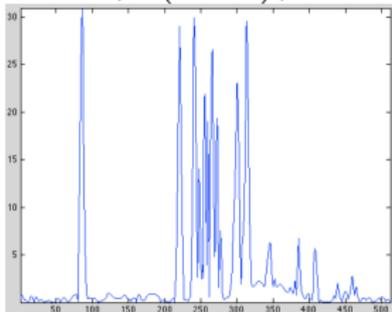
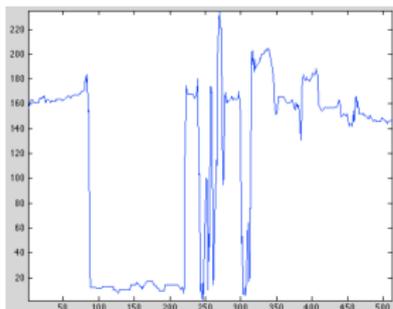
I



$|\nabla(G * I)|$



gI



Contours actifs ou snakes : difficultés

- Dépend de la paramétrisation de la courbe

Contours actifs ou snakes : difficultés

- Dépend de la paramétrisation de la courbe

$$\begin{cases} x(p) = r \sin(p 2 \pi) \\ y(p) = r \cos(p 2 \pi) \end{cases} \implies \text{Image of a circle} \iff \begin{cases} x(p) = r \cos(p 2 \pi) \\ y(p) = r \sin(p 2 \pi) \end{cases}$$


Contours actifs ou snakes : difficultés

- Dépend de la paramétrisation de la courbe

$$\begin{cases} x(p) = r \sin(p 2 \pi) \\ y(p) = r \cos(p 2 \pi) \end{cases} \implies \text{Image of a circle} \iff \begin{cases} x(p) = r \cos(p 2 \pi) \\ y(p) = r \sin(p 2 \pi) \end{cases}$$

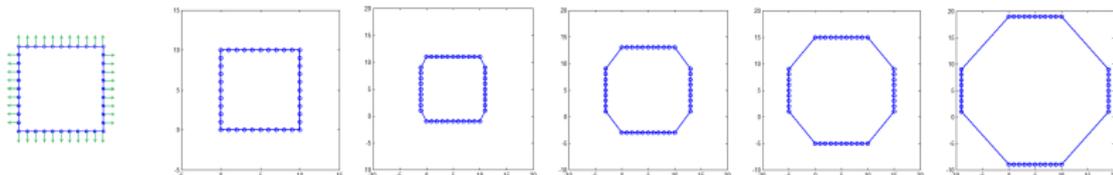

- problèmes de discrétisation de la courbe (liste de points)

Contours actifs ou snakes : difficultés

- Dépend de la paramétrisation de la courbe

$$\begin{cases} x(p) = r \sin(p 2 \pi) \\ y(p) = r \cos(p 2 \pi) \end{cases} \Rightarrow \text{Image of a circle} \Leftarrow \begin{cases} x(p) = r \cos(p 2 \pi) \\ y(p) = r \sin(p 2 \pi) \end{cases}$$

- problèmes de discrétisation de la courbe (liste de points)

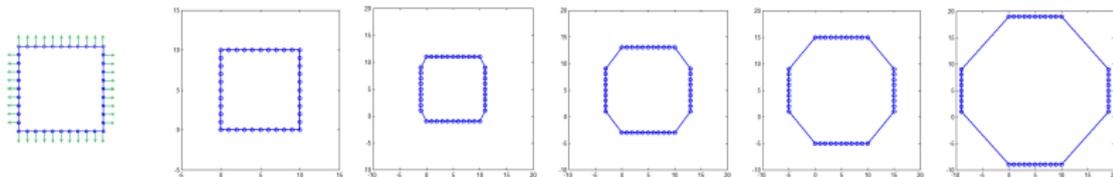


Contours actifs ou snakes : difficultés

- Dépend de la paramétrisation de la courbe

$$\begin{cases} x(p) = r \sin(p 2 \pi) \\ y(p) = r \cos(p 2 \pi) \end{cases} \Rightarrow \text{Image of a circle} \Leftarrow \begin{cases} x(p) = r \cos(p 2 \pi) \\ y(p) = r \sin(p 2 \pi) \end{cases}$$

- problèmes de discrétisation de la courbe (liste de points)



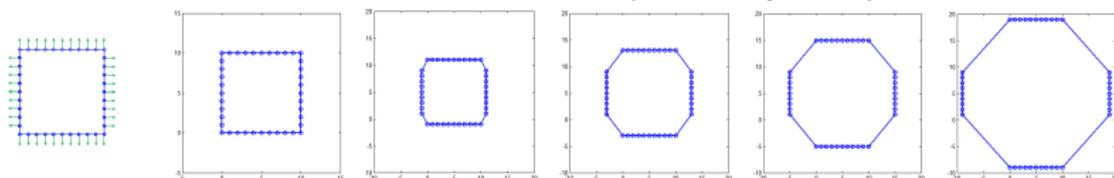
- pas de changement de topologie possible

Contours actifs ou snakes : difficultés

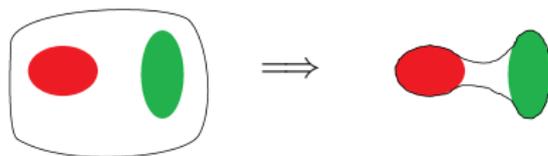
- Dépend de la paramétrisation de la courbe

$$\begin{cases} x(p) = r \sin(p 2 \pi) \\ y(p) = r \cos(p 2 \pi) \end{cases} \Rightarrow \text{Image of a circle} \Leftarrow \begin{cases} x(p) = r \cos(p 2 \pi) \\ y(p) = r \sin(p 2 \pi) \end{cases}$$

- problèmes de discrétisation de la courbe (liste de points)



- pas de changement de topologie possible

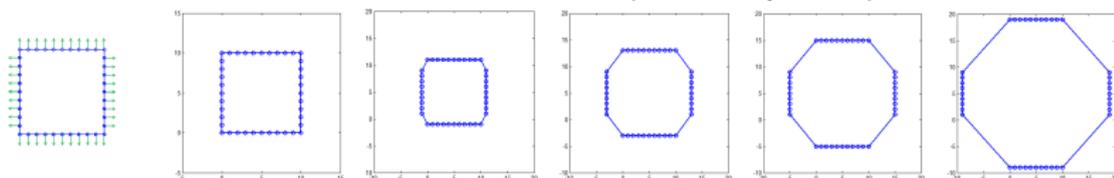


Contours actifs ou snakes : difficultés

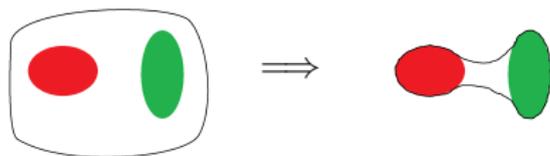
- Dépend de la paramétrisation de la courbe

$$\begin{cases} x(p) = r \sin(p 2 \pi) \\ y(p) = r \cos(p 2 \pi) \end{cases} \Rightarrow \text{Image of a circle} \Leftarrow \begin{cases} x(p) = r \cos(p 2 \pi) \\ y(p) = r \sin(p 2 \pi) \end{cases}$$

- problèmes de discrétisation de la courbe (liste de points)



- pas de changement de topologie possible



- en dimension supérieure (3D \rightarrow évolution de surface) : complexité de l'implémentation, discrétisation, évolution.

Représentation par courbes de niveaux : méthode "Level Set"

- Représentation/caractérisation d'une courbe
 - paramétrisation
 - liste de points
 - implicite ← Level Set

Représentation par courbes de niveaux : méthode "Level Set"

- Représentation/caractérisation d'une courbe
 - paramétrisation
 - liste de points
 - implicite ← Level Set

Level Set : Osher-Sethian, 1988.

Idée principale :

- la courbe \mathcal{C} est représentée de manière **implicite**.
- \mathcal{C} est représenté par une surface de dimension supérieure Φ dont elle est le **niveau zéro**

$$\mathcal{C} = \left\{ (x, y) \mid \Phi(x, y) = 0 \right\}$$

Représentation par courbes de niveaux : méthode "Level Set"

- Représentation/caractérisation d'une courbe
 - paramétrisation
 - liste de points
 - implicite ← Level Set

Level Set : Osher-Sethian, 1988.

Idée principale :

- la courbe \mathcal{C} est représentée de manière **implicite**.
- \mathcal{C} est représenté par une surface de dimension supérieure Φ dont elle est le **niveau zéro**

$$\mathcal{C} = \left\{ (x, y) \mid \Phi(x, y) = 0 \right\}$$

- Pour une courbe (dans \mathbb{R}^2) $\rightarrow \phi$ est une image plane

Représentation par courbes de niveaux : méthode "Level Set"

- Représentation/caractérisation d'une courbe
 - paramétrisation
 - liste de points
 - implicite ← Level Set

Level Set : Osher-Sethian, 1988.

Idée principale :

- la courbe \mathcal{C} est représentée de manière **implicite**.
- \mathcal{C} est représenté par une surface de dimension supérieure Φ dont elle est le **niveau zéro**

$$\mathcal{C} = \left\{ (x, y) \mid \Phi(x, y) = 0 \right\}$$

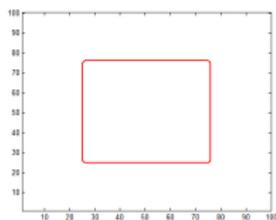
- Pour une courbe (dans \mathbb{R}^2) $\rightarrow \phi$ est une image plane
- Pour une surface (dans \mathbb{R}^3) $\rightarrow \phi$ est une image volumique

"Level Set"

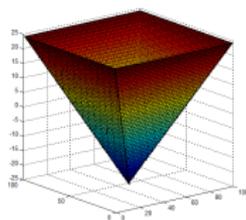
- une courbe plane (dans \mathbb{R}^2) : représentée par une fonction $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$
(image, surface)

"Level Set"

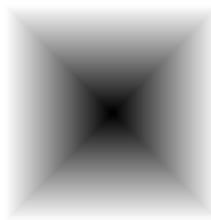
- une courbe plane (dans \mathbb{R}^2) : représentée par une fonction $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ (image, surface)



\mathcal{C}



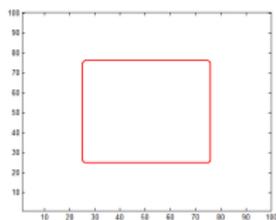
Φ



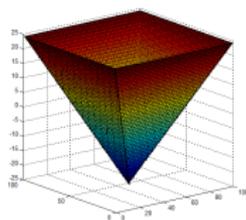
Φ

"Level Set"

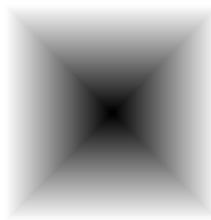
- une courbe plane (dans \mathbb{R}^2) : représentée par une fonction $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ (image, surface)



