



**HAL**  
open science

# Simulation d'expériences d'angiographie cérébrale par résonance magnétique

Alexandre Fortin

► **To cite this version:**

Alexandre Fortin. Simulation d'expériences d'angiographie cérébrale par résonance magnétique. Doctorat. France. 2017. cel-01522207

**HAL Id: cel-01522207**

**<https://hal.science/cel-01522207>**

Submitted on 17 May 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

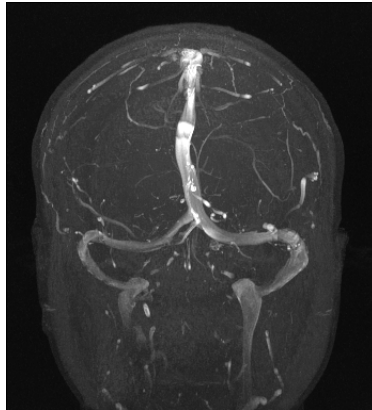
# Simulation d'expériences d'angiographie cérébrale par résonance magnétique

Alexandre FORTIN

Laboratoire de Mathématiques de Reims

10 mai 2017

**Angiographie** : Technique d'imagerie dédiée à la visualisation des vaisseaux sanguins.



**Figure:** Angiographie cérébrale par IRM

## Contexte :

- Première cause de mortalité mondiale : maladies cardiovasculaires (OMS, 2012)
- Parmi celles-ci, les AVC arrivent en seconde position



## Contexte :

- Première cause de mortalité mondiale : maladies cardiovasculaires (OMS, 2012)
- Parmi celles-ci, les AVC arrivent en seconde position

⇒ Développement d'outils numériques pour l'analyse des angiographies

## Contexte :

- Première cause de mortalité mondiale : maladies cardiovasculaires (OMS, 2012)
- Parmi celles-ci, les AVC arrivent en seconde position

⇒ Développement d'outils numériques pour l'analyse des angiographies : **projet VIVABRAIN**



Figure: Le projet VIVABRAIN

## ARM

Equipes médicales

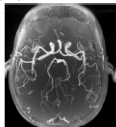
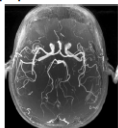


