

BOBINES HOMOGENÈS POUR LA RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE PORTABLE (RMN) APPLIQUÉE À L'AGROÉCOLOGIE

E. Alibert⁽¹⁾, M. Cardoso⁽¹⁾, C. Coillot⁽¹⁾, K. El Hamdaoui⁽¹⁾, F. Gatineau⁽³⁾, C. Goze-Bac⁽¹⁾, A. Grondin⁽⁴⁾, E. Nativel⁽²⁾, P. de Pellegars⁽⁵⁾, S. Rousset⁽¹⁾, R. Sidiboulénouar⁽¹⁾, J. Simon⁽¹⁾, A. Techer⁽¹⁾, J-L. Verdeil⁽³⁾ et M. Zanca⁽¹⁾.

⁽¹⁾ L2C, Université de Montpellier, France.

⁽²⁾ IES, Université de Montpellier, France.

⁽³⁾ UMR AGAP, CIRAD, Université de Montpellier, France.

⁽⁴⁾ IRD, Université de Montpellier, France.

⁽⁵⁾ RS2D, Mundolsheim, France.

Plan

- De l'agronomie à l'agroécologie
- Mesure de flux de sève par IRM
 - Principe de la RMN
 - Imagerie des flux par IRM : principe & résultats
- De l'IRM à la RMN portable *in naturae*
 - Problématique (B0 : homogénéité et intensité)
 - Bobines Cosine
 - Méthodes SHS
- Conclusion & Perspectives

Plan

- De l'agronomie à l'agroécologie
- Mesure de flux de sève par IRM
 - Principe de la RMN
 - Imagerie des flux par IRM : principe & résultats
- De l'IRM à la RMN portable *in naturae*
 - Problématique (B0 : homogénéité et intensité)
 - Bobines Cosine
 - Méthodes SHS
- Conclusion & Perspectives

Dégradation de l'environnement & changement climatique :

- **Des conséquences multiples pour l'agriculture:**
 - ⇒ Stress hydriques (sécheresse et inondations)
 - ⇒ Montée des eaux => augmentation de la salinité
 - ⇒ Baisse de rendement des terres agricoles (surtout au Sud...)
- **L'agriculture est au premier plan des causes**
 - ⇒ Emissions de GES de l'agriculture 20% (transport 27%)
(source CGDD)



Changement de paradigme : l'Agroécologie.

l'Agroécologie:

« *Bases scientifiques de l'écologie appliquées à l'agronomie.* »

Pirouette sémantique
ou **vertolution** ?

⇒ **Nouvel horizon des organismes de recherche: CIRAD, INRA et IRD**



Contextes agroécologiques

- Paillage « naturel » des sols
- Agroforesterie et forêt-maraichage :
Parcelle agroforestière de blé sous noyers (Restinclières)
production agricole = cultures 0.8ha/ans & arbres : 0.6ha
- Rotation des cultures & engrais vert
- Associations d'espèces et/ou variétales
 - Amélioration de la fertilité des sols
 - Réduction des intrants...et des émissions de N20
 - Séquestration de CO2 dans les sols (4‰)



=> Santé de la plante dans un agrosystème

De l'agronomie à l'agroécologie

=> **Santé de la plante dans un agrosystème**

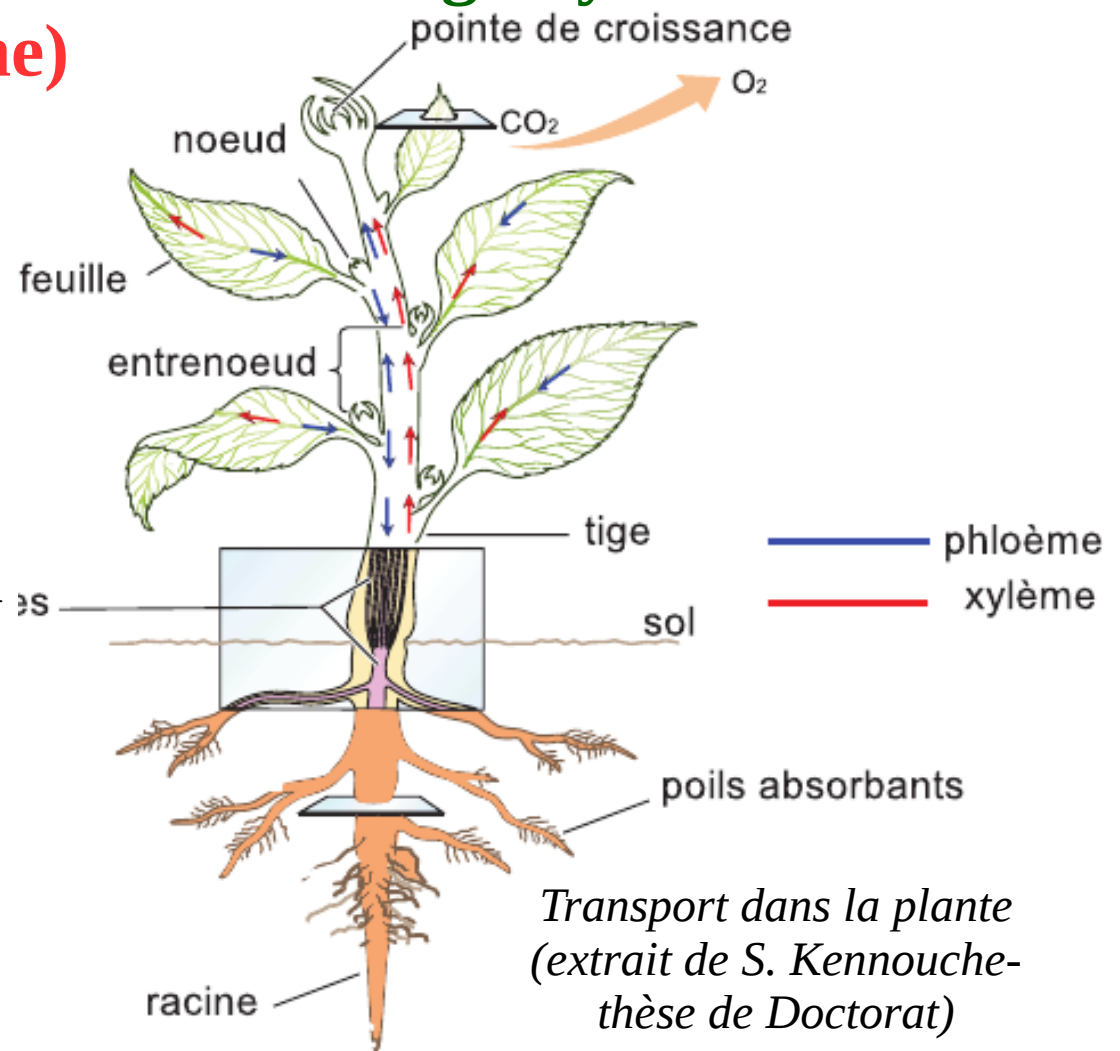
Flux de sève brute (xylème)