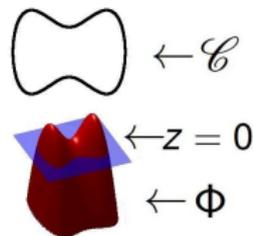
\mathcal{C}



Φ

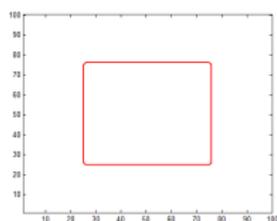


Φ

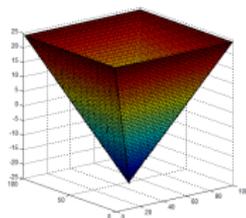


"Level Set"

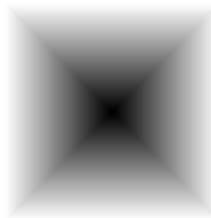
- une courbe plane (dans \mathbb{R}^2) : représentée par une fonction $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ (image, surface)



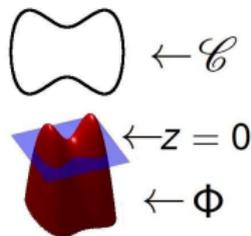
\mathcal{C}



Φ



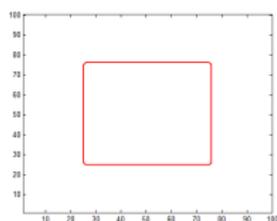
Φ



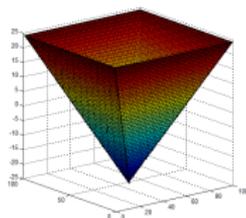
- un bon choix : Φ fonction distance signée à la courbe \mathcal{C} (négative à l'intérieur, positive à l'extérieur).

"Level Set"

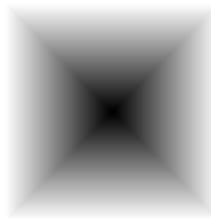
- une courbe plane (dans \mathbb{R}^2) : représentée par une fonction $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ (image, surface)



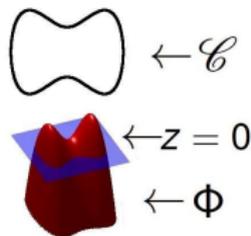
\mathcal{C}



Φ



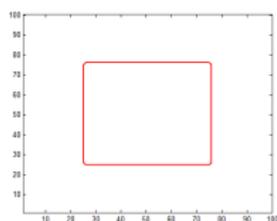
Φ



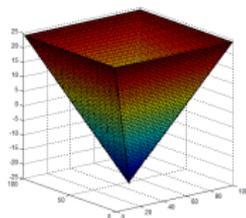
- un bon choix : Φ fonction distance signée à la courbe \mathcal{C} (négative à l'intérieur, positive à l'extérieur).
- Exple : distance signée à un cercle de rayon r et de centre $(0, 0)$?

"Level Set"

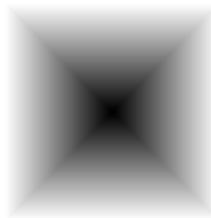
- une courbe plane (dans \mathbb{R}^2) : représentée par une fonction $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ (image, surface)



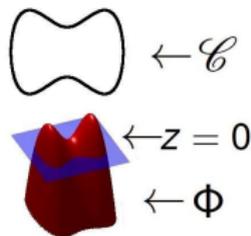
\mathcal{C}



Φ



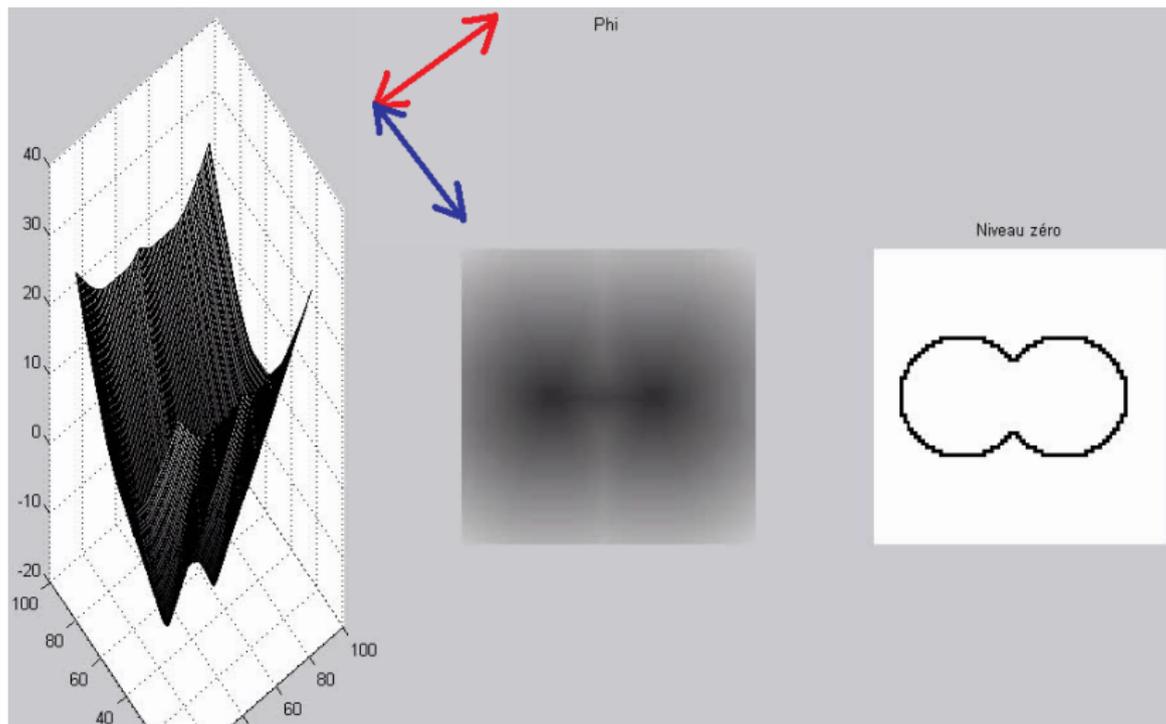
Φ



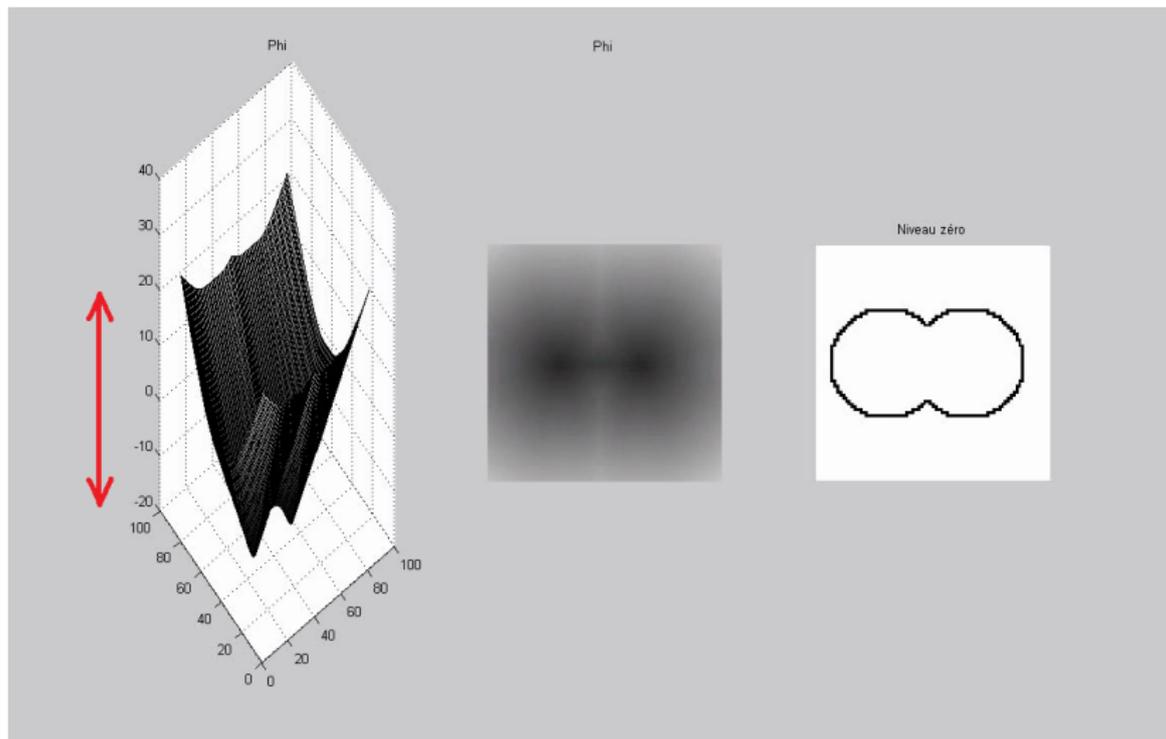
- un bon choix : Φ fonction distance signée à la courbe \mathcal{C} (négative à l'intérieur, positive à l'extérieur).
- Exple : distance signée à un cercle de rayon r et de centre $(0, 0)$?

$$\phi(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} - r$$

"Level Set" : lien évolution de \mathcal{C} / évolution de Φ



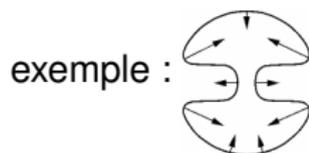
"Level Set" : lien évolution de \mathcal{C} / évolution de Φ



"Level Set" : lien évolution de \mathcal{C} / évolution de Φ

- on veut faire évoluer une courbe par des équations de la forme :

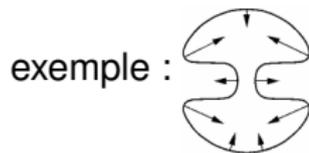
$$(1) \begin{cases} \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t}(t, p) = v(p) \mathbf{n}(p), \\ \mathcal{C}(0, p) = \mathcal{C}_0(p) \end{cases}$$



"Level Set" : lien évolution de \mathcal{C} / évolution de Φ

- on veut faire évoluer une courbe par des équations de la forme :

$$(1) \begin{cases} \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t}(t, p) = v(p) \mathbf{n}(p), \\ \mathcal{C}(0, p) = \mathcal{C}_0(p) \end{cases}$$

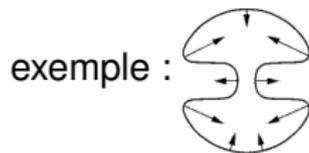


- la courbe $\mathcal{C}(t, p)$ bouge le long de ses normales avec une vitesse v

"Level Set" : lien évolution de \mathcal{C} / évolution de Φ

- on veut faire évoluer une courbe par des équations de la forme :