Figure: Le projet VIVABRAIN

**ARM**  
Equipes médicales



**Segmentation**  
Equipes informatiques



**Figure:** Le projet VIVABRAIN

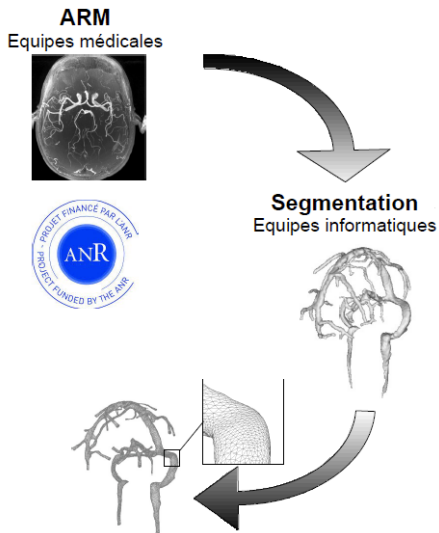


Figure: Le projet VIVABRAIN

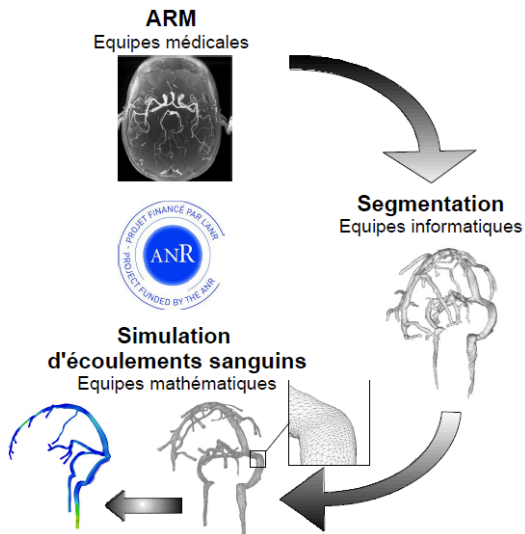


Figure: Le projet VIVABRAIN

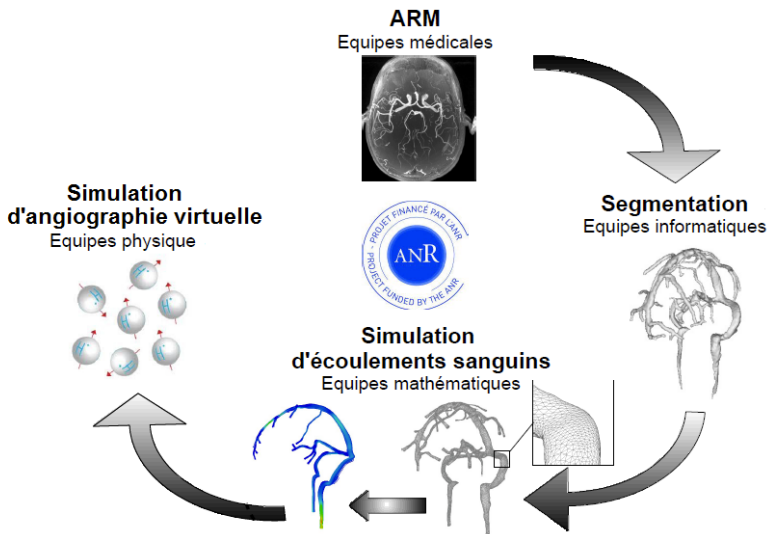


Figure: Le projet VIVABRAIN



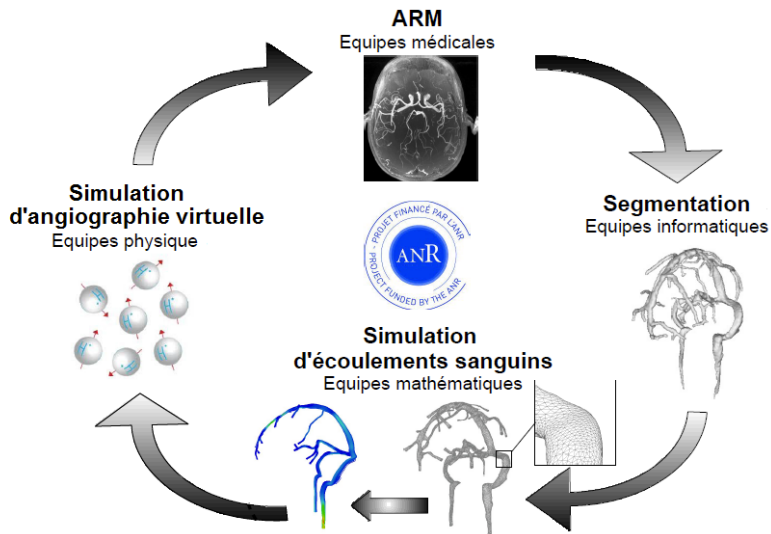


Figure: Le projet VIVABRAIN

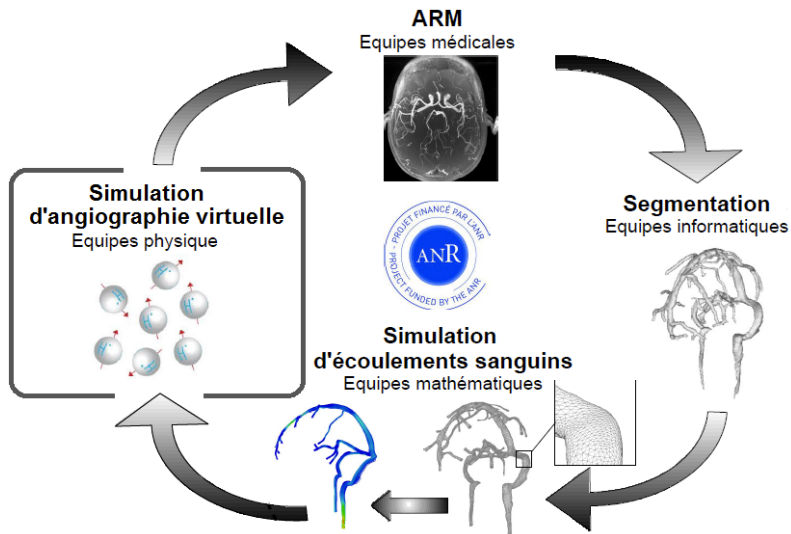


Figure: Le projet VIVABRAIN

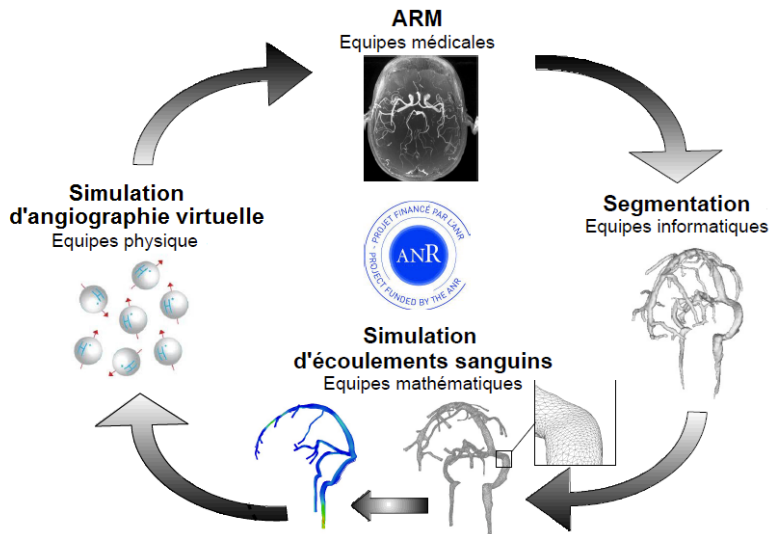


Figure: Le projet VIVABRAIN

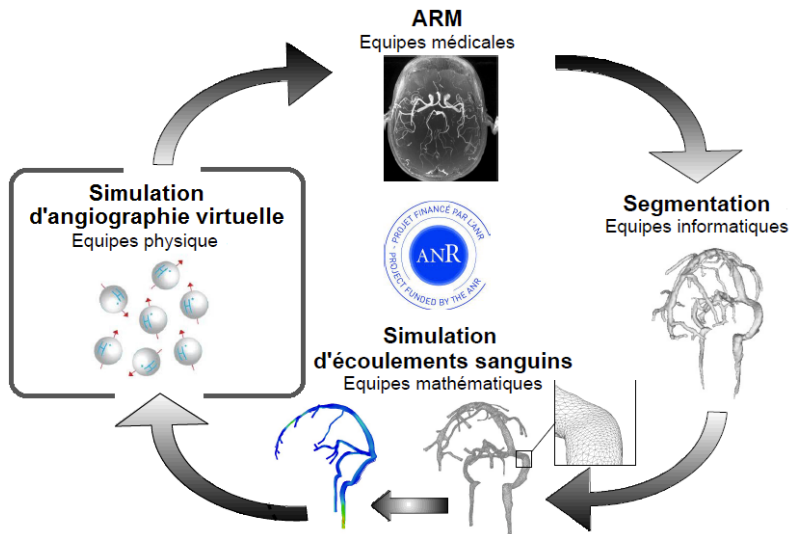


Figure: Le projet VIVABRAIN

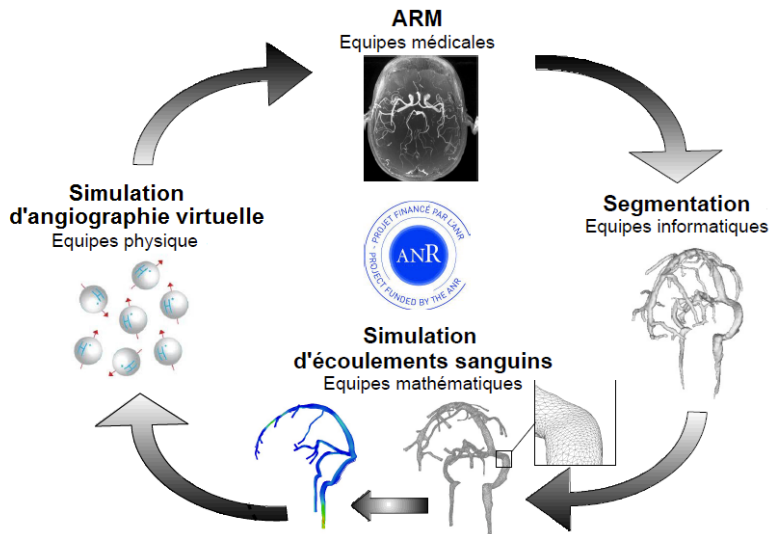


Figure: Le projet VIVABRAIN

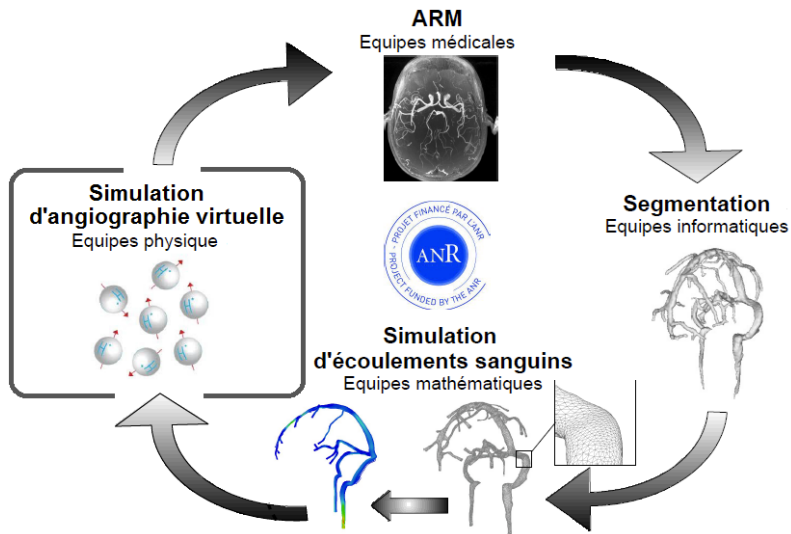


Figure: Le projet VIVABRAIN

# Sommaire

- 1 La simulation IRM
  - Bases physiques de l'IRM
  - Méthode par sommation d'isochromats
  - Simulation des flux
- 2 Développement d'un outil adapté aux flux
  - Implantation logicielle
  - Conditions de simulation
  - Volume de données, temps de calcul
- 3 Résultats de simulation
  - Validation sur des cas simples
  - Applications VIVABRAIN

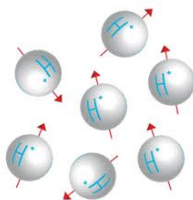
# Sommaire

- 1 La simulation IRM
  - Bases physiques de l'IRM
  - Méthode par sommation d'isochromats
  - Simulation des flux
- 2 Développement d'un outil adapté aux flux
  - Implantation logicielle
  - Conditions de simulation
  - Volume de données, temps de calcul
- 3 Résultats de simulation
  - Validation sur des cas simples
  - Applications VIVABRAIN



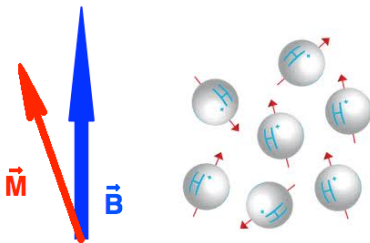
## Base de l'IRM :

- Le *spin* des noyaux d'hydrogène confère aux tissus vivants des propriétés magnétiques.



## Base de l'IRM :

- Le *spin* des noyaux d'hydrogène confère aux tissus vivants des propriétés magnétiques.
- Apparition d'une *aimantation macroscopique*  $\vec{M}$  en présence d'un champ magnétique extérieur  $\vec{B}$ .



## Base de l'IRM :

- Le *spin* des noyaux d'hydrogène confère aux tissus vivants des propriétés magnétiques.
- Apparition d'une *aimantation macroscopique*  $\vec{M}$  en présence d'un champ magnétique extérieur  $\vec{B}$ .

