

Applications en imagerie cérébrale

yann.leprince@telecom-paristech.org

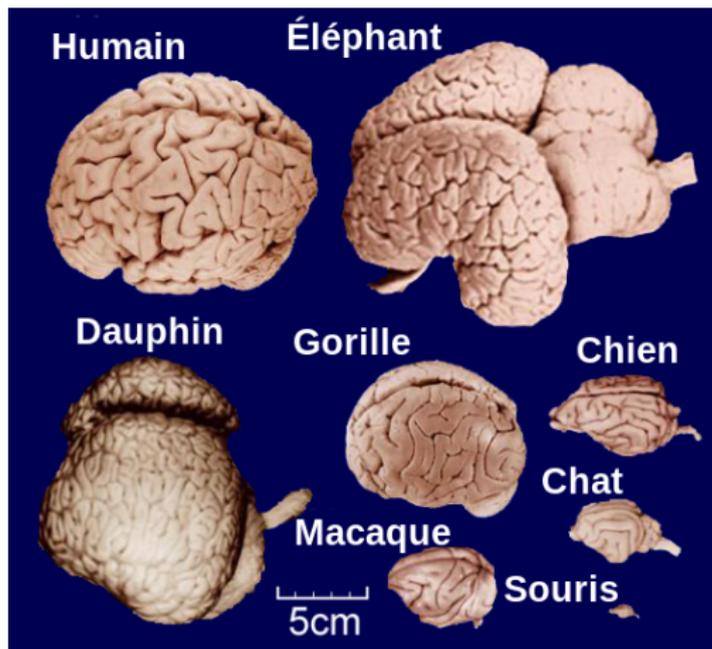
14 octobre 2015

Le cerveau : quelques notions d'anatomie

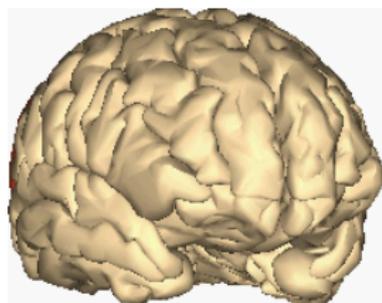
Bref rappel sur l'IRM

Étude d'une chaîne de segmentation du cortex

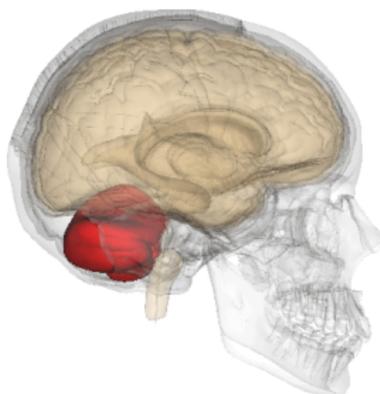
Cerveaux



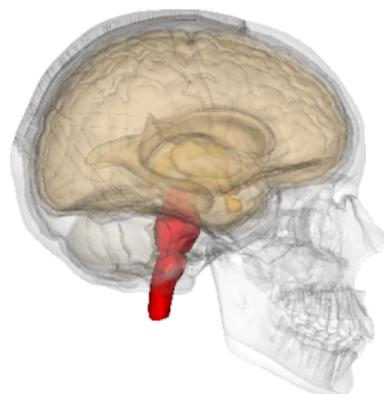
Les grandes divisions du cerveau



Hémisphères
cérébraux



Cervelet

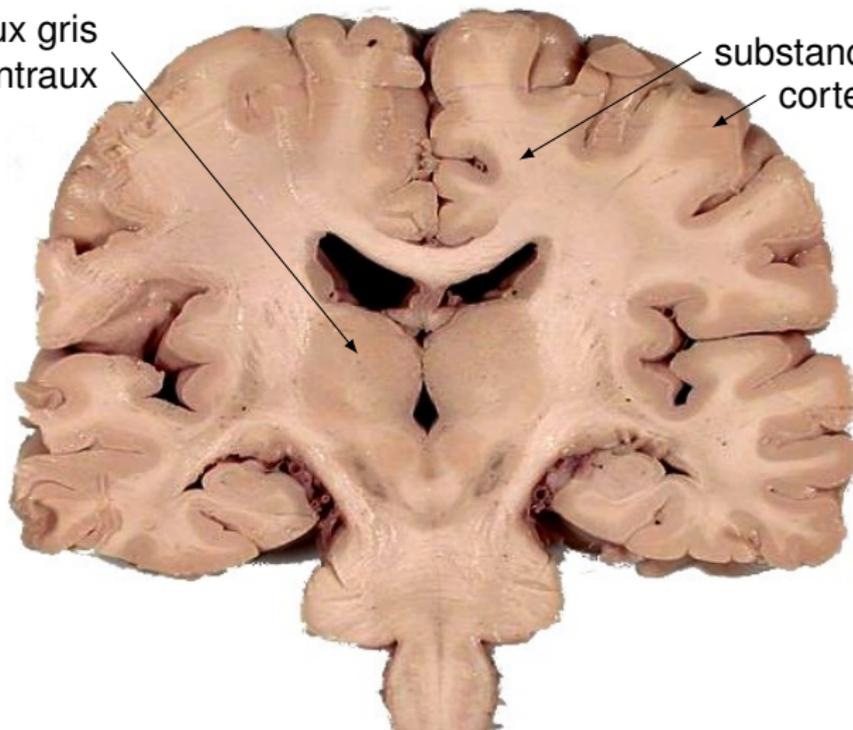


Tronc cérébral

Anatomie générale du cerveau (coupe coronale)

noyaux gris
centraux

substance blanche
cortex



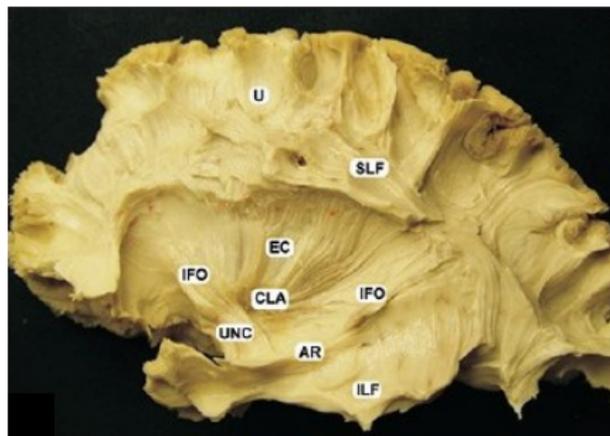