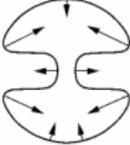
$$(1) \begin{cases} \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t}(t, p) = v(p) \mathbf{n}(p), \\ \mathcal{C}(0, p) = \mathcal{C}_0(p) \end{cases}$$



- la courbe $\mathcal{C}(t, p)$ bouge le long de ses normales avec une vitesse v
- un déplacement le long des tangentes ne change pas la forme de la courbe ("fait glisser" la courbe sur elle-même)

"Level Set" : lien évolution de \mathcal{C} / évolution de Φ

- on veut faire évoluer une courbe par des équations de la forme :

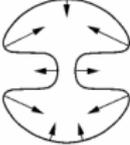
$$(1) \begin{cases} \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t}(t, p) = v(p) \mathbf{n}(p), \\ \mathcal{C}(0, p) = \mathcal{C}_0(p) \end{cases} \quad \text{exemple : } $$

- la courbe $\mathcal{C}(t, p)$ bouge le long de ses normales avec une vitesse v
- un déplacement le long des tangentes ne change pas la forme de la courbe ("fait glisser" la courbe sur elle-même)
- représentation discrète (liste de points) :

$$\underbrace{\mathcal{C}((n+1)\Delta t, p_k)}_{\text{nouvelle position du point } n} \leftarrow \underbrace{\mathcal{C}(n\Delta t, p_k)}_{\text{ancienne position}} + \Delta t \underbrace{v(p_k) \mathbf{n}(p_k)}_{\text{vitesse}}$$

"Level Set" : lien évolution de \mathcal{C} / évolution de Φ

- on veut faire évoluer une courbe par des équations de la forme :

$$(1) \begin{cases} \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t}(t, p) = v(p) \mathbf{n}(p), \\ \mathcal{C}(0, p) = \mathcal{C}_0(p) \end{cases} \quad \text{exemple : } $$

- la courbe $\mathcal{C}(t, p)$ bouge le long de ses normales avec une vitesse v
- un déplacement le long des tangentes ne change pas la forme de la courbe ("fait glisser" la courbe sur elle-même)
- représentation discrète (liste de points) :

$$\underbrace{\mathcal{C}((n+1)\Delta t, p_k)}_{\text{nouvelle position du point } n} \leftarrow \underbrace{\mathcal{C}(n\Delta t, p_k)}_{\text{ancienne position}} + \Delta t \underbrace{v(p_k) \mathbf{n}(p_k)}_{\text{vitesse}}$$

- représentation implicite : si \mathcal{C} vérifie (1), comment se comporte Φ ?



→ ?

"Level Set" : lien évolution de \mathcal{C} / évolution de Φ

équation d'évolution sur \mathcal{C}

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t}(t, p) = v(p) \mathbf{n}(p), \\ \mathcal{C}(0, p) = \mathcal{C}_0(p) \end{cases} \quad (3)$$



équation d'évolution sur Φ

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = v |\nabla \Phi| \\ \Phi(0, x, y) = \Phi_0(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

- condition initiale : $\Phi_0(x, y)$ tel que $\mathcal{C}_0(p) = \{(x, y) | \Phi_0(x, y) = 0\}$. exple : fonction distance signée \mathcal{C}_0

"Level Set" : lien évolution de \mathcal{C} / évolution de Φ

équation d'évolution sur \mathcal{C}

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t}(t, p) = v(p) \mathbf{n}(p), \\ \mathcal{C}(0, p) = \mathcal{C}_0(p) \end{cases} \quad (3)$$



équation d'évolution sur Φ

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = v |\nabla \Phi| \\ \Phi(0, x, y) = \Phi_0(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

- condition initiale : $\Phi_0(x, y)$ tel que $\mathcal{C}_0(p) = \{(x, y) | \Phi_0(x, y) = 0\}$. exple : fonction distance signée \mathcal{C}_0
- Donc on fait évoluer Φ selon (4) et on extrait le niveau zéro **uniquement** pour afficher la courbe

Exemple : mouvement par courbure moyenne

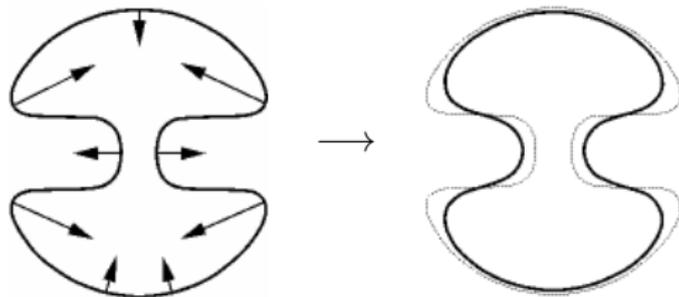
équation d'évolution sur \mathcal{C}

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t}(t, p) = \kappa(p) \mathbf{n}(p), \\ \mathcal{C}(0, p) = \mathcal{C}_0(p) \end{cases}$$

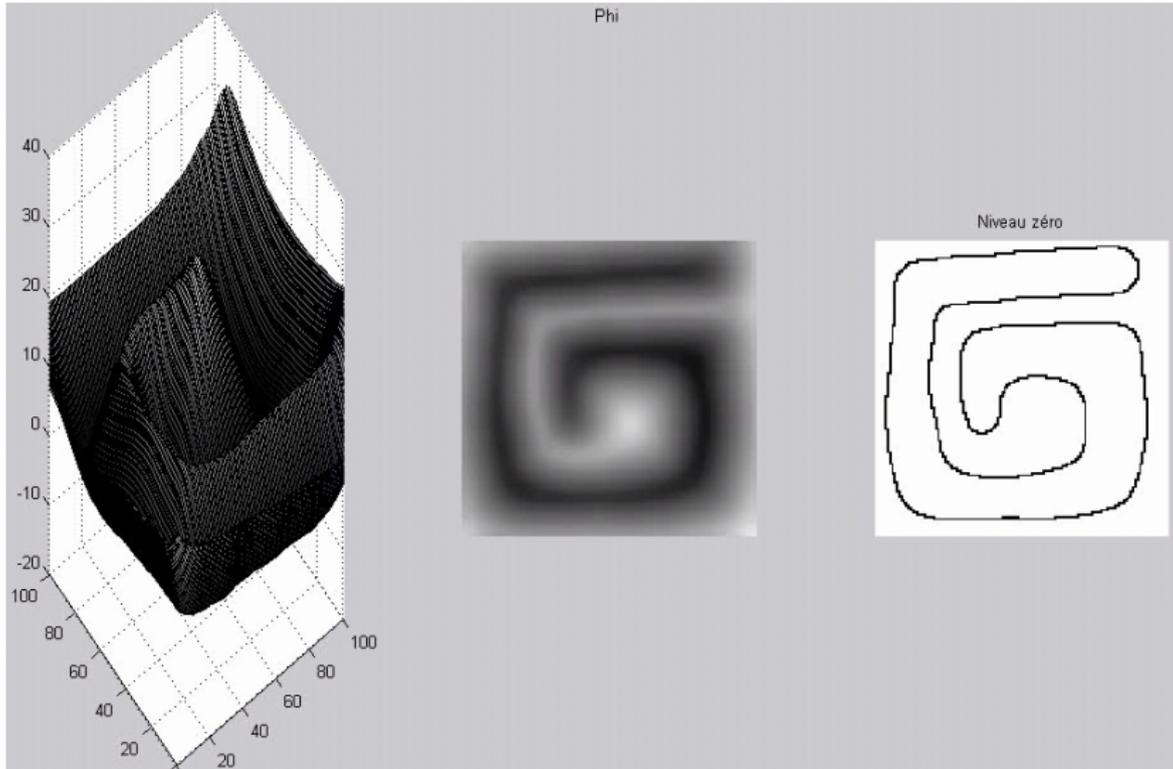


équation d'évolution sur Φ

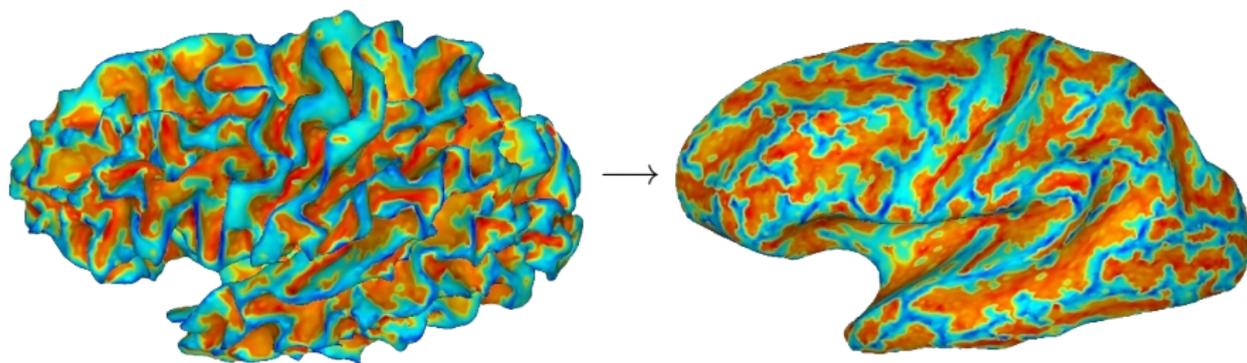
$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \text{div} \left(\frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|} \right) |\nabla \Phi| \\ \Phi(0, x, y) = \Phi_0(x, y) \end{cases}$$



Exemple : mouvement par courbure moyenne



Exemple : mouvement par courbure moyenne



Extraction du niveau zéro

- On n'a besoin d'extraire le niveau zéro de Φ **uniquement** pour afficher la courbe correspondante. Mais comment faire ?

Extraction du niveau zéro

- On n'a besoin d'extraire le niveau zéro de Φ **uniquement** pour afficher la courbe correspondante. Mais comment faire ?
- extraire les pixels auxquels la fonction Φ vaut zéro \rightarrow bonne solution ?

exemple : fonction distance signée à un cercle

$$\phi(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} - r$$

qu'on représente sur une image $n \times n$

Extraction du niveau zéro

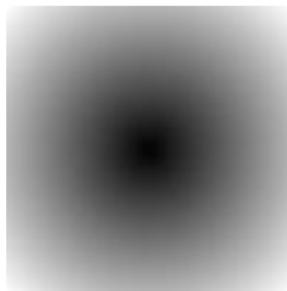
- On n'a besoin d'extraire le niveau zéro de Φ **uniquement** pour afficher la courbe correspondante. Mais comment faire ?
- extraire les pixels auxquels la fonction Φ vaut zéro \rightarrow bonne solution ?

exemple : fonction distance signée à un cercle

$$\phi(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} - r$$

qu'on représente sur une image $n \times n$

\Rightarrow



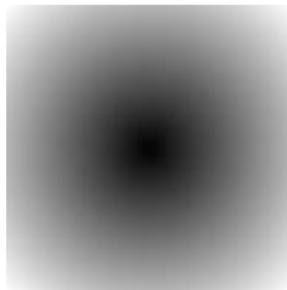
Extraction du niveau zéro

- On n'a besoin d'extraire le niveau zéro de Φ **uniquement** pour afficher la courbe correspondante. Mais comment faire ?
- extraire les pixels auxquels la fonction Φ vaut zéro \rightarrow bonne solution ?

exemple : fonction distance signée à un cercle

$$\phi(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} - r$$

qu'on représente sur une image $n \times n$



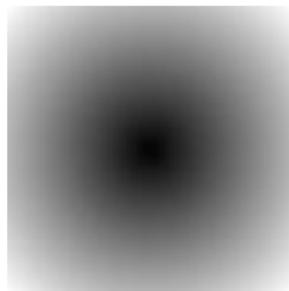
Extraction du niveau zéro

- On n'a besoin d'extraire le niveau zéro de Φ **uniquement** pour afficher la courbe correspondante. Mais comment faire ?
- extraire les pixels auxquels la fonction Φ vaut zéro \rightarrow bonne solution ?

exemple : fonction distance signée à un cercle

$$\phi(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} - r$$

qu'on représente sur une image $n \times n$



- sélectionner $|\Phi| < \epsilon$?