### Equations de Bloch (référentiel du laboratoire)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} - R(\vec{M} - \vec{M}_0) \quad (1)$$

\*  $\gamma$  : rapport gyromagnétique de l'Hydrogène

\*  $\vec{M}_0$  : aimantation à l'équilibre

\*  $R$  : matrice de relaxation ( $R_{11} = R_{22} = 1/T_2$  et  $R_{33} = 1/T_1$ )

## Equations de Bloch (référentiel du laboratoire)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} - R(\vec{M} - \vec{M}_0) \quad (1)$$

- \*  $\gamma$  : rapport gyromagnétique de l'Hydrogène
- \*  $\vec{M}_0$  : aimantation à l'équilibre
- \*  $R$  : matrice de relaxation ( $R_{11} = R_{22} = 1/T_2$  et  $R_{33} = 1/T_1$ )

## Equations de Bloch (référentiel du laboratoire)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} - R(\vec{M} - \vec{M}_0) \quad (1)$$

- \*  $\gamma$  : rapport gyromagnétique de l'Hydrogène
- \*  $\vec{M}_0$  : aimantation à l'équilibre
- \*  $R$  : matrice de relaxation ( $R_{11} = R_{22} = 1/T_2$  et  $R_{33} = 1/T_1$ )

## Base de l'IRM :

- Séquence IRM : Modifications locales du champ magnétique.
  - Impulsions RF :  $B_{xy} = B_1 \cos(\omega_{rf} t + \varphi)$
  - Gradients :  $B_z = B_0 + \vec{G}(t) \cdot \vec{r}$

## Equations de Bloch (référentiel du laboratoire)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} - R(\vec{M} - \vec{M}_0) \quad (1)$$

- \*  $\gamma$  : rapport gyromagnétique de l'Hydrogène
- \*  $\vec{M}_0$  : aimantation à l'équilibre
- \*  $R$  : matrice de relaxation ( $R_{11} = R_{22} = 1/T_2$  et  $R_{33} = 1/T_1$ )

## Base de l'IRM :

- Séquence IRM : Modifications locales du champ magnétique.
  - Impulsions RF :  $B_{xy} = B_1 \cos(\omega_{rf} t + \varphi)$
  - Gradients :  $B_z = B_0 + \vec{G}(t) \cdot \vec{r}$

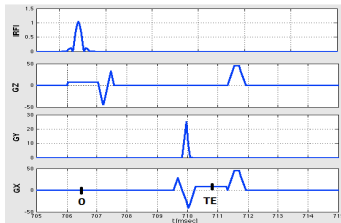




Figure: Simulation par sommation d'isochromats



## 1) Découpage de l'échantillon en sous-volumes élémentaires.

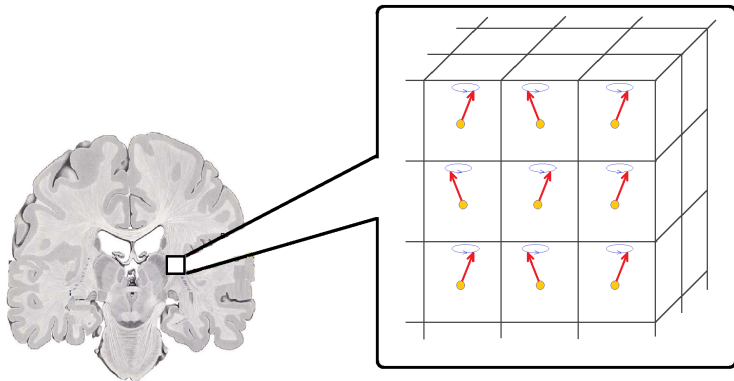


Figure: Simulation par sommation d'isochromats

# 1) Découpage de l'échantillon en sous-volumes élémentaires.

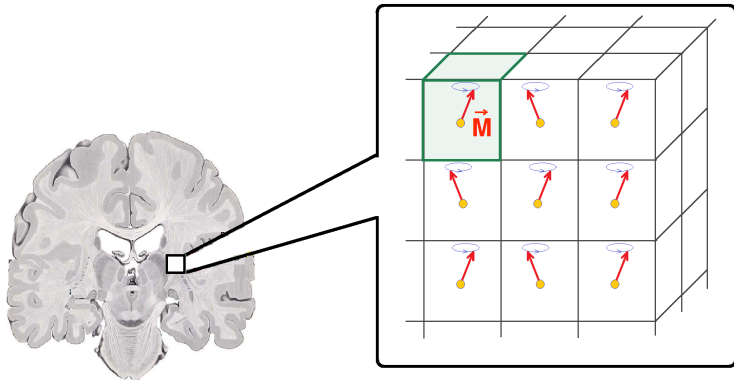


Figure: Simulation par sommation d'isochromats

## 2) Résolution des équations de Bloch pour chaque isochromat.

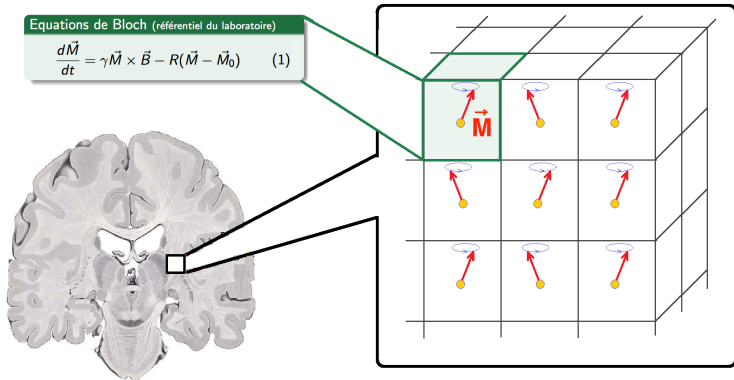


Figure: Simulation par sommation d'isochromats

### 3) Sommation du signal sur l'ensemble de l'échantillon.

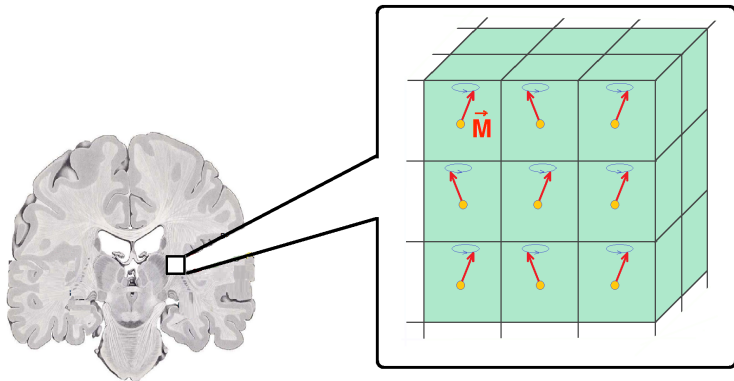


Figure: Simulation par sommation d'isochromats

#### 4) Reconstruction de l'image par transformée de Fourier inverse 2D.

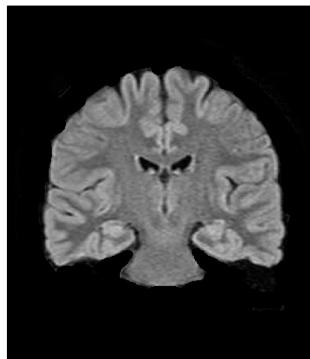


Figure: Simulation par sommation d'isochromats

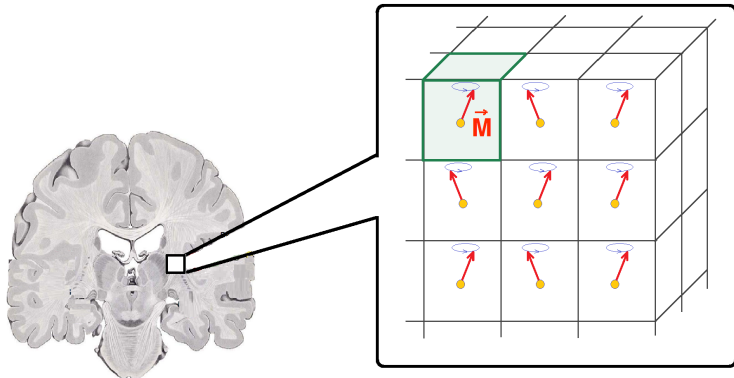
## Description des flux sanguins



## Description des flux sanguins : approche lagrangienne

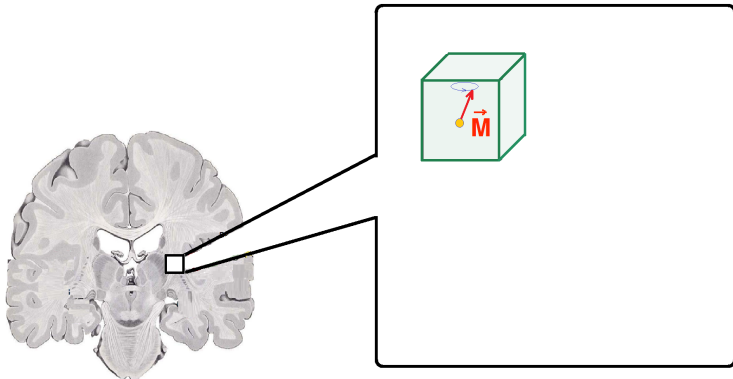


## Description des flux sanguins : approche lagrangienne

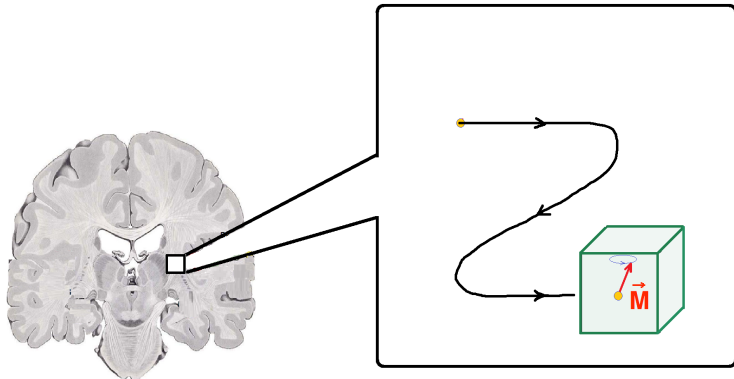




## Description des flux sanguins : approche lagrangienne



## Description des flux sanguins : approche lagrangienne



## Description des flux sanguins : approche lagrangienne

### Equations de Bloch (référentiel du laboratoire)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} - R(\vec{M} - \vec{M}_0)$$