- Ouverture des stomates
évapo-transpiration

Flux de sève élaborée (phloème)

- Sucres carbonés issus de la photosynthèse
- Croissance des fruits

Inhibition des flux en présence de stress



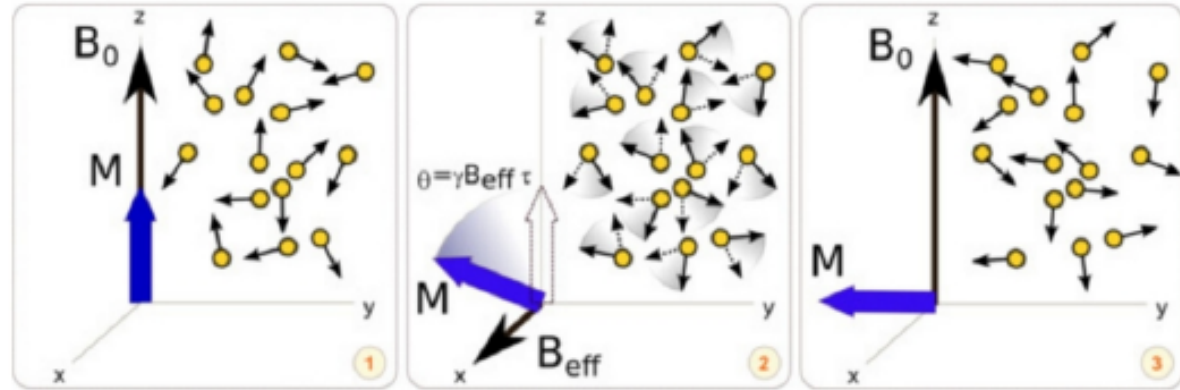
Mesure de flux de sève par

Résonance Magnétique Nucléaire (RMN).

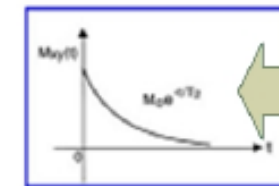
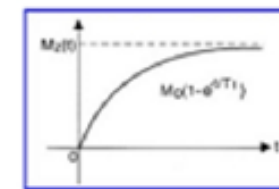
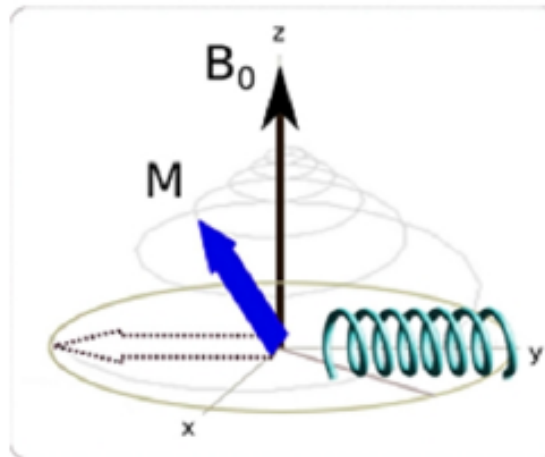
Plan

- De l'agronomie à l'agroécologie
- Mesure de flux de sève par IRM
 - Principe de la RMN
 - Imagerie des flux par IRM : principe & résultats
- De l'IRM à la RMN portable *in naturae*
 - Problématique (B0 : homogénéité et intensité)
 - Bobines Cosine
 - Méthodes SHS
- Conclusion & Perspectives

- Aimantation macroscopique: $M \propto B_0$ vers B_0 .
- Précession des noyaux ($\omega_0 = -\gamma \mathbf{B}_0$).
- Bascule \Rightarrow Champ B_1 a ω_0 .
- Détection à ω_0 .
- Sonde IRM : résonance à $\sim \omega_0$.