D'après John A.

BEAL, licence CC-BY-2.5, via Wikimedia Commons

Le cerveau baigne dans le liquide cérébro-spinal (LCS).

Substance grise et substance blanche

La substance grise contient les corps neuronaux



La substance blanche contient les axones, qui transportent l'influx nerveux

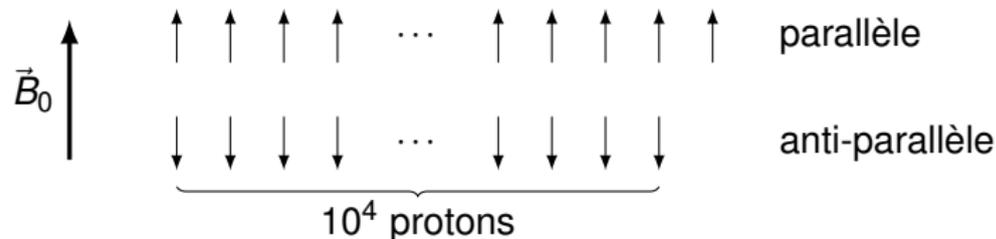
Le cerveau : quelques notions d'anatomie

Bref rappel sur l'IRM

Étude d'une chaîne de segmentation du cortex

Champ statique et aimantation

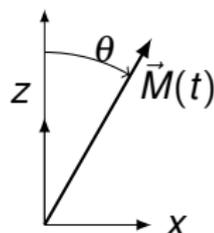
Champ magnétique homogène et uniforme $\vec{B}_0 = B_0 \vec{u}_z$.



Aimantation résultante à l'équilibre $\vec{M}_0 = M_0 \vec{u}_z$.