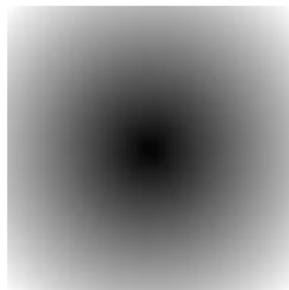
Extraction du niveau zéro

- On n'a besoin d'extraire le niveau zéro de Φ **uniquement** pour afficher la courbe correspondante. Mais comment faire ?
- extraire les pixels auxquels la fonction Φ vaut zéro \rightarrow bonne solution ?

exemple : fonction distance signée à un cercle

$$\phi(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} - r$$

qu'on représente sur une image $n \times n$



- sélectionner $|\Phi| < \epsilon$?

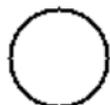
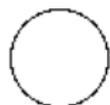
$\epsilon = 0.01$

$\epsilon = 0.03$

$\epsilon = 0.05$

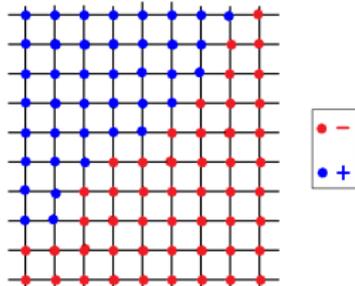
$\epsilon = 0.1$

$\epsilon = 0.2$



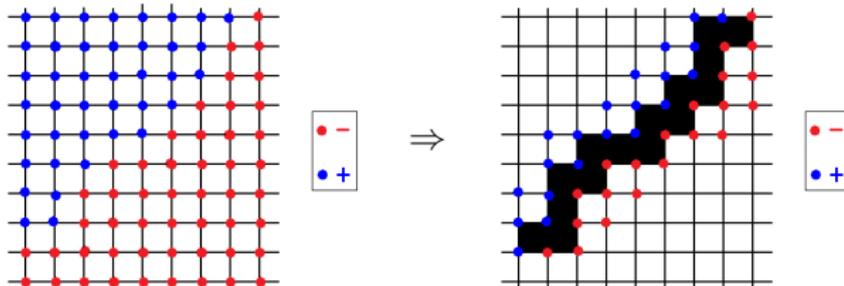
Extraction du niveau zéro

- détection des changements de signe de Φ



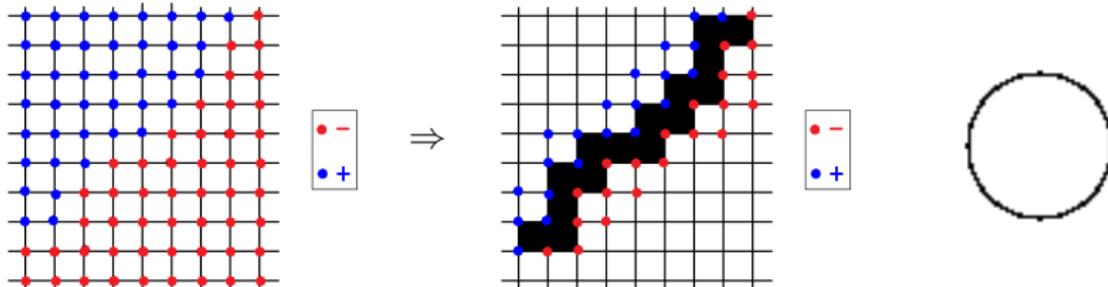
Extraction du niveau zéro

- détection des changements de signe de Φ



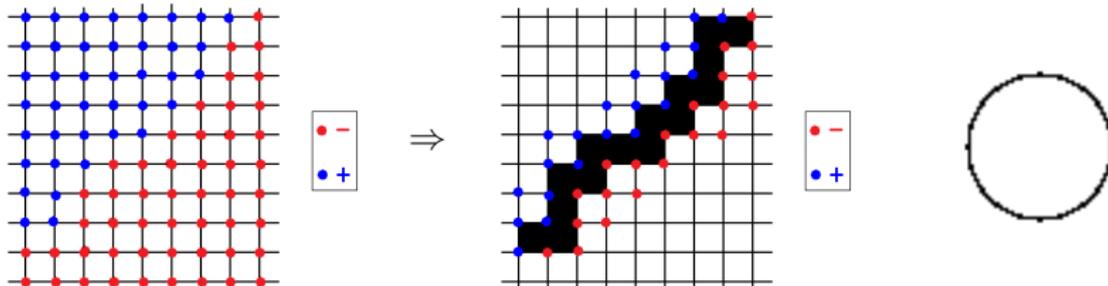
Extraction du niveau zéro

- détection des changements de signe de Φ

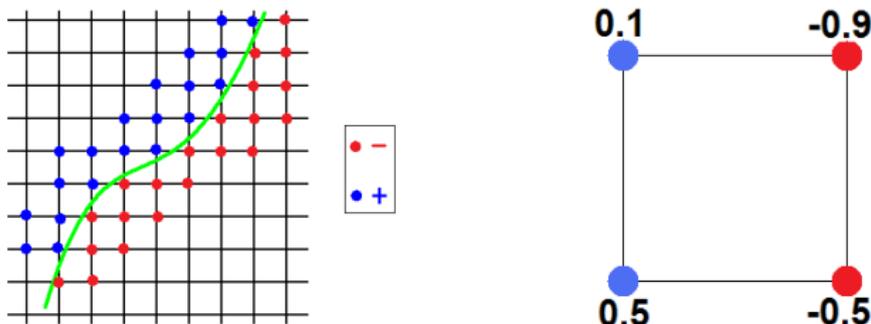


Extraction du niveau zéro

- détecter les changements de signe de Φ

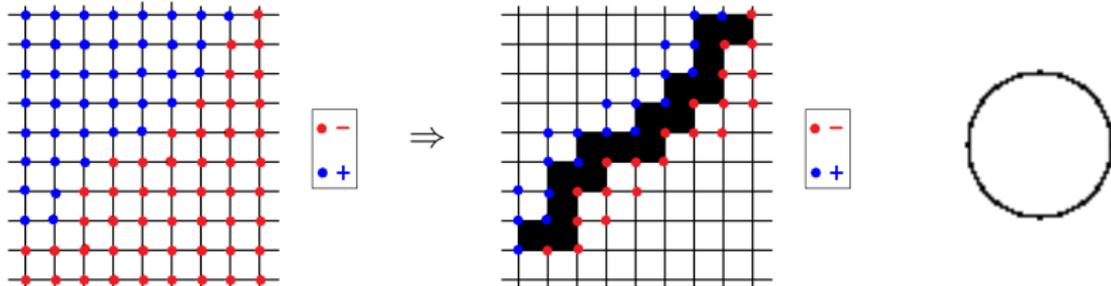


- mieux : interpolation en fonction des valeurs de Φ (fonction distance signée) sur ces pixels

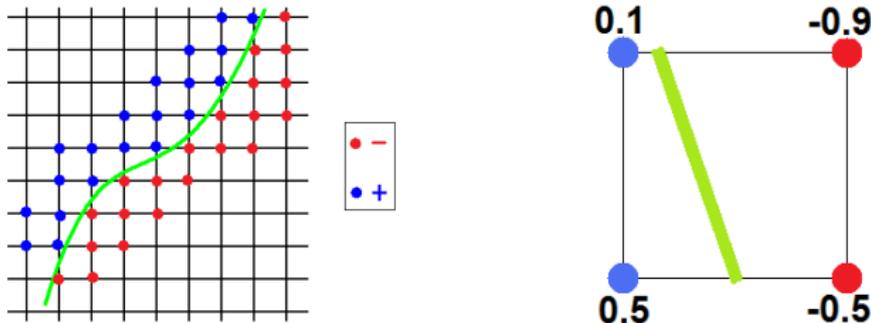


Extraction du niveau zéro

- détection des changements de signe de Φ

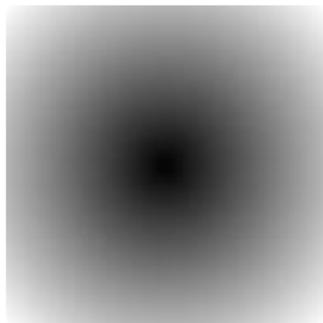


- mieux : interpolation en fonction des valeurs de Φ (fonction distance signée) sur ces pixels