Excitation Pulse : Tx



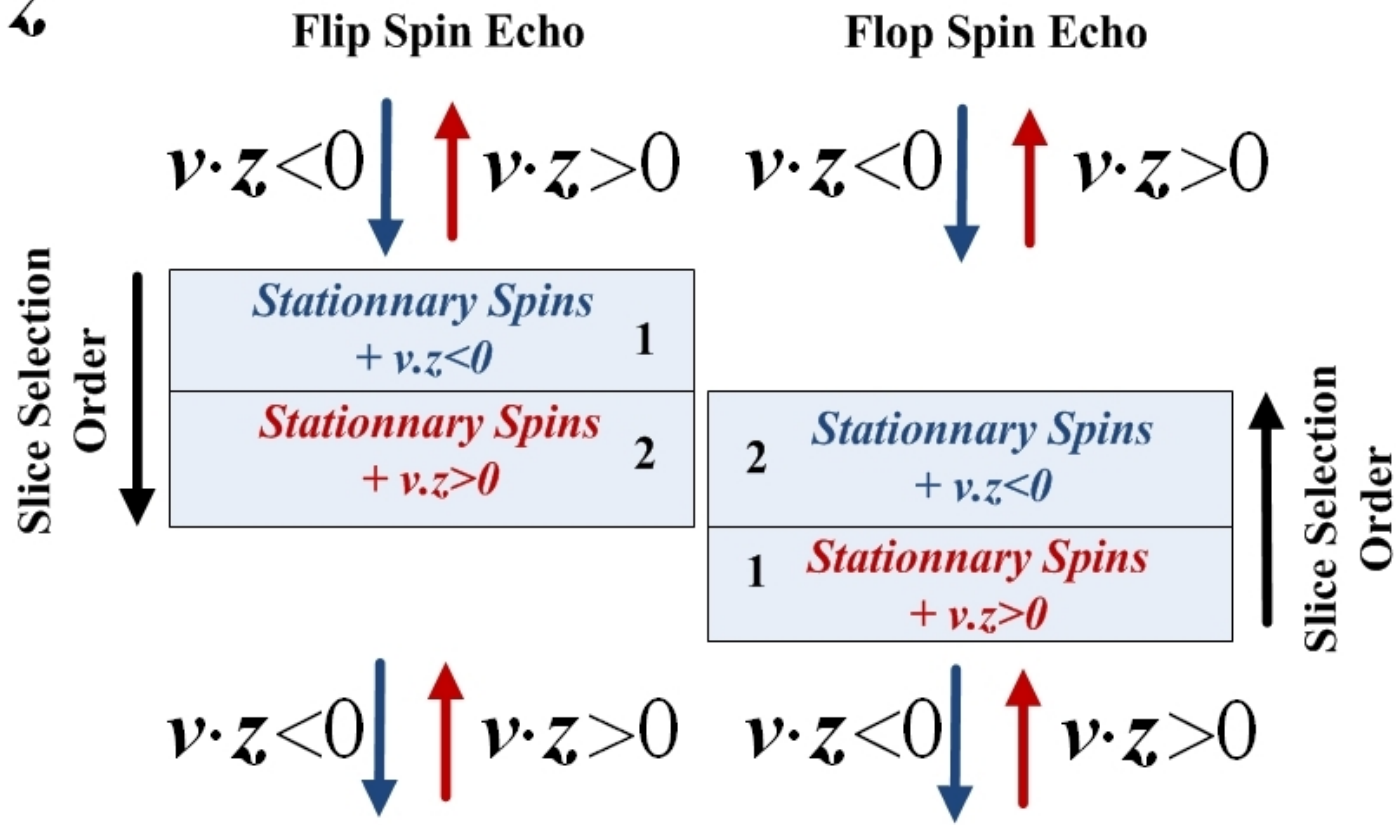
Return to Equilibrium

$$e(t) = \left(\frac{d\vec{\delta m}}{dt} \cdot (\vec{B}/I) \right)$$

IRM \Rightarrow Flux-IRM $\uparrow z$

- Flip-flop (*) \Rightarrow suppression de la signature des spins statiques.
- Imagerie des flux lents :

$$v < 10 \mu\text{m/s}$$



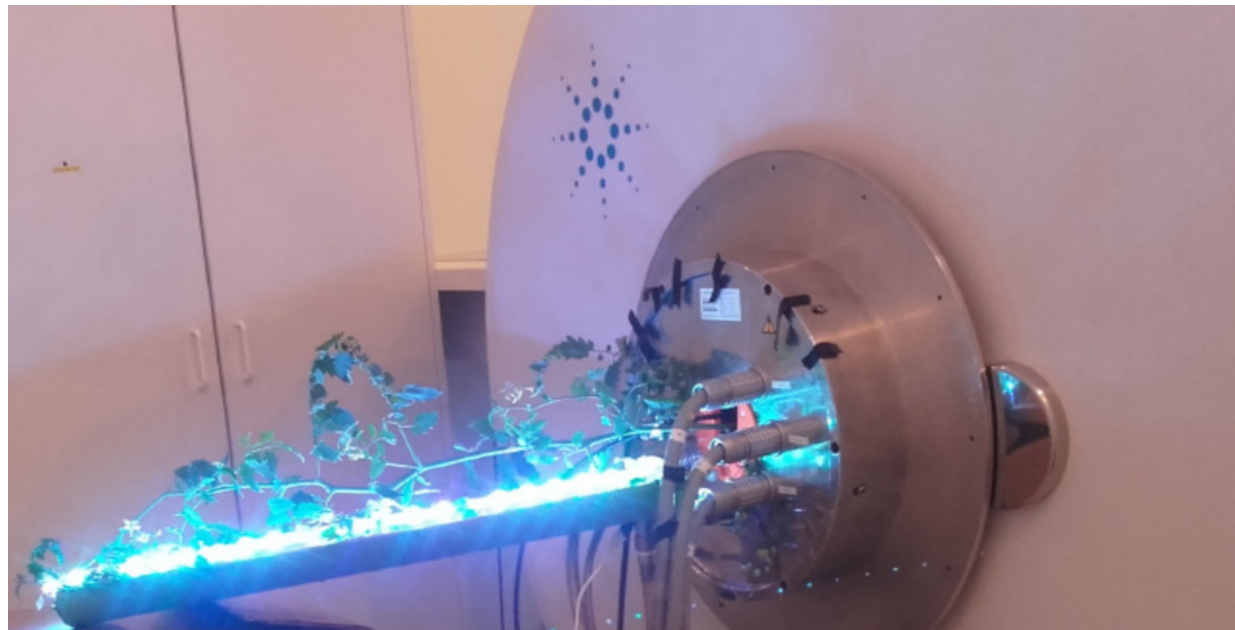
(*) S. Buy et al., Flip-flop method: A new T1-weighted flow-MRI for plants studies. PLoS ONE 13(3): e0194845. (2018)