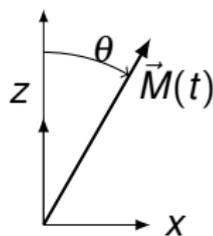
Précession de Larmor

L'aimantation est basculée hors d'équilibre par une impulsion électromagnétique (radiofréquence)

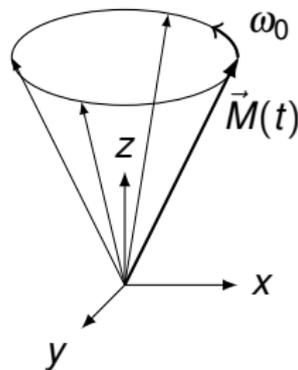


Précession de Larmor

L'aimantation est basculée hors d'équilibre par une impulsion électromagnétique (radiofréquence)

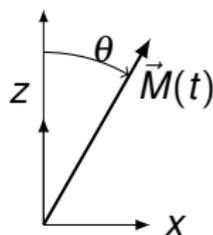


- ▶ Précession à la fréquence de Larmor $\omega_0 = \gamma B_0$

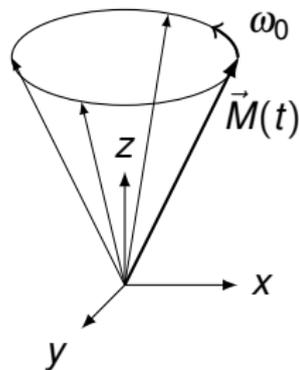


Précession de Larmor

L'aimantation est basculée hors d'équilibre par une impulsion électromagnétique (radiofréquence)



- ▶ Précession à la fréquence de Larmor $\omega_0 = \gamma B_0$



- ▶ Cette aimantation tournante génère elle-même une onde électromagnétique à la fréquence de Larmor ω_0 , qui peut être mesurée : c'est le **signal**.

Séquences et contrastes

Le « jeu » de l'IRM consiste à manipuler l'aimantation du tissu pour obtenir un signal portant une information intéressante. Les possibilités sont très riches :

- ▶ pondérations « classiques » en T_1 , T_2 , T_2^* , densité protonique ;

Séquences et contrastes

Le « jeu » de l'IRM consiste à manipuler l'aimantation du tissu pour obtenir un signal portant une information intéressante. Les possibilités sont très riches :

- ▶ pondérations « classiques » en T_1 , T_2 , T_2^* , densité protonique ;
- ▶ préparation du contraste (FLAIR, saturation de graisse. . .) ;

Séquences et contrastes

Le « jeu » de l'IRM consiste à manipuler l'aimantation du tissu pour obtenir un signal portant une information intéressante. Les possibilités sont très riches :

- ▶ pondérations « classiques » en T_1 , T_2 , T_2^* , densité protonique ;
- ▶ préparation du contraste (FLAIR, saturation de graisse. . .) ;
- ▶ imagerie quantitative (T_1 , T_2 , susceptibilité magnétique. . .) ;

Séquences et contrastes

Le « jeu » de l'IRM consiste à manipuler l'aimantation du tissu pour obtenir un signal portant une information intéressante. Les possibilités sont très riches :

- ▶ pondérations « classiques » en T_1 , T_2 , T_2^* , densité protonique ;
- ▶ préparation du contraste (FLAIR, saturation de graisse. . .) ;
- ▶ imagerie quantitative (T_1 , T_2 , susceptibilité magnétique. . .) ;
- ▶ Imagerie de diffusion ;
- ▶ Imagerie fonctionnelle par effet BOLD ;
- ▶ Angiographie, mesure de flux ;
- ▶ Mesure de perfusion des tissus ;
- ▶ Quantification d'agent de contraste ;
- ▶ Spectroscopie
- ▶ Etc.