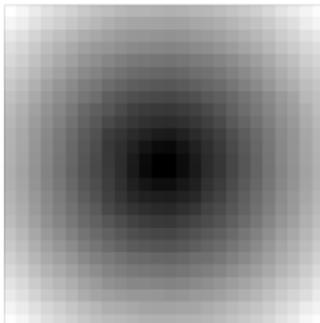


Extraction du niveau zéro

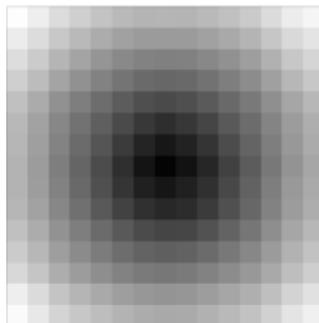
100×100



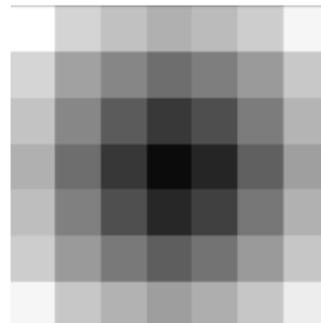
25×25



15×15

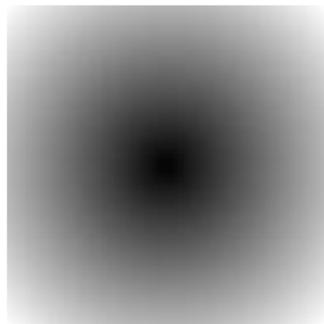


7×7

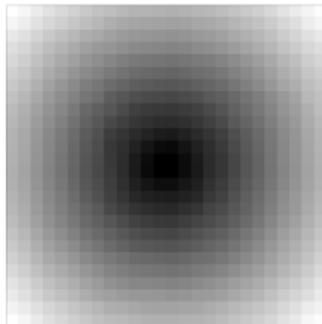


Extraction du niveau zéro

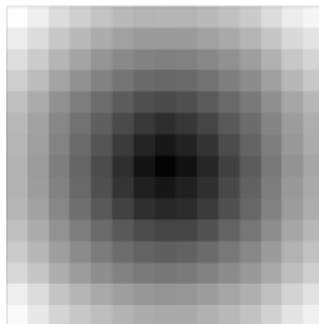
100×100



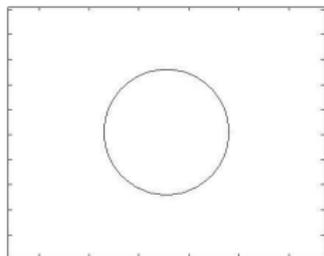
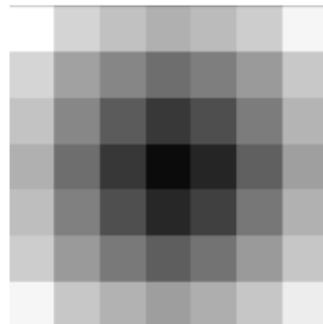
25×25



15×15

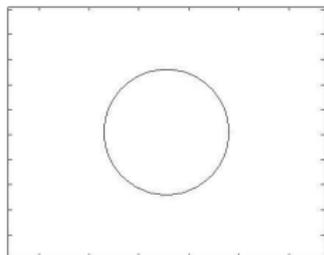
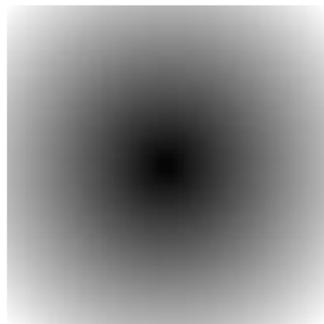


7×7

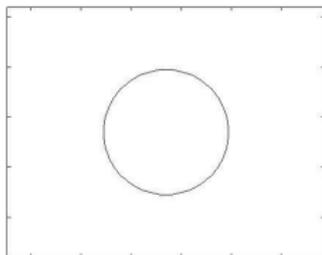
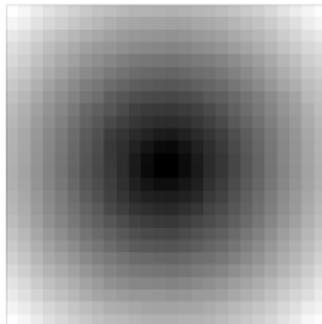


Extraction du niveau zéro

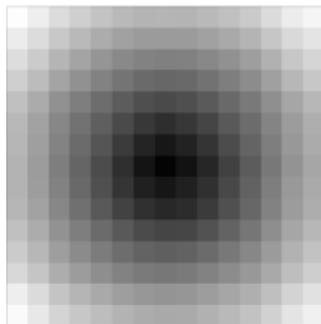
100×100



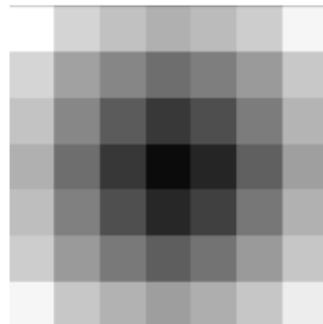
25×25



15×15

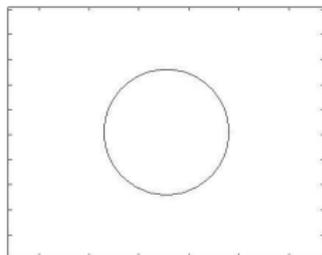
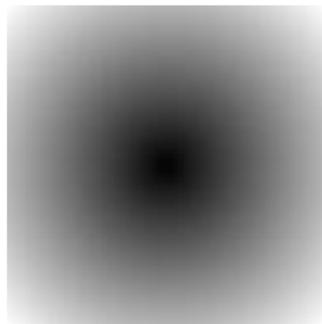


7×7

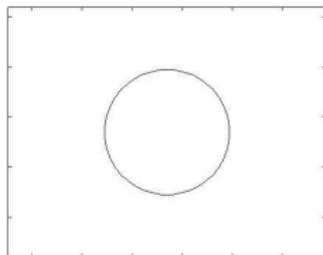
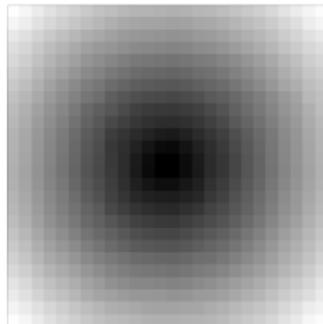


Extraction du niveau zéro

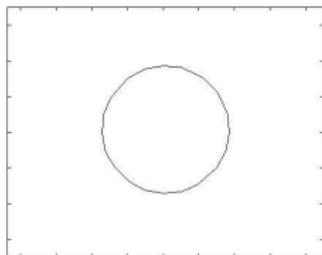
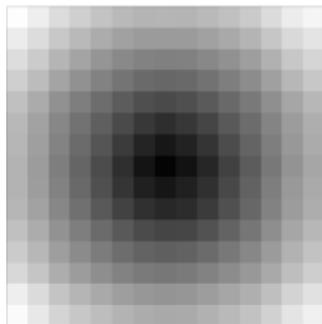
100×100



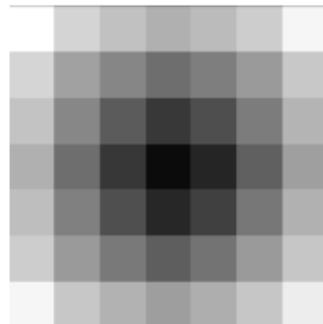
25×25



15×15

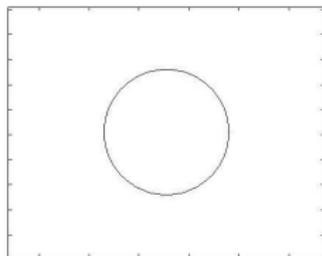
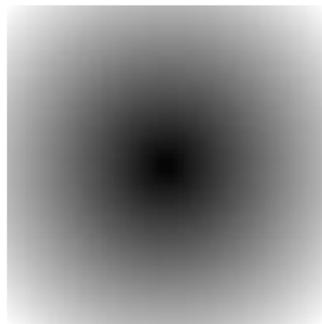


7×7

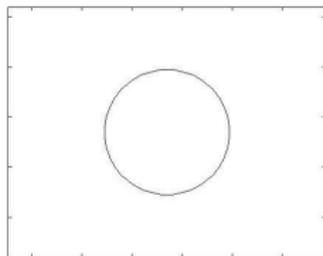
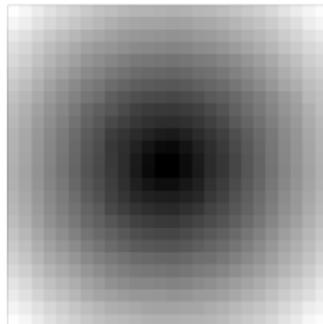


Extraction du niveau zéro

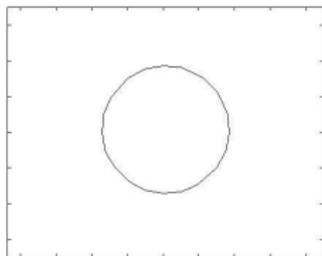
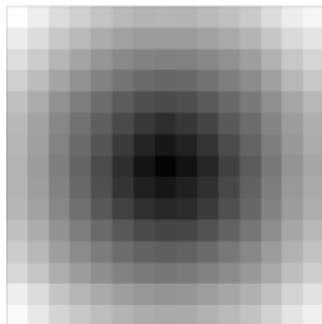
100×100



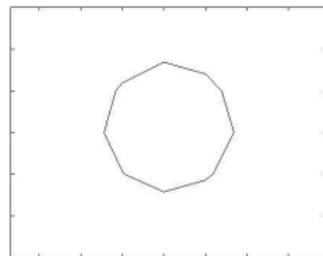
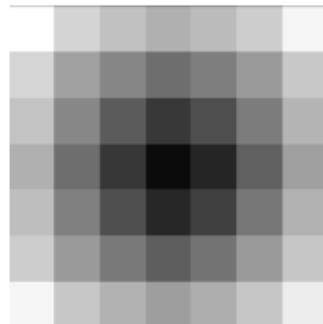
25×25



15×15



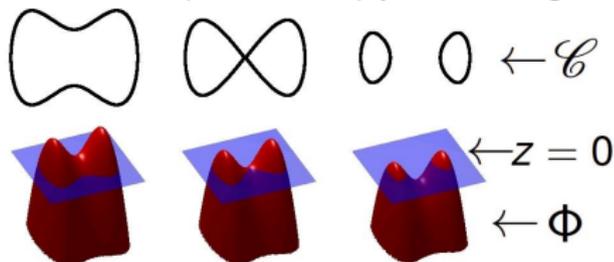
7×7



Intérêt de la représentation implicite

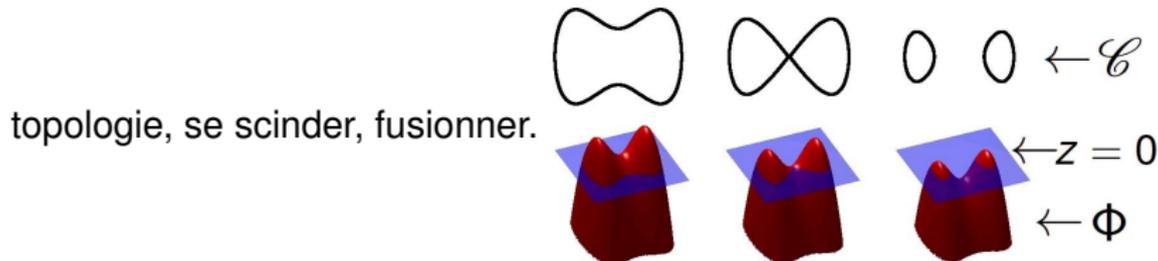
- Φ reste une fonction mais son niveau zéro (et donc \mathcal{C}) peut changer de

topologie, se scinder, fusionner.