$$S_{flow} = S_{2-Flip} - S_{2-Flop} e^{-\frac{T_R}{T_1}}$$

$$S_{flow} \propto \pm v T_R M_0^m e^{\frac{T_R}{T_1}}$$

IRM \Rightarrow Flux-IRM

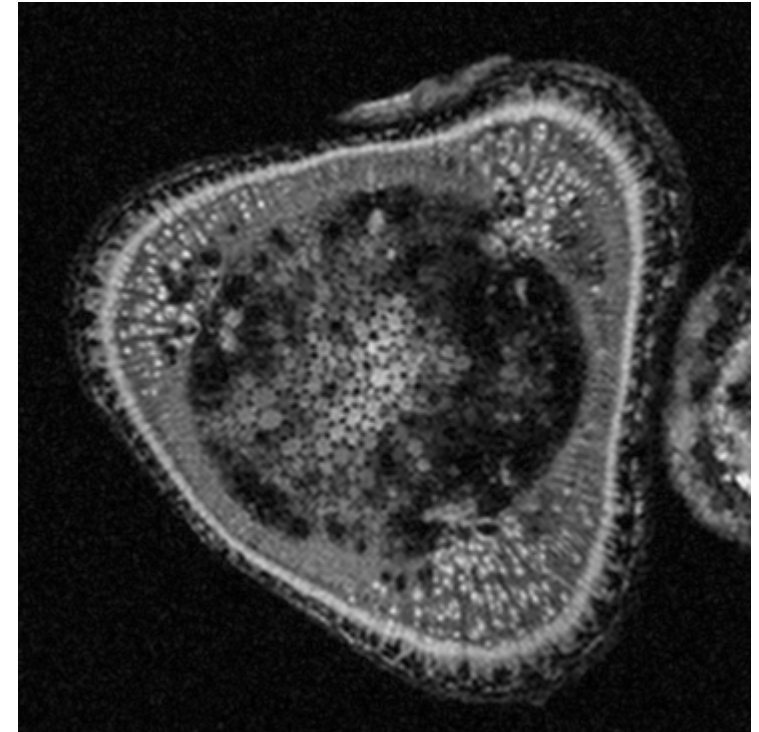
- Imagerie des flux
- Tige de plant de tomate



IRM 9.4T – don de l'association Verticale

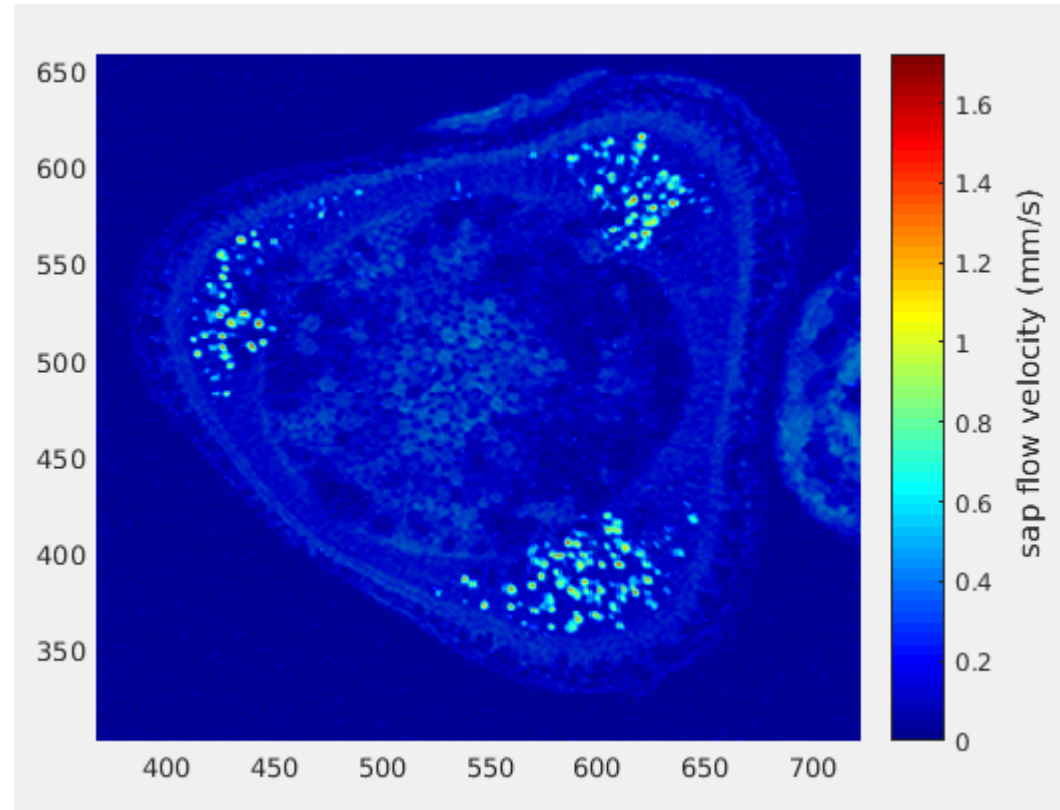
IRM \Rightarrow Flux-IRM

- Imagerie des flux
- Tige de plant de tomate
- Anatomie de la tige de tomate ($30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$)



IRM \Rightarrow Flux-IRM

- Imagerie des flux
- Tige de plant de tomate
- Imagerie des flux xylémiens (flip-flop)