L'intensité du champ magnétique

Avantages des champs intenses

- ▶ Rapport signal à bruit : $S \propto B_0^2$, $B \propto B_0$

$$\frac{S}{B} \propto B_0$$

- ▶ Nouveaux contrastes possibles, p. ex. susceptibilité magnétique

L'intensité du champ magnétique

Avantages des champs intenses

- ▶ Rapport signal à bruit : $S \propto B_0^2$, $B \propto B_0$

$$\frac{S}{B} \propto B_0$$

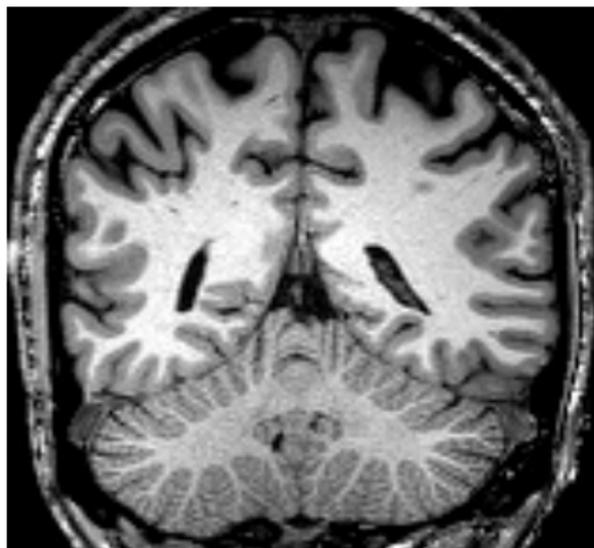
- ▶ Nouveaux contrastes possibles, p. ex. susceptibilité magnétique

Difficultés liées aux champs intenses

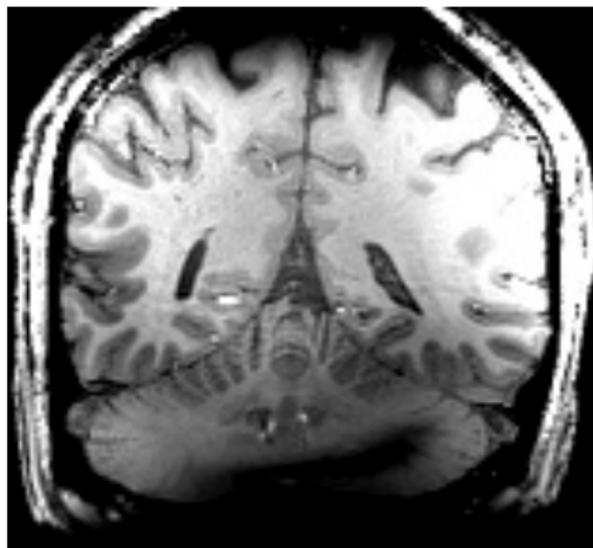
- ▶ Hétérogénéité du champ statique (B_0)
 - ▶ Déformations
 - ▶ Pertes de signal
- ▶ Hétérogénéité du champ radiofréquence (B_1)
 - ▶ Hétérogénéité de signal et de contraste
 - ▶ Déterminée par la longueur d'onde $\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{2\pi c_0}{\gamma B_0}$

Comparaison 3 T vs 7 T

Une même séquence d'acquisition (MPRAGE), pondérée en T_1 :