## Description des flux sanguins : approche lagrangienne

### Equations de Bloch (référentiel du laboratoire)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} - R(\vec{M} - \vec{M}_0)$$

$$B_z(\vec{r}, t) = B_0 + \vec{G}(t) \cdot \vec{r}$$

## Description des flux sanguins : approche lagrangienne

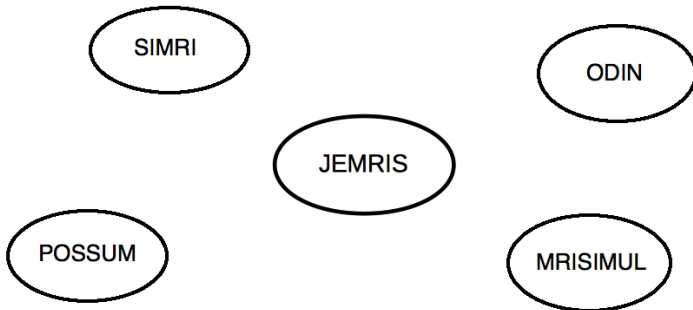
### Equations de Bloch (référentiel du laboratoire)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} - R(\vec{M} - \vec{M}_0)$$

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \quad \Rightarrow \quad B_z(\vec{r}, t) = B_0 + \vec{G}(t) \cdot \vec{r}(t)$$

# Sommaire

- 1 La simulation IRM
  - Bases physiques de l'IRM
  - Méthode par sommation d'isochromats
  - Simulation des flux
- 2 Développement d'un outil adapté aux flux
  - Implantation logicielle
  - Conditions de simulation
  - Volume de données, temps de calcul
- 3 Résultats de simulation
  - Validation sur des cas simples
  - Applications VIVABRAIN







Logiciel	Résol. Bloch	Langage	<i>Off-resonance</i>	Mouvements	Diffusion
SIMRI	Analytique	C	Oui	Non	Non
ODIN	Analytique	C++	Oui	Non	Oui
POSSUM	Analytique	C++	Oui	Oui	Oui
MRISIMUL	Analytique	CUDA-C	Oui	Oui	Non
JEMRIS	Numérique	C++	Oui	Oui	Oui

Table: Caractéristiques des principaux simulateurs IRM.

Open-source



Open-source

Code C++ extensible (24 000 lignes)

The logo for JEMRIS, consisting of the word "JEMRIS" in a bold, sans-serif font, centered within a black oval border.

JEMRIS

Open-source

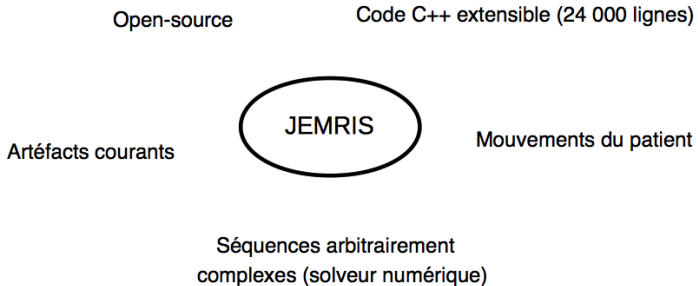
Code C++ extensible (24 000 lignes)

Artéfacts courants

The logo for JEMRIS is the word "JEMRIS" in a bold, black, sans-serif font, centered within a black oval border.

JEMRIS





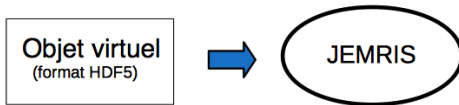


Figure: Schéma général d'une simulation sous JEMRIS

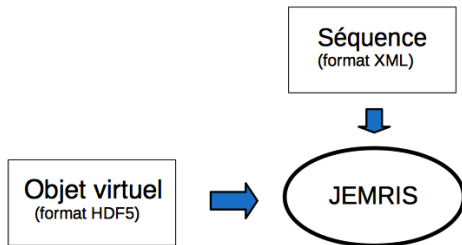


Figure: Schéma général d'une simulation sous JEMRIS



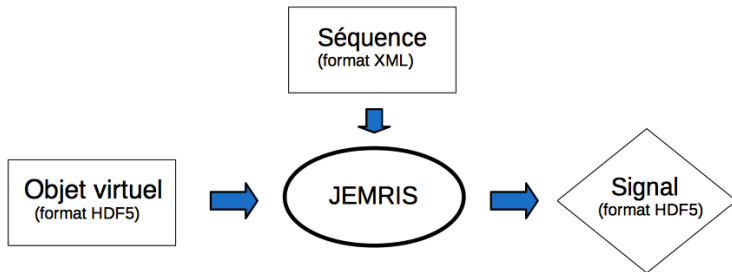


Figure: Schéma général d'une simulation sous JEMRIS

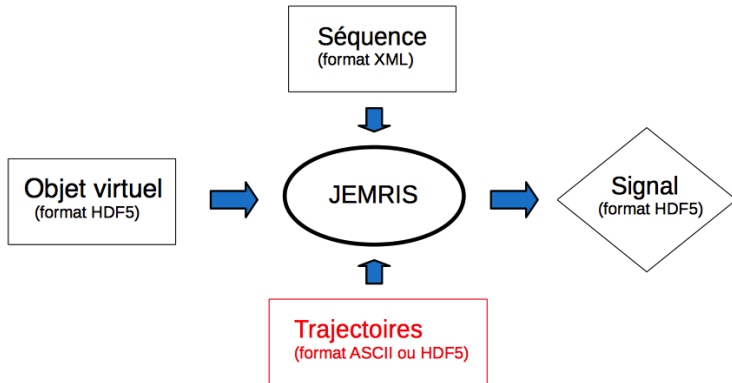


Figure: Schéma général d'une simulation sous JEMRIS

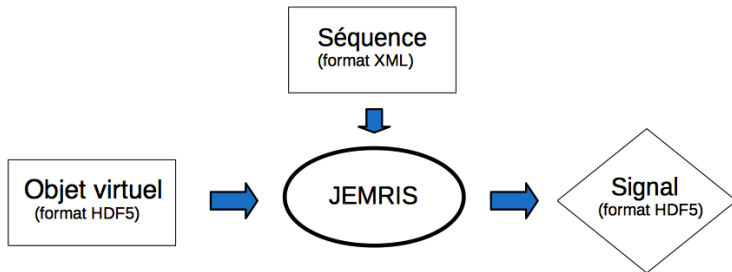


Figure: Schéma général d'une simulation sous JEMRIS

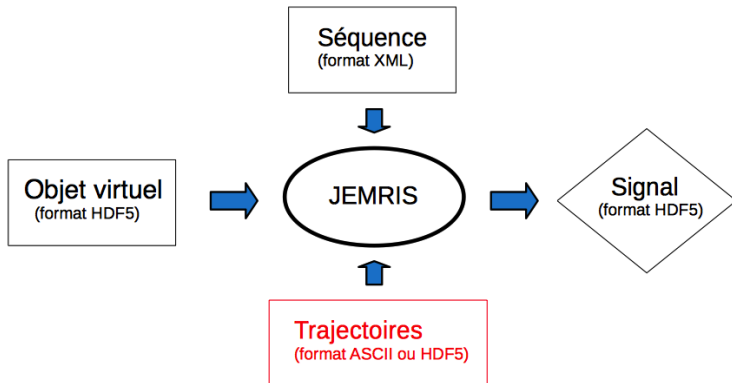


Figure: Schéma général d'une simulation sous JEMRIS

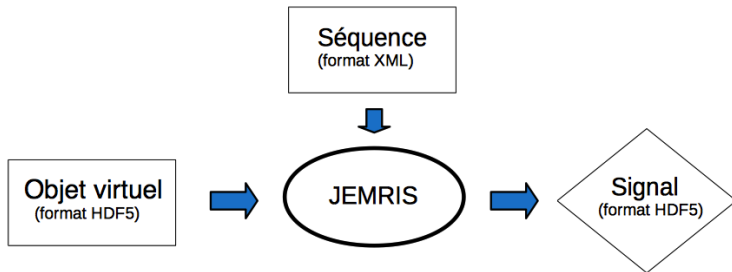


Figure: Schéma général d'une simulation sous JEMRIS

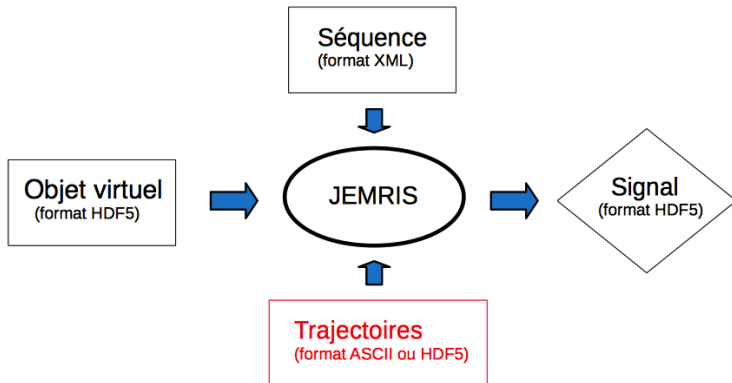
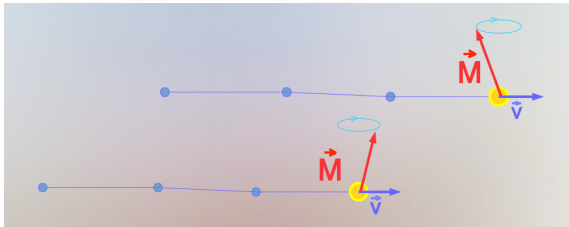