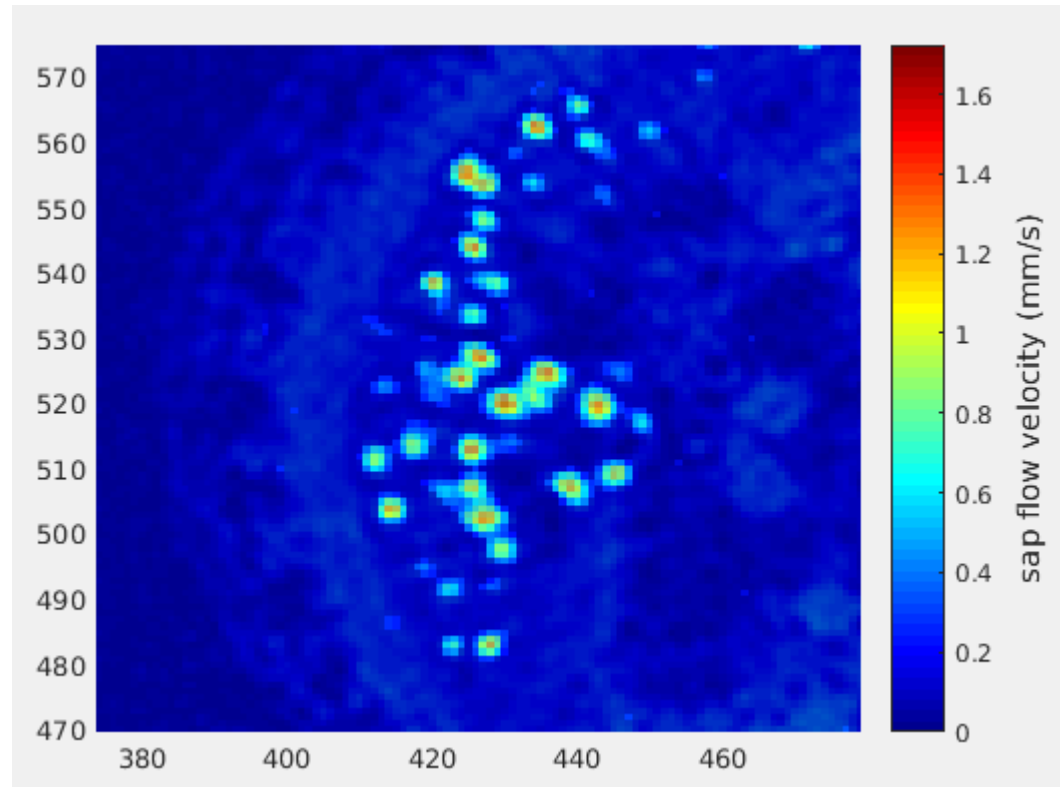
IRM \Rightarrow Flux-IRM

- Imagerie des flux
- Tige de plant de tomate
- Imagerie des flux xylémiens (flip-flop)
- v_{max} 1.6mm/s
- Écoulement de Poiseuille.

\Rightarrow Suivi de la dynamique des flux de sève
& réponses aux stress

\Rightarrow Mesures *in planta* en conditions
agroécologiques ????

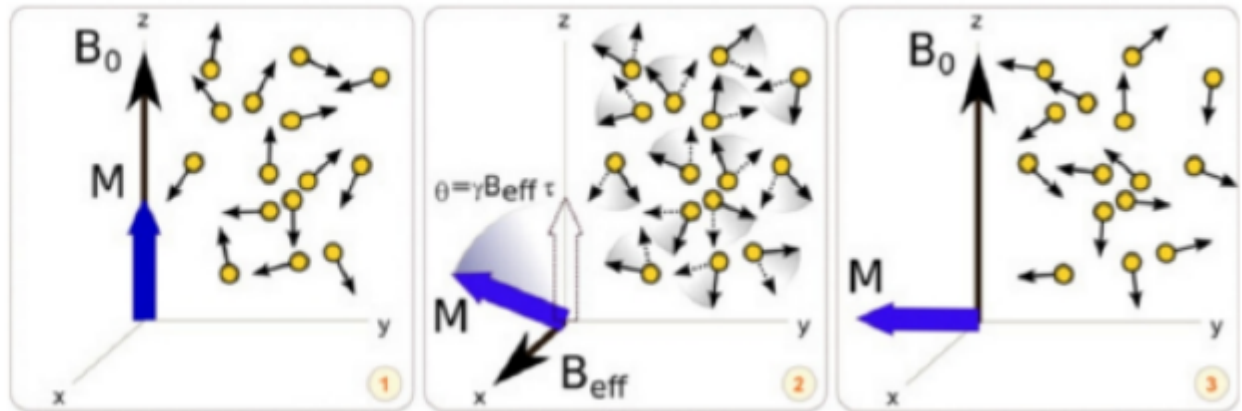
\Rightarrow RMN portable



Plan

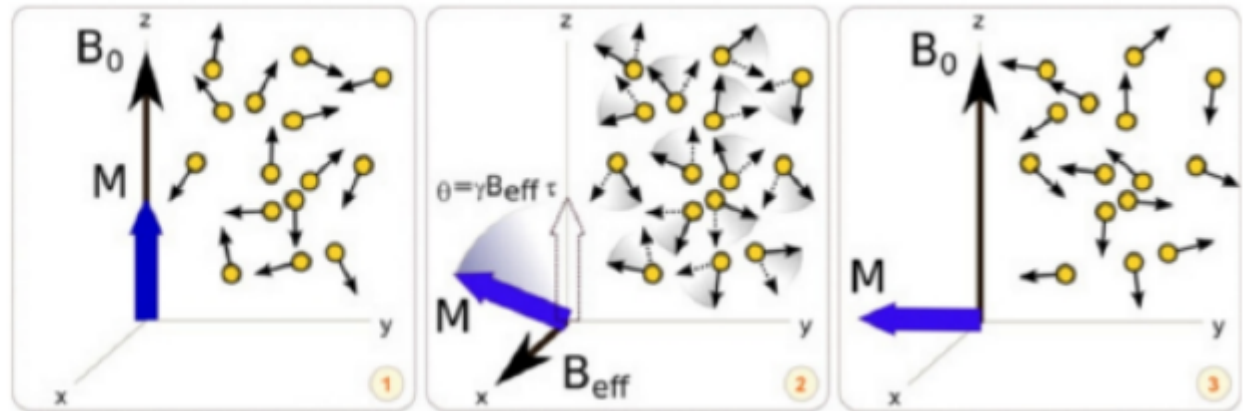
- De l'agronomie à l'agroécologie
- Mesure de flux de sève par IRM
 - Principe de la RMN
 - Imagerie des flux par IRM : principe & résultats
- De l'IRM à la RMN portable *in naturae*
 - Problématique (B0 : homogénéité et intensité)
 - Bobines Cosine
 - Méthodes SHS
- Conclusion & Perspectives

- Aimantation macroscopique:
 $M \propto B_0$ vers B_0 .