3 T : $f \approx 128\text{MHz}$, $\lambda \approx 2.3\text{m}$



7 T : $f \approx 300\text{MHz}$, $\lambda \approx 1.0\text{m}$

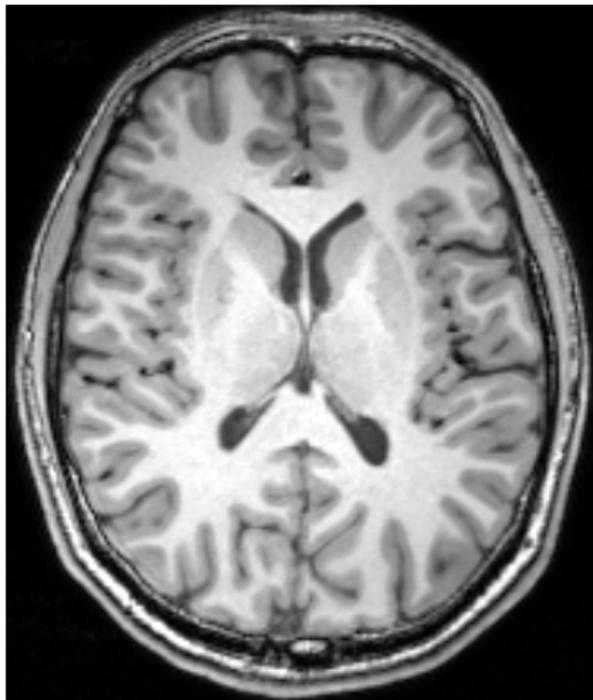


Image pondérée en T_1 à 3 T,
résolution 1 mm isotrope

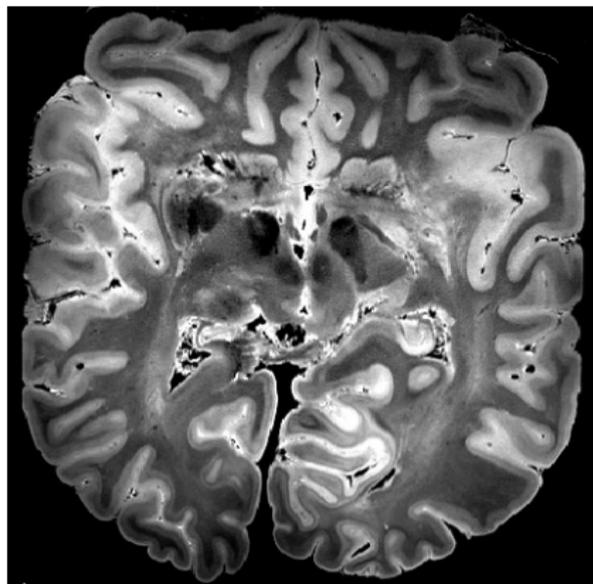


Image pondérée en T_2 à 7 T,
résolution $\approx 300 \mu\text{m}$

Le cerveau : quelques notions d'anatomie

Bref rappel sur l'IRM

Étude d'une chaîne de segmentation du cortex

Segmentation du cortex

À partir d'une image de résolution millimétrique pondérée en T_1 , on veut obtenir :

- ▶ Image comportant trois classes :
 - ▶ Le cortex : substance grise
 - ▶ L'intérieur : substance blanche
 - ▶ L'extérieur : liquide cérébro-spinal (LCS)
- ▶ Garantie topologique
 - ▶ cortex = sphère creuse 6-connexe

Segmentation du cortex

À partir d'une image de résolution millimétrique pondérée en T_1 , on veut obtenir :

- ▶ Image comportant trois classes :
 - ▶ Le cortex : substance grise
 - ▶ L'intérieur : substance blanche
 - ▶ L'extérieur : liquide cérébro-spinal (LCS)
- ▶ Garantie topologique
 - ▶ cortex = sphère creuse 6-connexe

Applications de cette segmentation :

- ▶ Morphométrie : volume, épaisseur corticale, ouverture des sillons. . .
- ▶ Étude de la variabilité anatomique
- ▶ Projection d'autres modalités (diffusion, IRM fonctionnelle. . .)
- ▶ Etc.

La chaîne de traitement Morphologist

- ▶ Distribuée avec le logiciel BrainVISA : brainvisa.info
- ▶ Développée par le CEA (NeuroSpin)
- ▶ Initialement créée par Jean-François Mangin en collaboration avec Télécom ParisTech (ENST)

Principales étapes de Morphologist

1. Correction d'orientation / normalisation
2. Correction de biais
3. Analyse de l'histogramme
4. Extraction du masque du cerveau
5. Séparation des hémisphères
6. Classification gris-blanc
7. Correction topologique
8. Détection des sillons, reconstruction de l'interface externe
9. Maillage des surfaces

Principales étapes de Morphologist

1. Correction d'orientation / normalisation

Deux approches possibles :

- ▶ Sélection manuelle de points caractéristiques
- ▶ Recalage sur un atlas (p. ex. MNI152)

2. Correction de biais

3. Analyse de l'histogramme

4. Extraction du masque du cerveau

5. Séparation des hémisphères

6. Classification gris-blanc

7. Correction topologique

8. Détection des sillons, reconstruction de l'interface externe

9. Maillage des surfaces

Correction de biais

Les images sont affectées d'un biais dû aux imperfections de l'acquisition.

Le biais élargit les pics de l'histogramme

⇒ brouille la séparation des classes

L'image est affectée par un biais multiplicatif variant lentement.

Correction de biais

Les images sont affectées d'un biais dû aux imperfections de l'acquisition.

Le biais élargit les pics de l'histogramme

⇒ brouille la séparation des classes

L'image est affectée par un biais multiplicatif variant lentement.