Intérêt de la représentation implicite

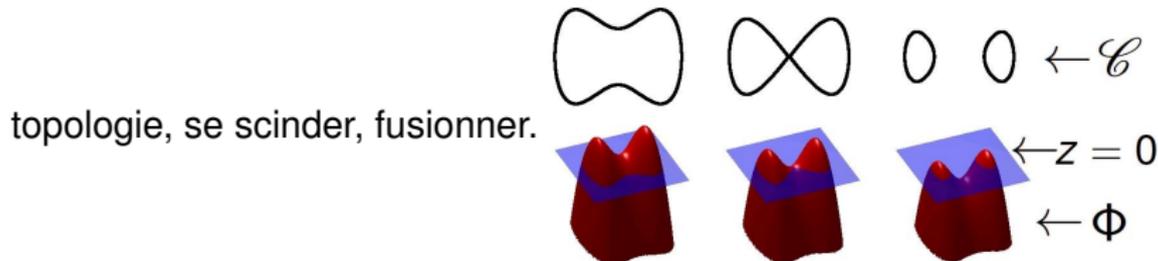
- Φ reste une fonction mais son niveau zéro (et donc \mathcal{C}) peut changer de



- Pas besoin de prendre en compte numériquement ces changements topologiques**

Intérêt de la représentation implicite

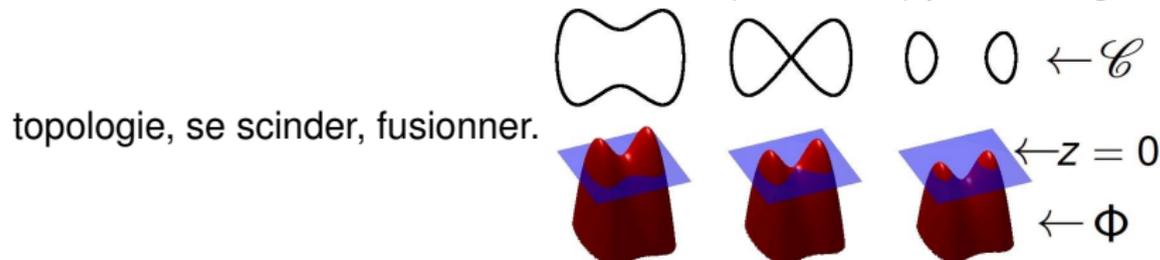
- Φ reste une fonction mais son niveau zéro (et donc \mathcal{C}) peut changer de



- Pas besoin de prendre en compte numériquement ces changements topologiques**
- on utilise une **grille discrète fixée** → schéma aux différences finies

Intérêt de la représentation implicite

- Φ reste une fonction mais son niveau zéro (et donc \mathcal{C}) peut changer de



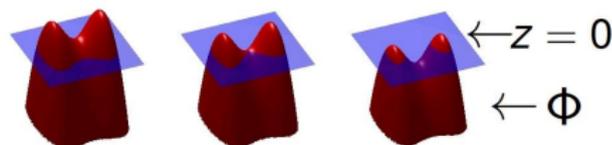
- Pas besoin de prendre en compte numériquement ces changements topologiques**
- on utilise une **grille discrète fixée** → schéma aux différences finies
- des éléments géométriques **intrinsèque** à la courbe \mathcal{C} sont facilement exprimable à partir de Φ : normale $\mathbf{n} = -\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}$, courbure $\kappa = \operatorname{div}\left(\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}\right)$

Intérêt de la représentation implicite

- Φ reste une fonction mais son niveau zéro (et donc \mathcal{C}) peut changer de



topologie, se scinder, fusionner.



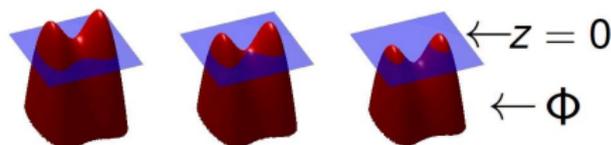
- Pas besoin de prendre en compte numériquement ces changements topologiques**
- on utilise une **grille discrète fixée** \rightarrow schéma aux différences finies
- des éléments géométriques **intrinsèque** à la courbe \mathcal{C} sont facilement exprimable à partir de Φ : normale $\mathbf{n} = -\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}$, courbure $\kappa = \operatorname{div}\left(\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}\right)$
- exple : cercle de rayon r et représenté par sa fonction dist signée, normale, courbure ?

Intérêt de la représentation implicite

- Φ reste une fonction mais son niveau zéro (et donc \mathcal{C}) peut changer de



topologie, se scinder, fusionner.



- Pas besoin de prendre en compte numériquement ces changements topologiques**

- on utilise une **grille discrète fixée** \rightarrow schéma aux différences finies
- des éléments géométriques **intrinsèque** à la courbe \mathcal{C} sont facilement exprimable à partir de Φ : normale $\mathbf{n} = -\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}$, courbure $\kappa = \operatorname{div}\left(\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}\right)$
- exple : cercle de rayon r et représenté par sa fonction dist signée, normale, courbure ?

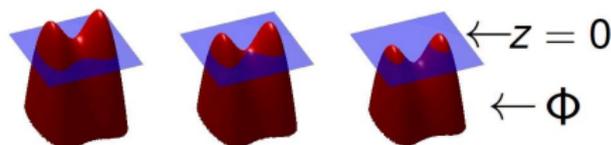
$$\mathbf{n}(x, y) = \frac{-1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Intérêt de la représentation implicite

- Φ reste une fonction mais son niveau zéro (et donc \mathcal{C}) peut changer de



topologie, se scinder, fusionner.



- Pas besoin de prendre en compte numériquement ces changements topologiques**

- on utilise une **grille discrète fixée** → schéma aux différences finies
- des éléments géométriques **intrinsèque** à la courbe \mathcal{C} sont facilement exprimable à partir de Φ : normale $\mathbf{n} = -\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}$, courbure $\kappa = \operatorname{div}\left(\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}\right)$
- exple : cercle de rayon r et représenté par sa fonction dist signée, normale, courbure ?

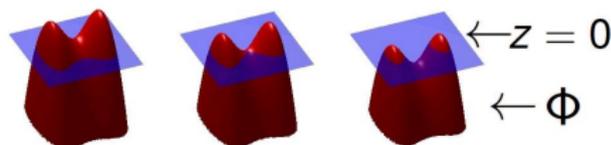
$$\mathbf{n}(x, y) = \frac{-1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad \kappa(x, y) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

Intérêt de la représentation implicite

- Φ reste une fonction mais son niveau zéro (et donc \mathcal{C}) peut changer de



topologie, se scinder, fusionner.



- Pas besoin de prendre en compte numériquement ces changements topologiques**

- on utilise une **grille discrète fixée** \rightarrow schéma aux différences finies
- des éléments géométriques **intrinsèque** à la courbe \mathcal{C} sont facilement exprimable à partir de Φ : normale $\mathbf{n} = -\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}$, courbure $\kappa = \operatorname{div}\left(\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|}\right)$
- exple : cercle de rayon r et représenté par sa fonction dist signée, normale, courbure ?

$$\mathbf{n}(x, y) = \frac{-1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad \kappa(x, y) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

Représentation implicite : discrétisation

- Attention, de la même manière qu'en 1D, problèmes de stabilité possibles.

Représentation implicite : discrétisation

- Attention, de la même manière qu'en 1D, problèmes de stabilité possibles.
- Équation de transport $\frac{\partial v}{\partial t} + c \frac{\partial v}{\partial x} = 0$: si $c > 0$, schéma arrière. si $c < 0$, schéma avant

DEMO MATLAB

Représentation implicite : discrétisation

- Attention, de la même manière qu'en 1D, problèmes de stabilité possibles.

- Équation de transport $\frac{\partial v}{\partial t} + c \frac{\partial v}{\partial x} = 0$: si $c > 0$, schéma arrière. si $c < 0$, schéma avant

DEMO MATLAB

- cas d'un flot constant $v(t, p) = C$, propagation du front. Nécessité d'une discrétisation décentrée pour le calcul du gradient.

Représentation implicite : discrétisation

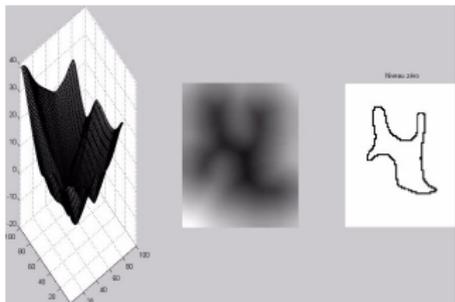
- Attention, de la même manière qu'en 1D, problèmes de stabilité possibles.

- Équation de transport $\frac{\partial v}{\partial t} + c \frac{\partial v}{\partial x} = 0$: si $c > 0$, schéma arrière. si $c < 0$, schéma avant

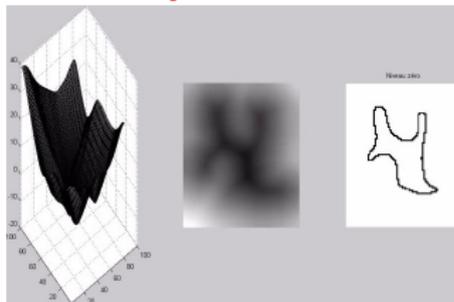
DEMO MATLAB

- cas d'un flot constant $v(t, p) = C$, propagation du front. Nécessité d'une discrétisation décentrée pour le calcul du gradient.

OK



pas OK



Retour à la segmentation

- évolution "Level Set" :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \tilde{g}_{\mathcal{I}} \cdot |\nabla \Phi| \quad \text{où } \tilde{g}_{\mathcal{I}} \text{ l'extension de la fonction de potentiel } g_{\mathcal{I}}$$

Retour à la segmentation

- évolution "Level Set" :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \tilde{g}_{\mathcal{I}} \cdot |\nabla \Phi| \quad \text{où } \tilde{g}_{\mathcal{I}} \text{ l'extension de la fonction de potentiel } g_{\mathcal{I}}$$

- en général : données pas lisses, évolution chaotique (même si on a lissé avant de calculer $g_{\mathcal{I}}$), introduction de la courbure :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \kappa \cdot \tilde{g}_{\mathcal{I}} \cdot |\nabla \Phi|$$

- κ : terme de lissage, ne dépend pas des données $\kappa = \operatorname{div}\left(\frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|}\right)$
- $\tilde{g}_{\mathcal{I}}$: facteur d'arrêt, dépendant des données

Retour à la segmentation

- évolution "Level Set" :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \tilde{g}_{\mathcal{I}} \cdot |\nabla \Phi| \quad \text{où } \tilde{g}_{\mathcal{I}} \text{ l'extension de la fonction de potentiel } g_{\mathcal{I}}$$

- en général : données pas lisses, évolution chaotique (même si on a lissé avant de calculer $g_{\mathcal{I}}$), introduction de la courbure :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \kappa \cdot \tilde{g}_{\mathcal{I}} \cdot |\nabla \Phi|$$