B_0 doit être le + élevé possible : RMN de labo > qqTeslas....

- Aimantation macroscopique:
 $M \propto B_0$ vers B_0 .



B_0 doit être le + élevé possible : RMN de labo > qqTeslas....

⇒ RMN bas-champ.... à 4.5mT (*)

⇒ Bobines Helmholtz

⇒ Limitation thermique !

Pas encore portable....
mais transportable 😊 !



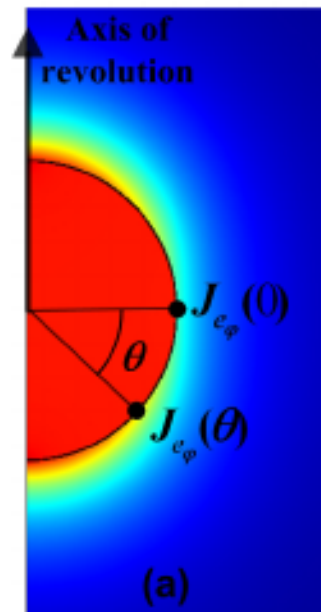
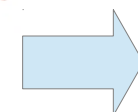
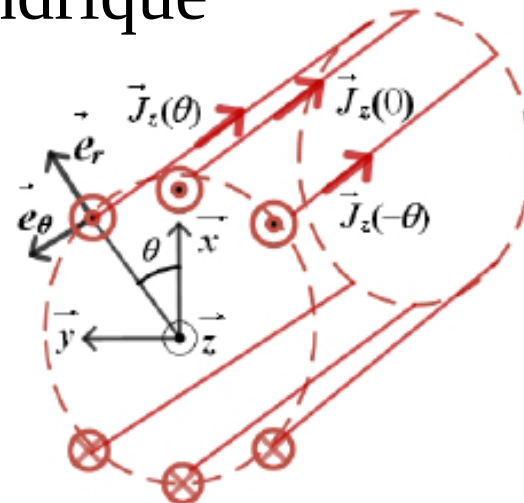
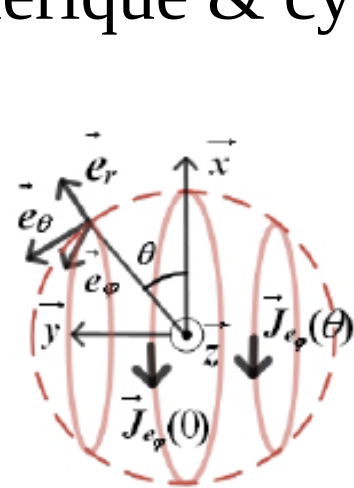
(*) Aktham Asfour (August 1st 2011). Low-Field NMR/MRI Systems Using LabVIEW and Advanced Data-Acquisition Techniques, Practical Applications and Solutions Using LabVIEW™ Software
Silviu Folea, IntechOpen, DOI: 10.5772/19751

Homogénéité de B_0 ($<1000\text{ppm}$) \Rightarrow **Bobines cosinus** (*)
en géométrie sphérique & cylindrique

$$\mathbf{J}_{e_\varphi}(\theta) = J_0 \cos(\theta) \mathbf{e}_\varphi$$

$$\mathbf{J}_z(\theta) = J_0 \cos(\theta) \mathbf{z}$$

(*) Clark, J. W.: A new method for obtaining a uniform magnetic field, Rev. Sci. Instrum., 9, 320–322, 1938.



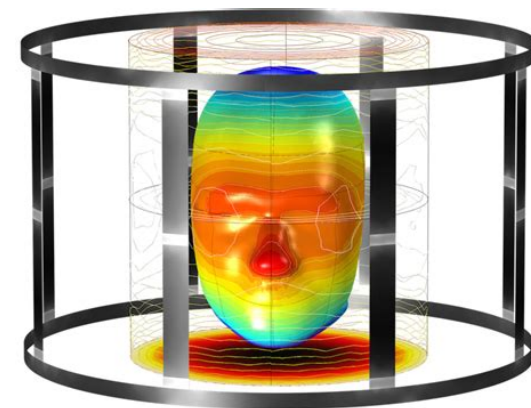
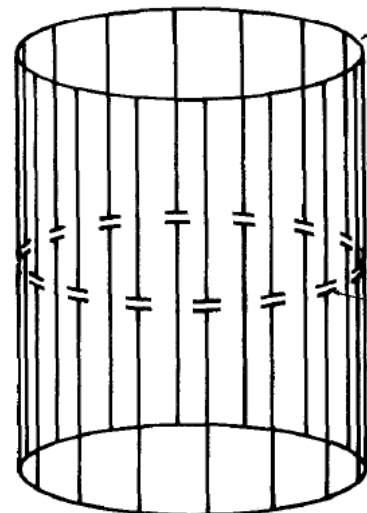
Sondes IRM Birdcage (*):