Figure: Schéma général d'une simulation sous JEMRIS

Trajectoires décrites en spécifiant une **collection de positions discrètes** pour chaque isochromat (intervalles de temps arbitraires).



$$\text{SPIN 0} \left\{ \begin{array}{l}
 T_0 = 0.0 \quad X_0 = 11.6 \quad Y_0 = 1.4 \quad Z_0 = 6.8 \\
 T_1 = 0.1 \quad X_1 = 11.6 \quad Y_1 = 1.7 \quad Z_1 = 6.1 \\
 T_2 = 0.6 \quad X_2 = 11.6 \quad Y_2 = 2.1 \quad Z_2 = 4.3 \\
 T_3 = 0.8 \quad X_3 = 11.6 \quad Y_3 = 2.4 \quad Z_3 = 4.1 \\
 \dots \\
 T_{N_0} = 220504 \quad X_{N_0} = 11.9 \quad Y_{N_0} = 10.7 \quad Z_{N_0} = -6.8
 \end{array} \right.$$

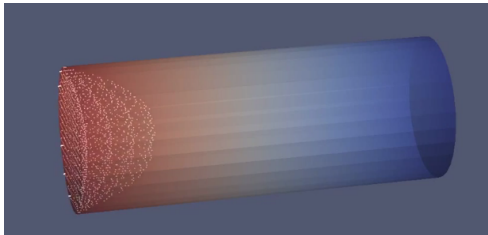
$$\text{SPIN 1} \left\{ \begin{array}{l}
 T_0 = 0.0 \quad X_0 = -1.6 \quad Y_0 = 5.4 \quad Z_0 = 16.2 \\
 T_1 = 0.5 \quad X_1 = -1.6 \quad Y_1 = 6.7 \quad Z_1 = 16.5 \\
 T_2 = 1.4 \quad X_2 = -1.6 \quad Y_2 = 7.1 \quad Z_2 = 14.9 \\
 T_3 = 1.6 \quad X_3 = -1.6 \quad Y_3 = 8.4 \quad Z_3 = 14.1 \\
 \dots \\
 T_{N_1} = 220504 \quad X_{N_1} = -1.9 \quad Y_{N_1} = 20.7 \quad Z_{N_1} = 2.8 \\
 \dots
 \end{array} \right.$$



NOTE : Les calculs de mécanique des fluides (CFD) donnent généralement la **vitesse** en tout point d'un maillage (point de vue eulérien).

NOTE : Les calculs de mécanique des fluides (CFD) donnent généralement la **vitesse** en tout point d'un maillage (point de vue eulérien).

CONVERSION : Calcul des trajectoires par simulation de **lâcher de particules** dans le maillage.



## Conditions pour des simulations réalistes :

- Flux continu
- Densité de particules homogène
- Choix de la densité de particules
- Précautions particulières

## Conditions pour des simulations réalistes :

- Flux continu
- Densité de particules homogène
- Choix de la densité de particules
- Précautions particulières

## Flux continu

La géométrie doit être remplie pendant toute la durée de la séquence (flux de particules continu).

## Flux continu

La géométrie doit être remplie pendant toute la durée de la séquence (flux de particules continu).

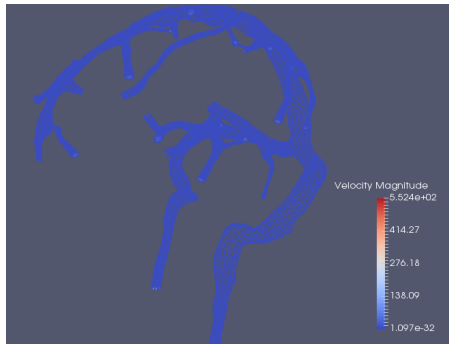


Figure: Réseau veineux cérébral

## Flux continu

La géométrie doit être remplie pendant toute la durée de la séquence (flux de particules continu).

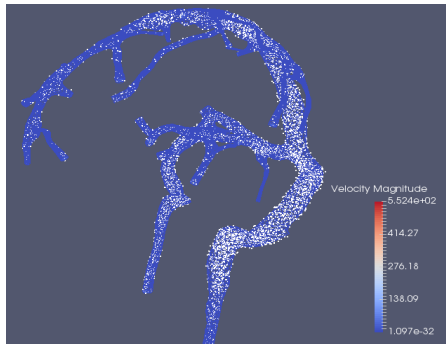


Figure: Remplissage initial de la géométrie

## Flux continu

La géométrie doit être remplie pendant toute la durée de la séquence (flux de particules continu).

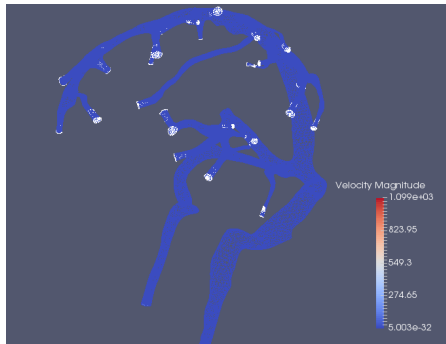


Figure: Ensemencement des entrées



## Conditions pour des simulations réalistes :

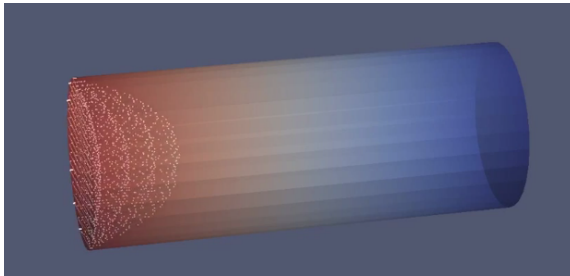
- Flux continu
- Densité de particules homogène
- Choix de la densité de particules
- Précautions particulières

## Densité de particules homogène

La densité de particules doit être homogène dans l'ensemble du maillage (fluide incompressible).

## Densité de particules homogène

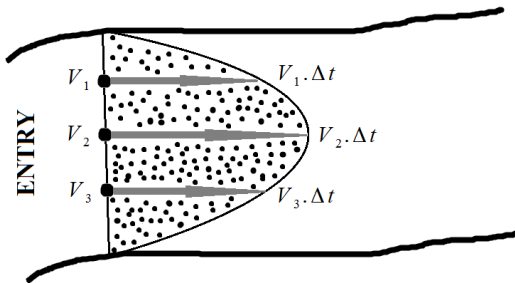
La densité de particules doit être homogène dans l'ensemble du maillage (fluide incompressible).



Non satisfait pour un ensemencement à pas de temps constant :  
dépeuplement au centre du vaisseau.

## Densité de particules homogène

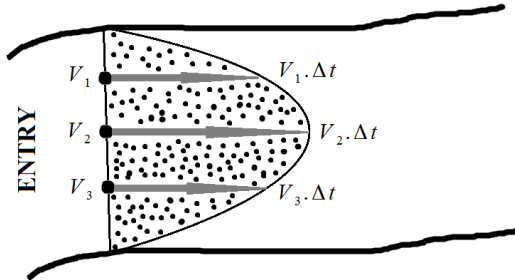
La densité de particules doit être homogène dans l'ensemble du maillage (fluide incompressible).



Pour un ensemencement à **pas spatial constant** : distribution paraboloidale de particules.

## Densité de particules homogène

La densité de particules doit être homogène dans l'ensemble du maillage (fluide incompressible).



Plus le maillage utilisé est fin, plus la répartition des particules demeure homogène... avec certaines limites.