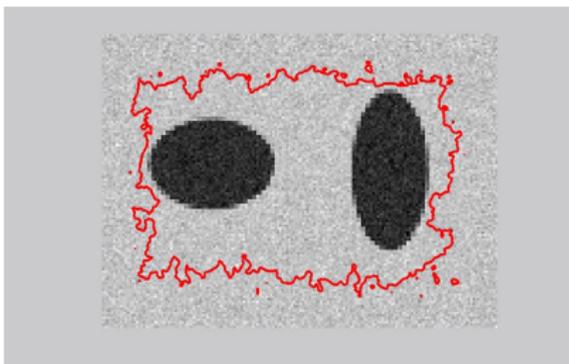
- κ : terme de lissage, ne dépend pas des données $\kappa = \operatorname{div}\left(\frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|}\right)$
 - $\tilde{g}_{\mathcal{I}}$: facteur d'arrêt, dépendant des données
- si on connaît le sens global dans lequel doit se faire l'évolution :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = (\kappa + C) \cdot \tilde{g}_{\mathcal{I}} \cdot |\nabla \Phi|$$

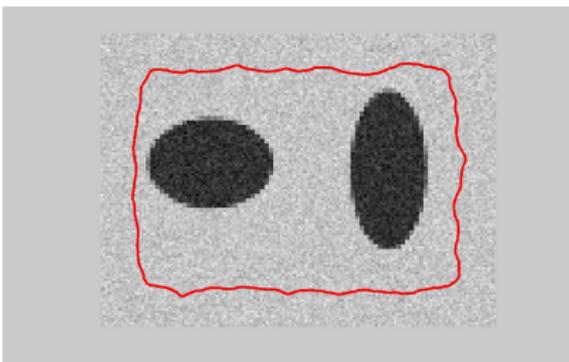
où C est une constante positive (contraction) ou négative (expansion)

Segmentation par contours actifs : exemples

sans κ

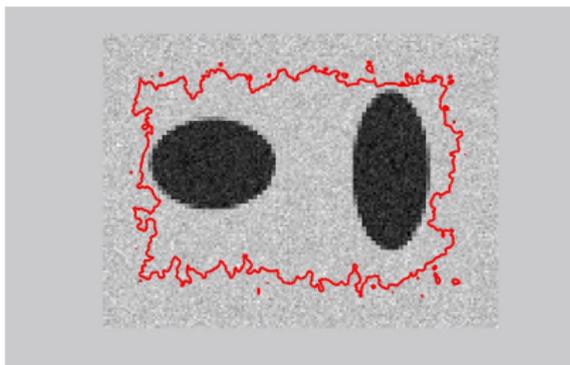


avec κ

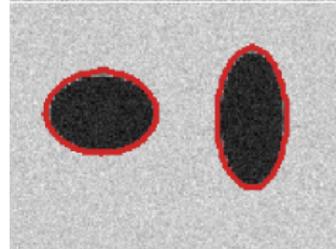
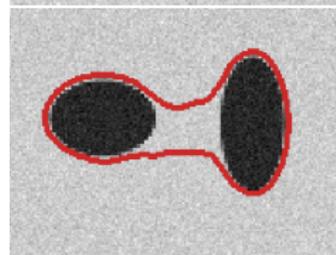
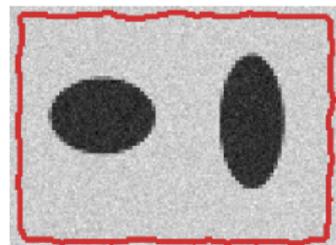
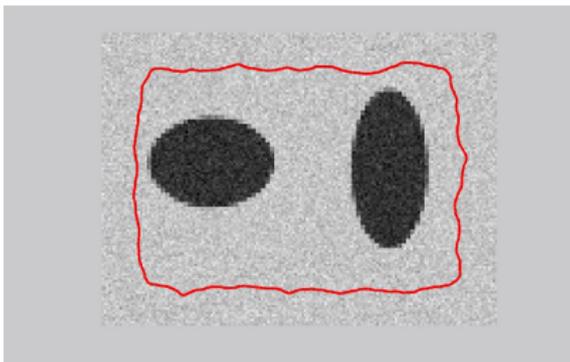


Segmentation par contours actifs : exemples

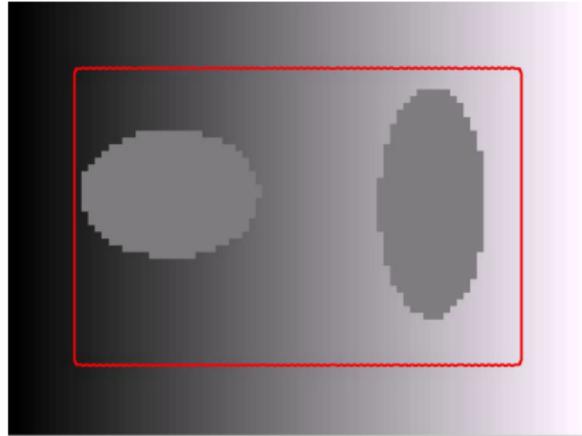
sans κ



avec κ

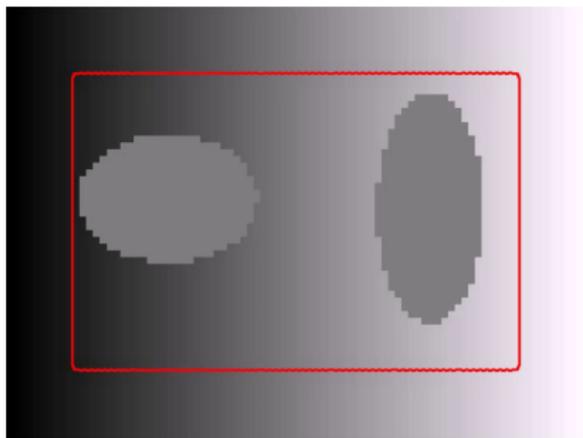


Segmentation par contours actifs : exemples



Seuillage ?

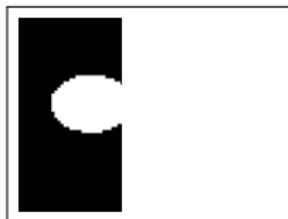
Segmentation par contours actifs : exemples



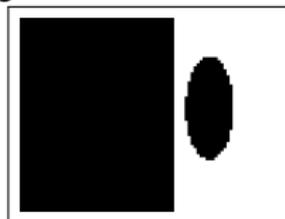
Seuillage ?



$s = 50$



$s = 100$

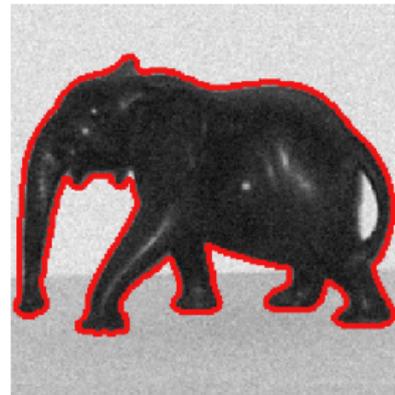
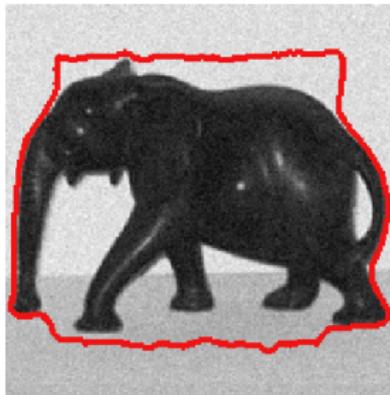
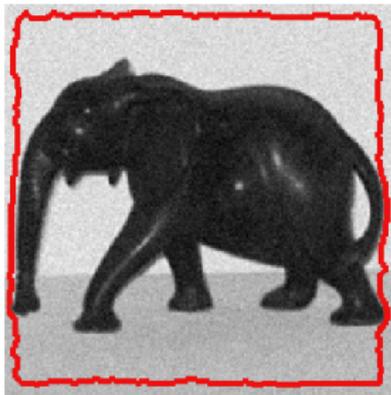


$s = 150$

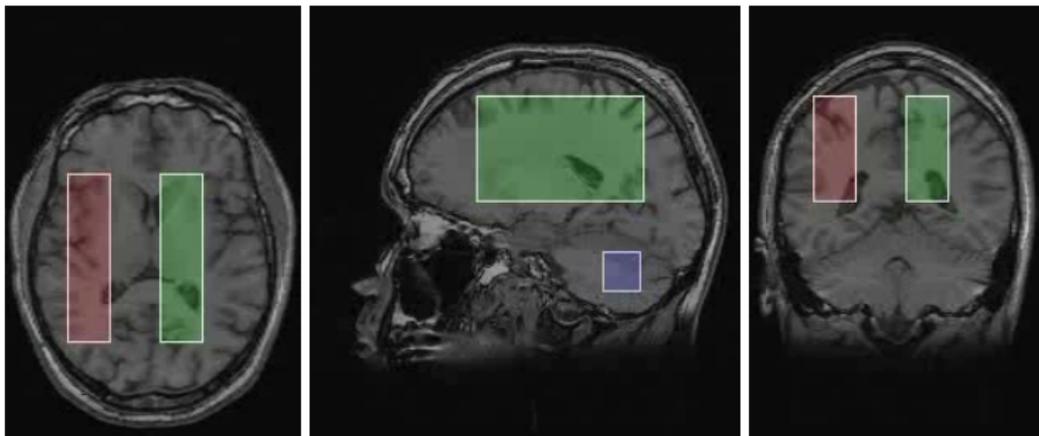


$s = 200$

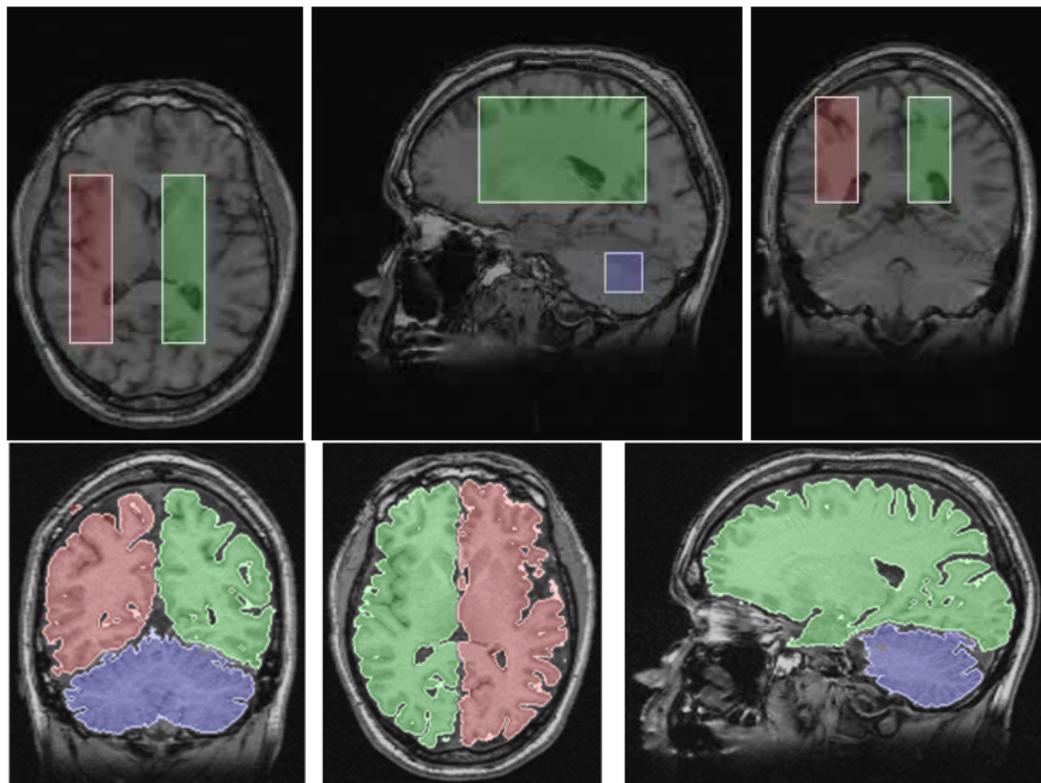
Segmentation par contours actifs : exemples