\Rightarrow Golden standard IRM

\Rightarrow RF **Bobine cosinus** en géom. Cyl

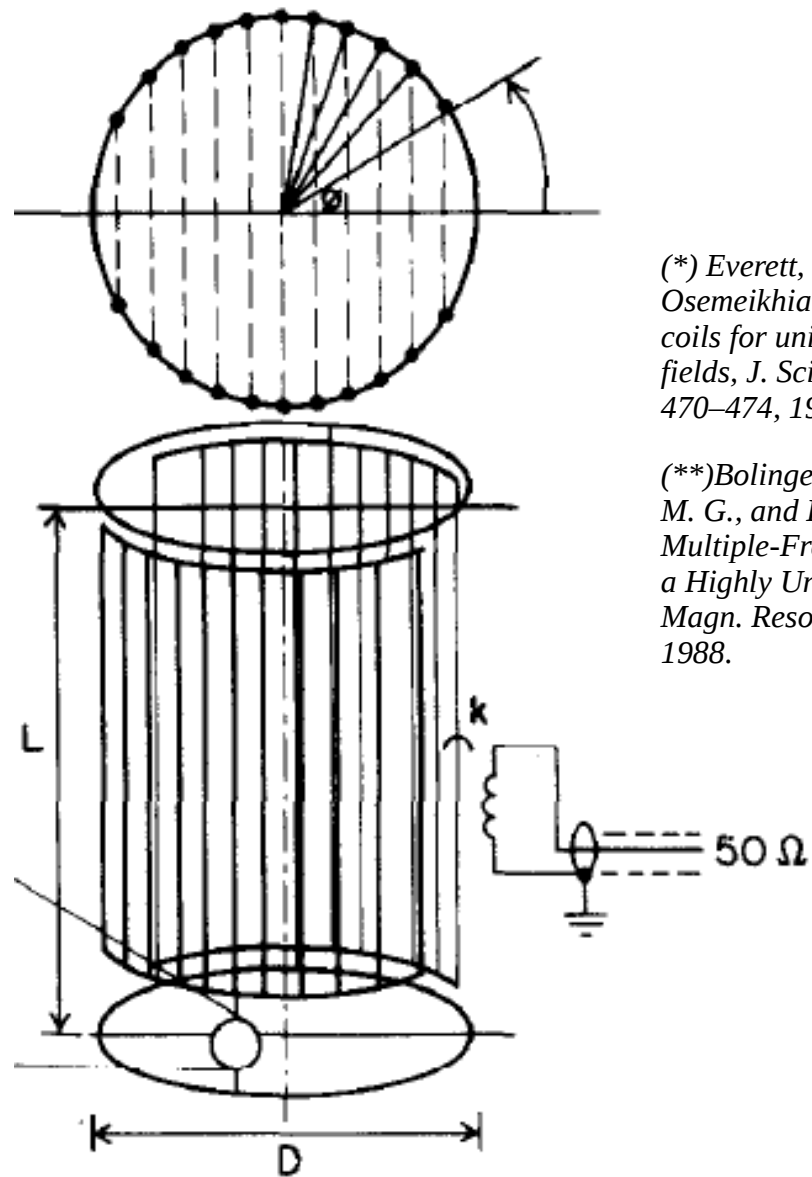
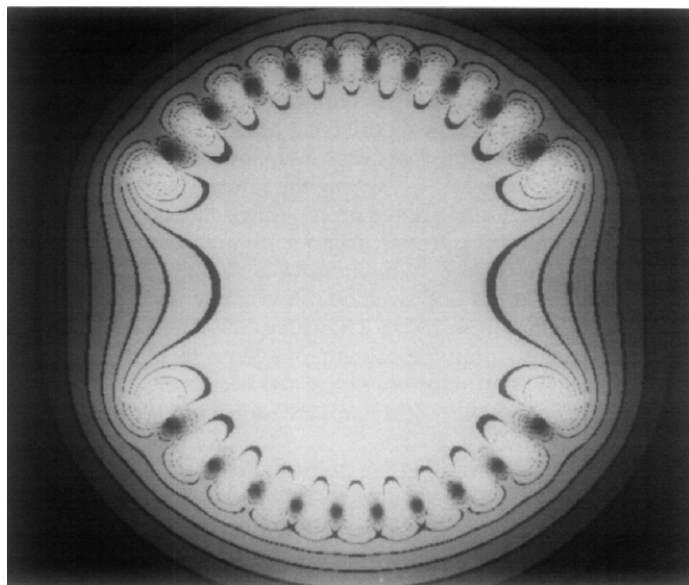
\Rightarrow Déphasage spatio-temporel

(*) Hayes, C. E., Edeutein, W. A., Schenck, J. F., Mueller, O. M., and Eash, M.: An Efficient Highly Homogeneous Radiofrequency Coil for Whole-Body NMR Imaging at 1.5T, J. Magn. Reson., 63, 622–628, 1985.



Bobines cosine « Bolinger »

=> répartition spatiale des conducteurs (* et **):
 équidistance de la projection de la position sur le diamètre
 => homogénéité améliorée.

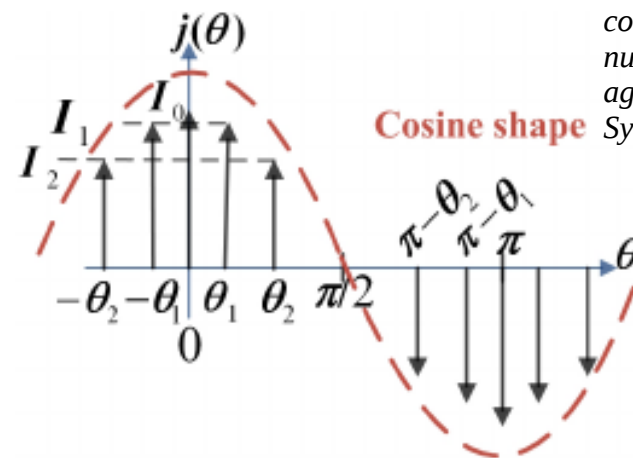
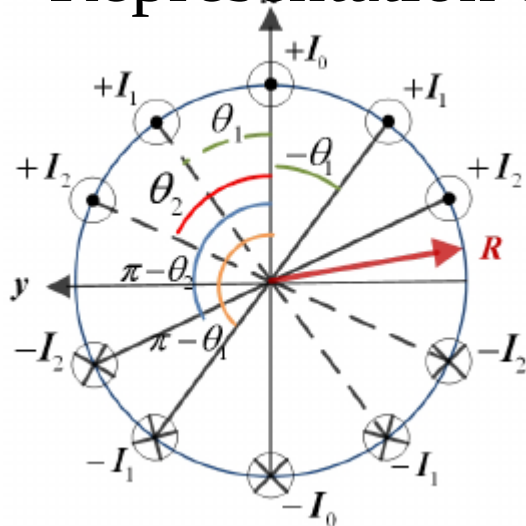


(*) Everett, J. E. and Osemeikhian, J. E.: Spherical coils for uniform magnetic fields, *J. Sci. Instrum.*, 43, 470–474, 1966.