## Conditions pour des simulations réalistes :

- Flux continu
- Densité de particules homogène
- Choix de la densité de particules
- Précautions particulières

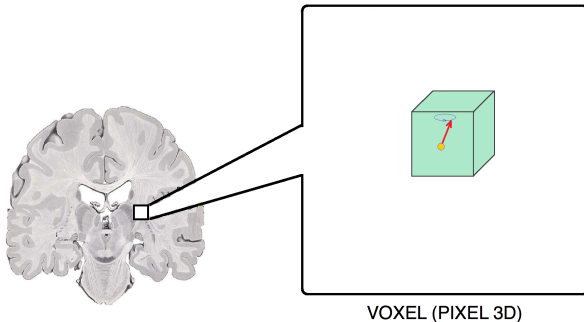
## Choix de la densité de particules

Dépend de la résolution spatiale de la séquence simulée.

## Choix de la densité de particules

Dépend de la résolution spatiale de la séquence simulée.

Au minimum : 1 isochromat par voxel.



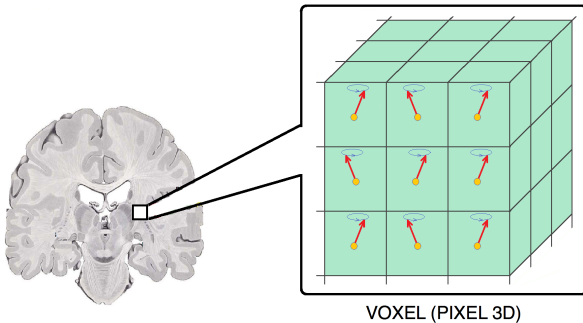


## Choix de la densité de particules

Dépend de la résolution spatiale de la séquence simulée.

Au minimum : 1 isochromat par voxel.

Idéalement : 3 isochromats par voxel et par direction (soit 27 par voxel).

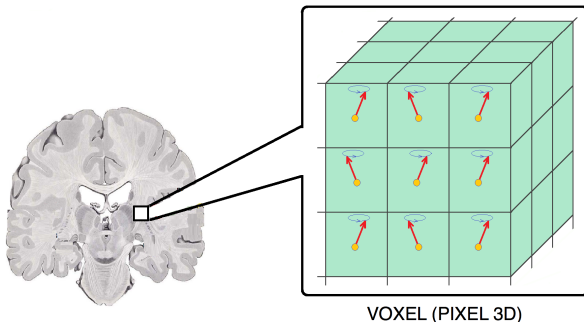


## Conditions pour des simulations réalistes :

- Flux continu
- Densité de particules homogène
- Choix de la densité de particules
- Précautions particulières

## Précautions particulières

Conséquence de la discrétisation : Nombre d'isochromats par voxel très élevé pour simuler les déphasages réversibles des spins (échos de spin, spoiling, steady-state...).



## Précautions particulières

Conséquence de la discrétisation : Nombre d'isochromats par voxel très élevé pour simuler les déphasages réversibles des spins (échos de spin, spoiling, steady-state...).

Expédient : réduire artificiellement le temps de relaxation T2 des spins (expériences peu sensibles au T2, rapport signal/bruit infini).

## Volume de données

Taille des données de flux proportionnelle au nombre de particules simulées durant la séquence...

## Volume de données

Taille des données de flux proportionnelle au nombre de particules simulées durant la séquence...

... donc, à la durée de la séquence.

## Volume de données

Taille des données de flux proportionnelle au nombre de particules simulées durant la séquence...

... donc, à la durée de la séquence.

De plus, cette taille augmente au cube de la résolution spatiale !

Taille voxel (mm)	Spins par voxel et direction	Volume fichier d'entrée (Go/min)	Volume dans JEMRIS (Go/min)
1,6	3	1 400	850
0,8	3	11 000	6 800
0,4	3	87 000	54 000

**Table:** Taille du fichier de flux par minute de séquence pour un réseau vasculaire cérébral complet.



## Solutions développées :

- Limiter la résolution spatiale

## Solutions développées :

- Limiter la résolution spatiale
- Réutiliser périodiquement les données de flux d'un cycle cardiaque

## Temps de calcul

Empiriquement...

## Temps de calcul

Empiriquement...

$$\tau_{simulation} = N_{spins} \cdot \bar{\tau}_{spin}$$

- $N_{spins}$  : Nombre de spins
- $\bar{\tau}_{spin}$  : Temps moyen de simulation par spin (spécifique séquence et écoulement)

## Temps de calcul

### Empiriquement...

$$\tau_{simulation} = N_{spins} \cdot \bar{\tau}_{spin}$$

- $N_{spins}$  : Nombre de spins
- $\bar{\tau}_{spin}$  : Temps moyen de simulation par spin (spécifique séquence et écoulement)

Pour une séquence de quelques minutes ( $Q \cdot T_{seq} \gg \mathcal{V}_{vessels}$ ) :

$$N_{spins} \approx n_{vox} \cdot res^3 \cdot Q \cdot T_{seq}$$

## Temps de calcul

Empiriquement...

Pour une séquence de quelques minutes ( $Q \cdot T_{seq} \gg \mathcal{V}_{vessels}$ ) :

$$\tau_{simulation} \propto n_{vox} \cdot res^3 \cdot Q \cdot T_{seq}$$

- $n_{vox}$  : Nombre de spins par voxel
- $res$  : Résolution spatiale (largeur voxel<sup>-1</sup>)
- $Q$  : Débit sanguin
- $T_{seq}$  : Durée de la séquence
- $\mathcal{V}_{vessels}$  : Capacité des vaisseaux sanguins

## Temps de calcul

Empiriquement...

Pour une séquence de quelques minutes ( $Q \cdot T_{seq} \gg \mathcal{V}_{vessels}$ ) :

$$\tau_{simulation} \propto n_{vox} \cdot res^3 \cdot Q \cdot T_{seq}$$

- $n_{vox}$  : Nombre de spins par voxel
- $res$  : Résolution spatiale (largeur voxel<sup>-1</sup>)
- $Q$  : Débit sanguin
- $T_{seq}$  : Durée de la séquence
- $\mathcal{V}_{vessels}$  : Capacité des vaisseaux sanguins

Pour un champ de vue donné :

$$T_{seq} \propto res \cdot TR \cdot Nex$$

## Temps de calcul

Empiriquement...

Pour une séquence de quelques minutes ( $Q.T_{seq} \gg \psi_{vessels}$ ) :

$$\tau_{simulation} \propto n_{vox} \cdot res^4 \cdot Q \cdot Nex \cdot TR$$

- $n_{vox}$  : Nombre de spins par voxel
- $Q$  : Débit sanguin
- $res$  : Résolution spatiale (largeur voxel<sup>-1</sup>)
- $Nex$  : Nombre d'excitations
- $TR$  : Temps de répétition



## Solutions proposées :

- Limiter la résolution spatiale

## Solutions proposées :

- Limiter la résolution spatiale
- Réduire le TR et le nombre de spins par voxel

## Solutions proposées :

- Limiter la résolution spatiale
- Réduire le TR et le nombre de spins par voxel
- Paralléliser les calculs

# Sommaire

- 1 La simulation IRM
  - Bases physiques de l'IRM
  - Méthode par sommation d'isochromats
  - Simulation des flux
- 2 Développement d'un outil adapté aux flux
  - Implantation logicielle
  - Conditions de simulation
  - Volume de données, temps de calcul
- 3 Résultats de simulation
  - Validation sur des cas simples
  - Applications VIVABRAIN

**Validation du logiciel** : Simulation de phénomènes connus sur des écoulements simples (tuyau rectiligne).

Validation du logiciel : Simulation de phénomènes connus sur des écoulements simples (tuyau rectiligne).

- Artéfacts de flux
- Séquences angiographiques

**Validation du logiciel** : Simulation de phénomènes connus sur des écoulements simples (tuyau rectiligne).

**Validation expérimentale** : Comparaison de certaines de ces simulations à des images acquises sur un fantôme d'écoulement.