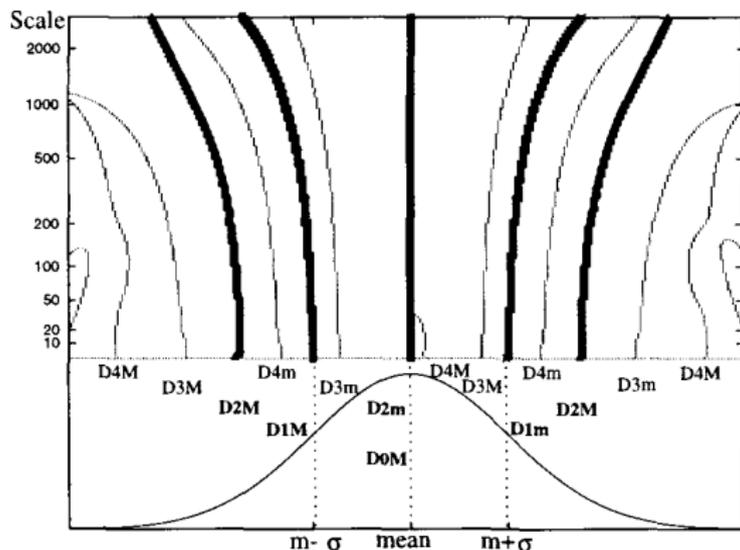
Un champ multiplicatif est optimisé (utilisant un recuit simulé) pour minimiser le critère d'entropie :

$$S = - \sum_i p_i \log p_i$$

Mangin, 2000

Analyse de l'histogramme

Les moyennes et écart-type de la substance grise et blanche sont extraites :
 $\mu_G, \sigma_G, \mu_W, \sigma_W$



Mangin, 1998

Principales étapes de Morphologist

1. Correction d'orientation / normalisation
2. Correction de biais
3. Analyse de l'histogramme
4. Extraction du masque du cerveau
 - ▶ Seuillage
 - ▶ Filtrage morphologique
 - ▶ Détection de la plus grande composante connexe
 - ▶ Reconstruction morphologique
5. Séparation des hémisphères
6. Classification gris-blanc
7. Correction topologique
8. Détection des sillons, reconstruction de l'interface externe
9. Maillage des surfaces

Principales étapes de Morphologist

1. Correction d'orientation / normalisation
2. Correction de biais
3. Analyse de l'histogramme
4. Extraction du masque du cerveau
5. **Séparation des hémisphères**
 - ▶ Érosion du masque \Rightarrow une graine par hémisphère
 - ▶ Reconstruction morphologique
 - ▶ Injection de connaissance a priori : modèle (*template*)
6. Classification gris-blanc
7. Correction topologique
8. Détection des sillons, reconstruction de l'interface externe
9. Maillage des surfaces

Principales étapes de Morphologist

1. Correction d'orientation / normalisation
2. Correction de biais
3. Analyse de l'histogramme
4. Extraction du masque du cerveau
5. Séparation des hémisphères
6. **Classification gris-blanc**
Régularisation markovienne
 - ▶ Attache aux données (cf analyse d'histogramme)
 - ▶ Régularisation par un potentiel de Potts
7. Correction topologique
8. Détection des sillons, reconstruction de l'interface externe
9. Maillage des surfaces

Principales étapes de Morphologist

1. Correction d'orientation / normalisation
2. Correction de biais
3. Analyse de l'histogramme
4. Extraction du masque du cerveau
5. Séparation des hémisphères
6. Classification gris-blanc
7. Correction topologique
 - ▶ Boîte englobante cubique : topologie sphérique
 - ▶ Érosion homotopique jusqu'à coller à l'interface gris-blanc
8. Détection des sillons, reconstruction de l'interface externe
9. Maillage des surfaces

Principales étapes de Morphologist

1. Correction d'orientation / normalisation
2. Correction de biais
3. Analyse de l'histogramme
4. Extraction du masque du cerveau
5. Séparation des hémisphères
6. Classification gris-blanc
7. Correction topologique
8. Détection des sillons, reconstruction de l'interface externe
 - ▶ Sillons : lignes de crête de l'intensité (maxima de la courbure moyenne des isophotes)
 - ▶ Dilatation homotopique de l'interface gris-blanc
9. Maillage des surfaces

Principales étapes de Morphologist

1. Correction d'orientation / normalisation
2. Correction de biais
3. Analyse de l'histogramme
4. Extraction du masque du cerveau
5. Séparation des hémisphères
6. Classification gris-blanc
7. Correction topologique
8. Détection des sillons, reconstruction de l'interface externe
9. Maillage des surfaces
 - ▶ Algorithme analogue au *Fast Marching*