Segmentation par contours actifs : exemples



Segmentation par contours actifs : exemples



Représentation implicite : récapitulatif

Représentation Implicite

On représente une courbe \mathcal{C} , de manière implicite, par une surface de dimension supérieure Φ dont elle est le **niveau zéro**

$$\mathcal{C} = \left\{ (x, y) \mid \Phi(x, y) = 0 \right\}$$

- une courbe est représentée par une image (2D) $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$
- une surface est représentée par une image volumique (3D) $\Phi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$

EDP sur $\mathcal{C} \leftrightarrow$ EDP sur Φ

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t}(t, p) = v(p) \mathbf{n}(p), \\ \mathcal{C}(0, p) = \mathcal{C}_0(p) \end{cases}$$

\Leftrightarrow

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = v |\nabla \Phi| \\ \Phi(0, x, y) = \Phi_0(x, y) \end{cases}$$

Représentation implicite : récapitulatif

Avantages :

- changements de topologie "gratuits"

Représentation implicite : récapitulatif

Avantages :

- changements de topologie "gratuits"
- discrétisation classique (grille discrète fixée → schéma aux différences finies)

Représentation implicite : récapitulatif

Avantages :

- changements de topologie "gratuits"
- discrétisation classique (grille discrète fixée → schéma aux différences finies)
- des éléments géométriques **intrinsèques** à la courbe \mathcal{C} sont facilement exprimable à partir de Φ

Représentation implicite : récapitulatif

Avantages :

- changements de topologie "gratuits"
- discrétisation classique (grille discrète fixée \rightarrow schéma aux différences finies)
- des éléments géométriques **intrinsèques** à la courbe \mathcal{C} sont facilement exprimable à partir de Φ
- même formulation (par Level Set) pour n'importe quelle **dimension** (courbe, surface) : implémentation aussi simple

Représentation implicite : récapitulatif

Avantages :

- changements de topologie "gratuits"
- discrétisation classique (grille discrète fixée \rightarrow schéma aux différences finies)
- des éléments géométriques **intrinsèques** à la courbe \mathcal{C} sont facilement exprimable à partir de Φ
- même formulation (par Level Set) pour n'importe quelle **dimension** (courbe, surface) : implémentation aussi simple

Inconvénients :

- temps de calculs

Représentation implicite : récapitulatif

Avantages :

- changements de topologie "gratuits"
- discrétisation classique (grille discrète fixée \rightarrow schéma aux différences finies)
- des éléments géométriques **intrinsèques** à la courbe \mathcal{C} sont facilement exprimable à partir de Φ
- même formulation (par Level Set) pour n'importe quelle **dimension** (courbe, surface) : implémentation aussi simple

Inconvénients :

- temps de calculs
- impossible de représenter des courbes, ou surfaces, qui s'auto-intersectent

Représentation implicite : récapitulatif

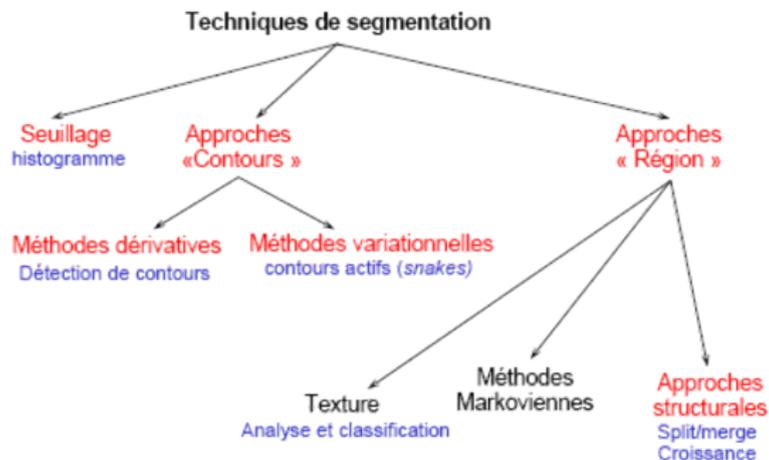
Avantages :

- changements de topologie "gratuits"
- discrétisation classique (grille discrète fixée \rightarrow schéma aux différences finies)
- des éléments géométriques **intrinsèques** à la courbe \mathcal{C} sont facilement exprimable à partir de Φ
- même formulation (par Level Set) pour n'importe quelle **dimension** (courbe, surface) : implémentation aussi simple

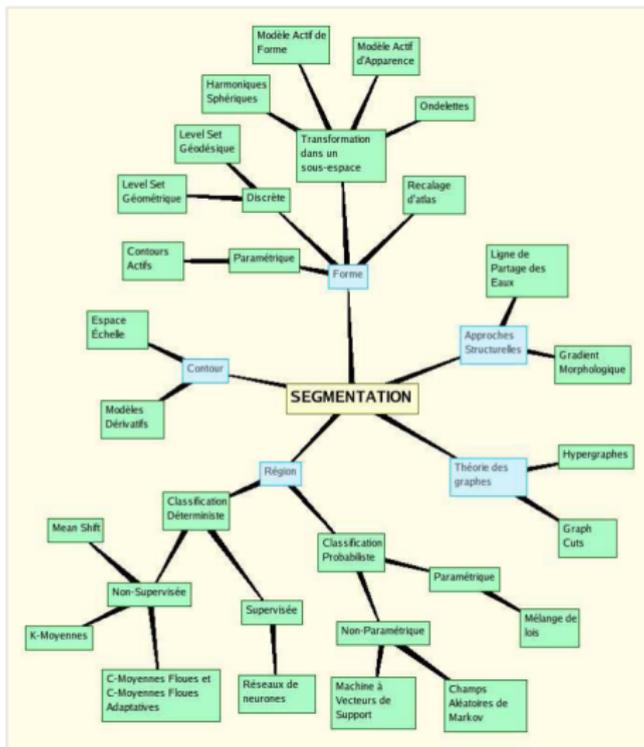
Inconvénients :

- temps de calculs
- impossible de représenter des courbes, ou surfaces, qui s'auto-intersectent
- difficile de représenter des courbes, ou surfaces, ouvertes

Récapitulatif



Récapitulatif (bis)



Imagerie médicale : segmentation basées sur un atlas

Atlas anatomique

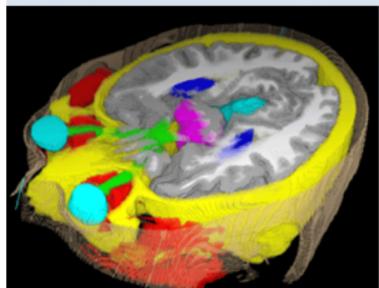
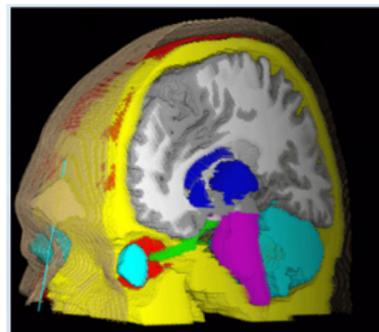
- image d'une anatomie moyenne
- segmentation associée effectuée par un expert

Objectif

- Utilisation de l'atlas pour segmenter une nouvelle image (patient)

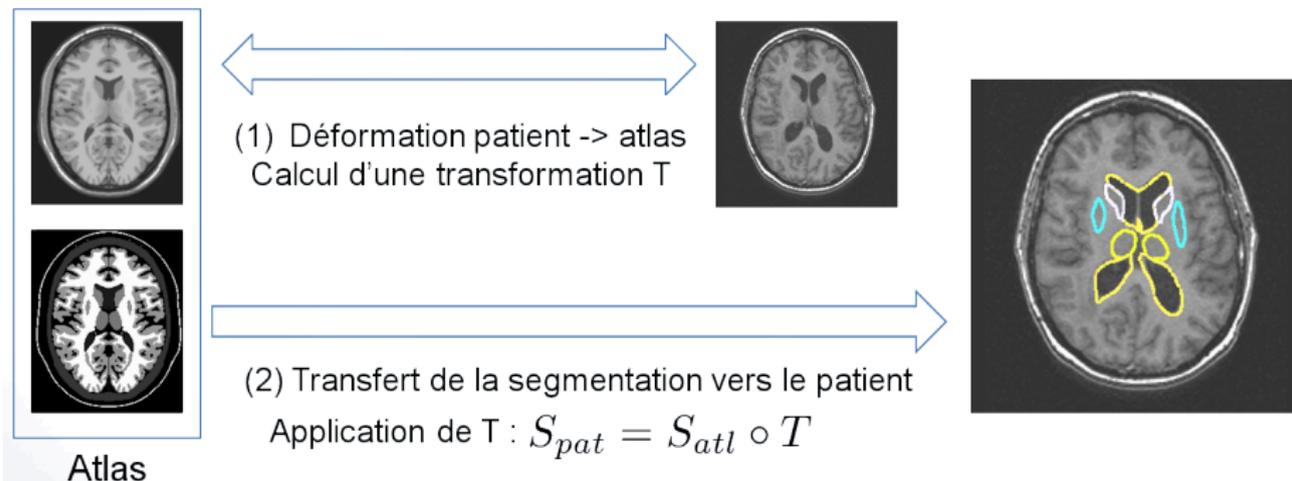
Avantage

- prise en compte d'a priori spécifiques au résultat recherché
- Segmentation de multiples structures en une fois
- possibilité d'estimer des structures peu visible



Segmentation par Atlas : Méthode

- On transforme le problème de segmentation en un problème de **recalage**



On a donc besoin d'être capable de recalibrer une image sur une autre.