**Figure:** Banc hydrodynamique (J. Baruthio, Strasbourg).

## Artéfacts de flux

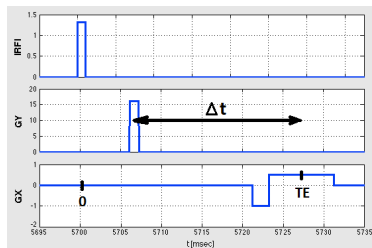
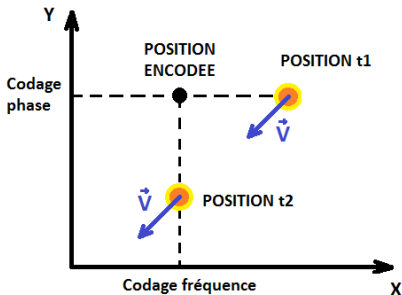


Figure: ARTEFACT DE DEPLACEMENT



## Artéfacts de flux

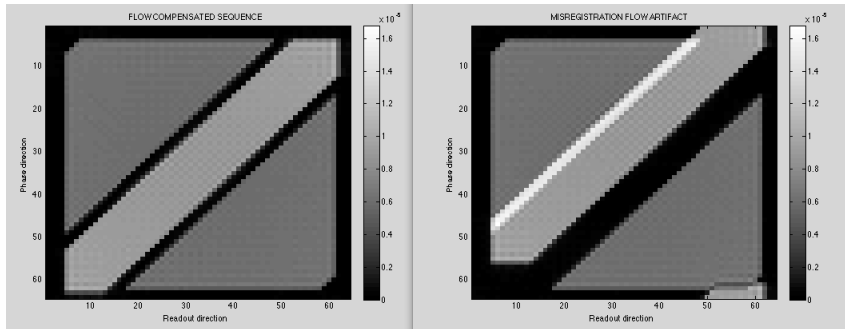


Figure: ARTEFACT DE DEPLACEMENT (simulations)

## Artéfacts de flux

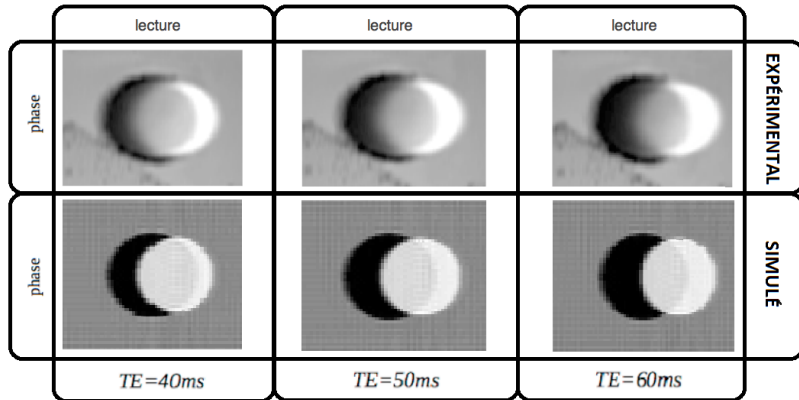


Figure: ARTEFACT DE DEPLACEMENT

## Artéfacts de flux

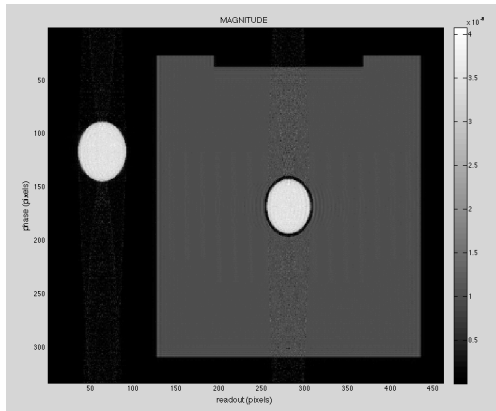
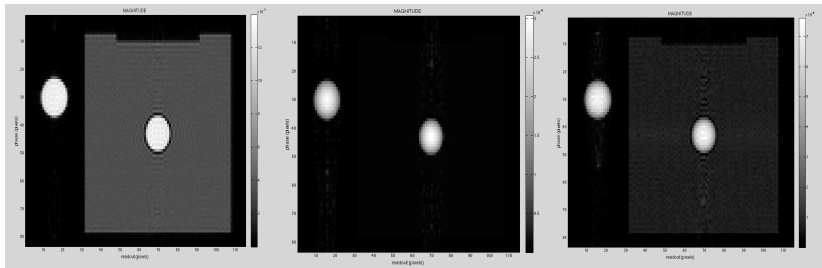


Figure: EFFET D'ENTREE (simulation)

## Séquences angiographiques



**Figure:** ECHO DE GRADIENT, TEMPS DE VOL & PRODUIT DE CONTRASTE (simulations)

## Séquences angiographiques

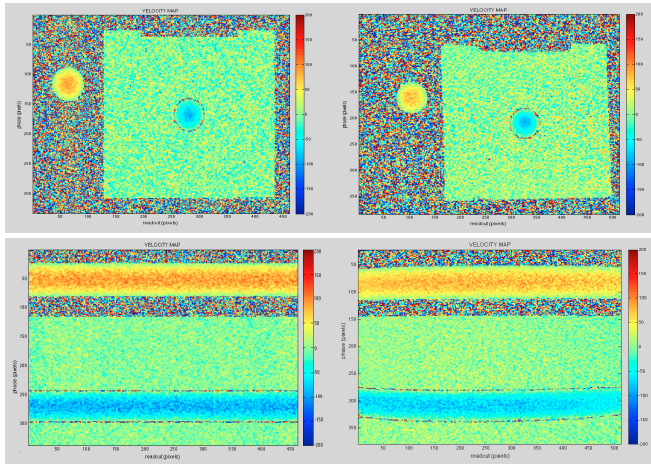


Figure: CONTRASTE DE PHASE (simulation & expérimental)

## Séquences angiographiques

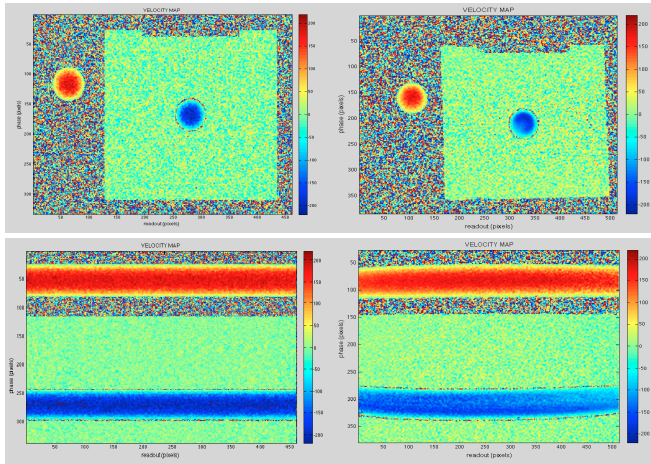


Figure: CONTRASTE DE PHASE (simulation & expérimental)

## Premières applications VIVABRAIN : Application à des données de flux complexes CFD

## Premières applications VIVABRAIN : Application à des données de flux complexes CFD

- Bifurcation en Y
- Réseau veineux



## Bifurcation en Y



Figure: Bifurcation en Y (O. Balédent, Amiens)

## Bifurcation en Y

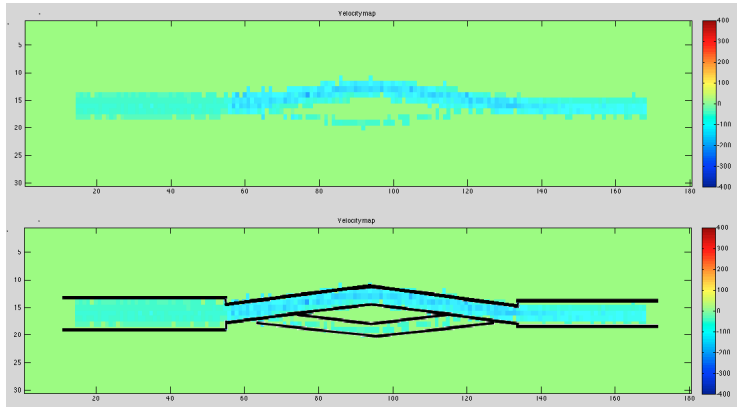


Figure: CONTRASTE DE PHASE (simulation)

## Bifurcation en Y

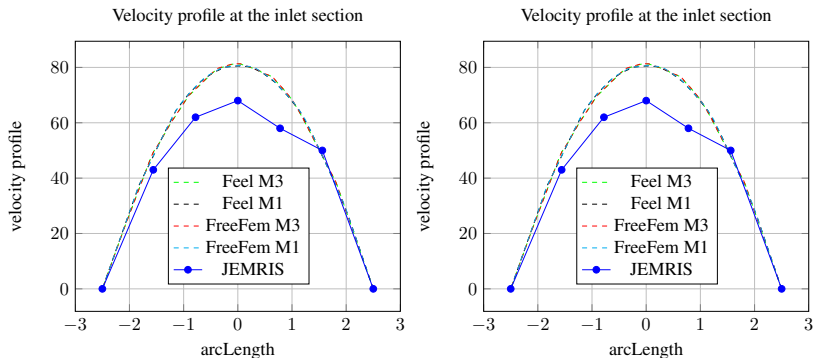


Figure: Profils de vitesse mesurés en entrée et en sortie

## ARM

Equipes médicales

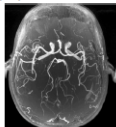
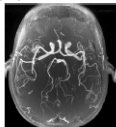


Figure: Applications VIVABRAIN

**ARM**  
Equipes médicales



**Segmentation**  
Equipes informatiques



Figure: Applications VIVABRAIN

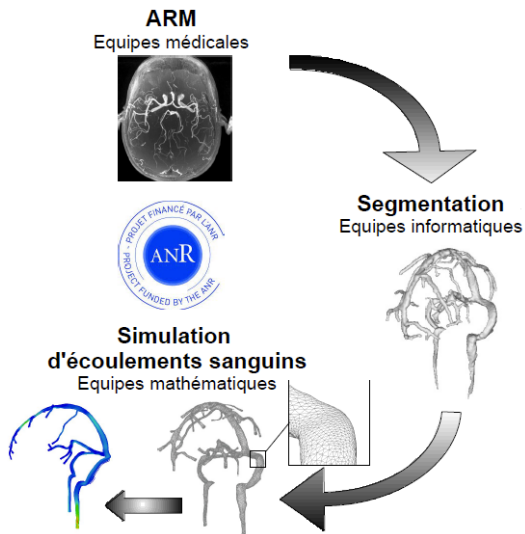


Figure: Applications VIVABRAIN

## Réseau veineux

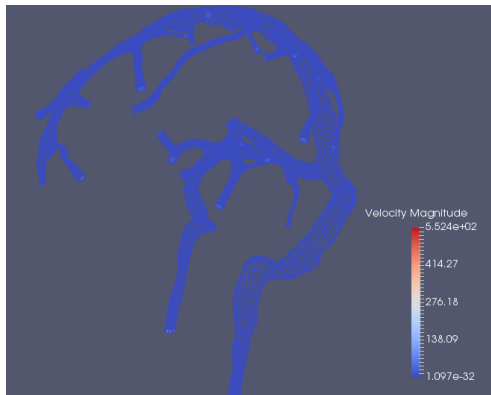


Figure: Visualisation du réseau

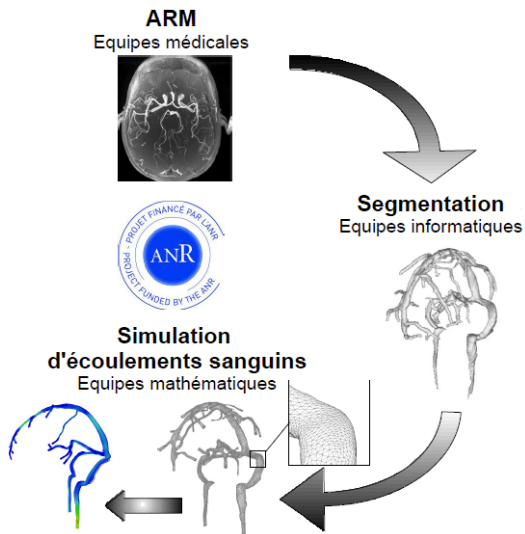


Figure: Applications VIVABRAIN



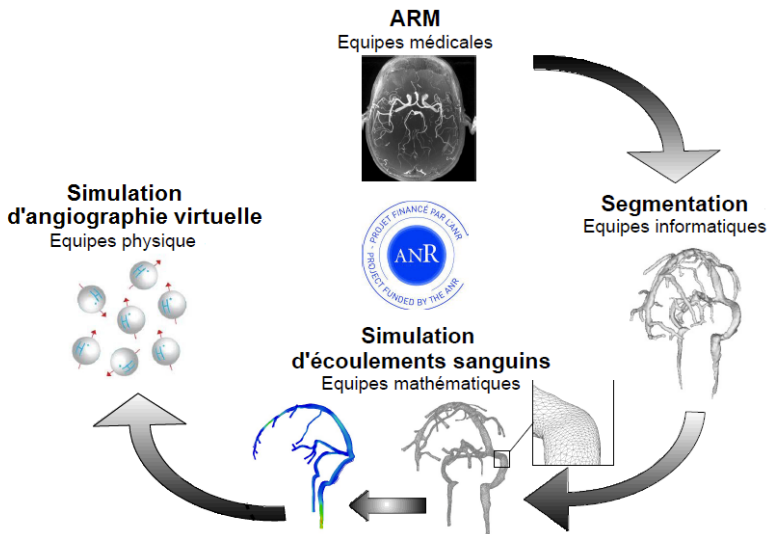


Figure: Applications VIVABRAIN

## Réseau veineux

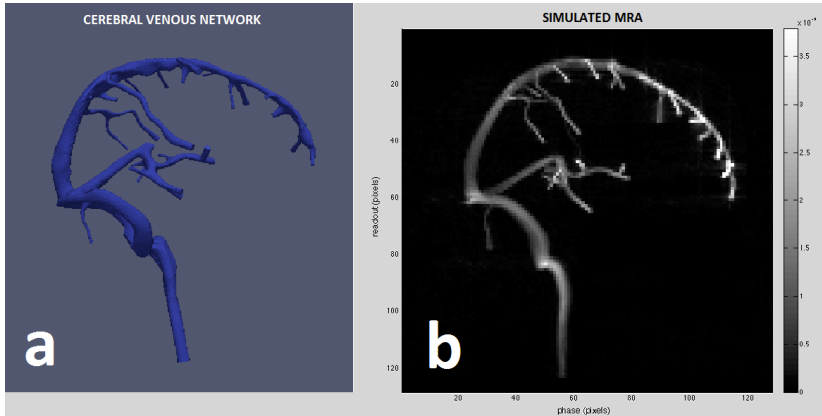


Figure: CONTRASTE DE PHASE (simulation)

## Réseau veineux

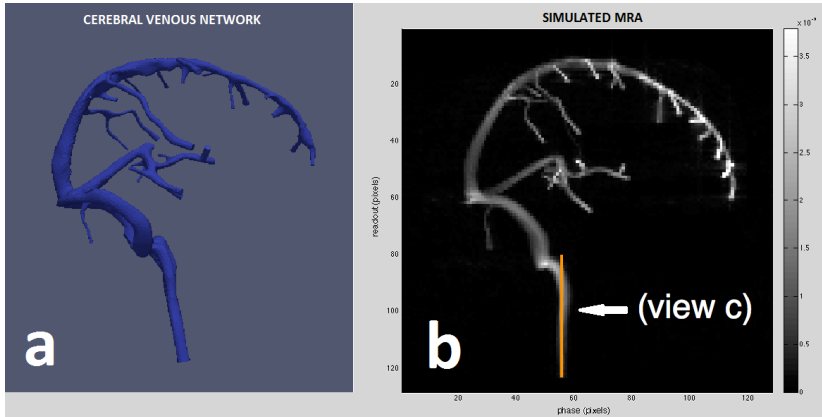


Figure: CONTRASTE DE PHASE (simulation)

## Réseau veineux

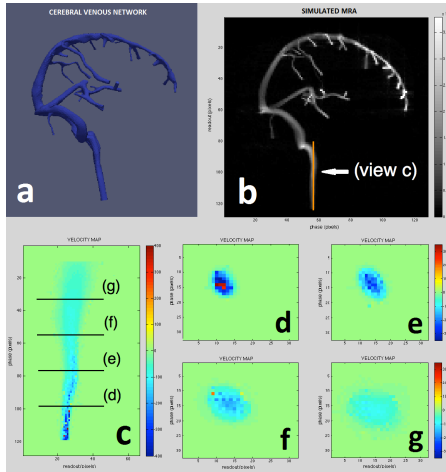


Figure: CONTRASTE DE PHASE (simulation)

Simulation	Matrice	Isochromats	CPU	Durée [min]	Durée [ms/spin]
<b>Fantôme flux</b>					
Déplacement 1	64	270 168	100	3	67
Déplacement 2	64	3 808 000	180	62	176
Temps de vol	83	1 354 810	150	20	133
Gadolinium	83	1 354 810	100	31	137
Contraste phase 1d	333	2 × 2 069 943	300	330	1430
<b>Réseau veineux</b>					
Réseau (PC, 3d)	128	4 × 178 173	150	40	505
Veine (PC, 1d, frontale)	128	2 × 660 488	50	240	545
Veine (PC, 1d, transv.)	128	2 × 660 488	50	360	818

Table: Temps de calcul.

## Conclusion :

- Outil complet, open-source et haute performance pour la simulation d'angiographie par IRM
- Validé expérimentalement sur des écoulements simples
- Appliqué au réseau veineux cérébral, en contraste de phase 2D

## Conclusion :

- Outil complet, open-source et haute performance pour la simulation d'angiographie par IRM
- Validé expérimentalement sur des écoulements simples
- Appliqué au réseau veineux cérébral, en contraste de phase 2D

## Perspectives :

- Application aux séquences IRM 3D
- Application aux flux artériels instationnaires (4D)



Merci !

<http://www.jemris.org>



LABORATOIRE DE MATHÉMATIQUES  
DE REIMS EA 4535