(**) Bolinger, L., Prammer, M. G., and Leigh, J. S.: A Multiple-Frequency Coil with a Highly Uniform B1 Field, *J. Magn. Reson.*, 81, 162–166, 1988.

Bobines cosine : méthode Space Harmonics Suppression(*):

=> Représentation discrète des conducteurs



(* Sidi-Boulenouar R., et al.:
Homogenous static magnetic field
coils dedicated to portable
nuclear magnetic resonance for
agronomic studies, *J. Sens. Sens.
Syst.*, 7, 227-234, (2018).

=> Cas Général (1 conducteur central + N paires de bobines):

$$j(\theta) = I_0 [\delta(\theta) - \delta(\theta - \pi)] + \sum_{n=1}^N I_n [\delta(\theta - \theta_n) + \delta(\theta + \theta_n) - \delta(\theta - \theta_n - \pi) - \delta(\theta + \theta_n - \pi)]$$

=> **Cas pair** (N paires de bobines) :

$$j(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n [\delta(\theta - \theta_n) + \delta(\theta + \theta_n) - \delta((\theta - \theta_n) - \pi) - \delta((\theta + \theta_n) - \pi)]$$

Bobines cosine méthode Space Harmonics Suppression(*):

- Cas pair :

$$j(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n [\delta(\theta - \theta_n) + \delta(\theta + \theta_n) - \delta((\theta - \theta_n) - \pi) - \delta((\theta + \theta_n) - \pi)]$$

=> Calcul de la DSF de $j(\theta)$

$$j(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\sum_{n=1}^N \frac{4 I_n}{\pi} \cos((2k-1)\theta_n) \right) \times \cos((2k-1)\theta)$$

=> Fondamental (k=1) : $j(\theta) = \sum_{n=1}^N \frac{4 I_n}{\pi} \cos(\theta_n) \times \cos(\theta)$

$$\Rightarrow B_0 \propto \sum_{n=1}^N I_n \cos^2(\theta_n)$$

=> Annulation des harmoniques : 2N variables θ_n et I_n

Set de 2N-1 équations (k=2 à k=2N) :

$$\sum_{n=1}^N \frac{4 I_n}{\pi} \cos((2k-1)\theta_n) = 0$$

Bobines cosine méthode Space Harmonics Suppression(*):

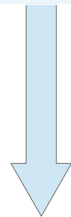
Exemple de jeu d'équations pour N=2 :

Bolinger

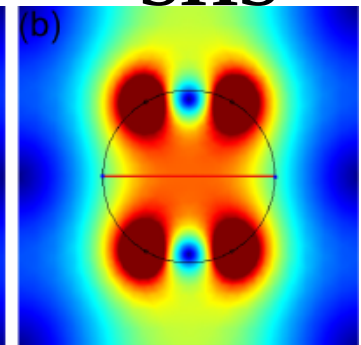
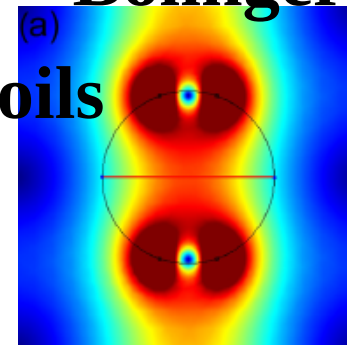
SHS

$$B_0 \propto \sum_{n=1}^N I_n \cos^2(\theta_n)$$

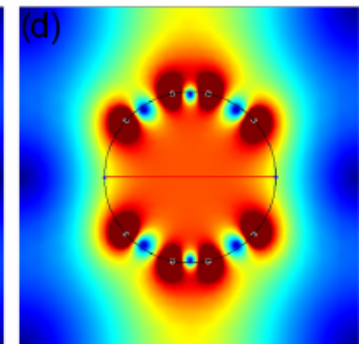
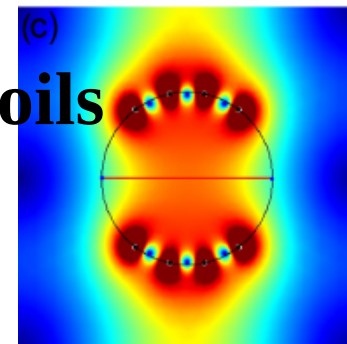
$$\sum_{n=1}^N \frac{4 I_n}{\pi} \cos((2k-1)\theta_n) = 0$$



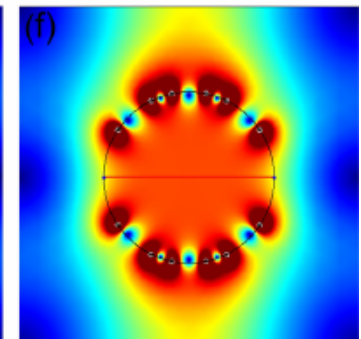
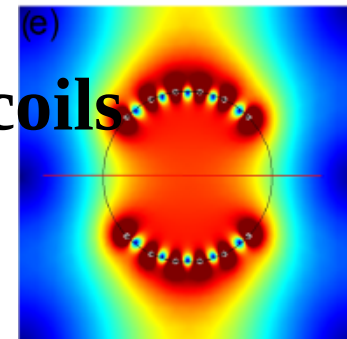
2coils



4coils



6 coils



$$\text{Max}_{(I_1, I_2, \theta_1, \theta_2)} \left(\frac{N \mu_0}{R} (I_1 \cos^2(\theta_1) + I_2 \cos^2(\theta_2)) \right)$$

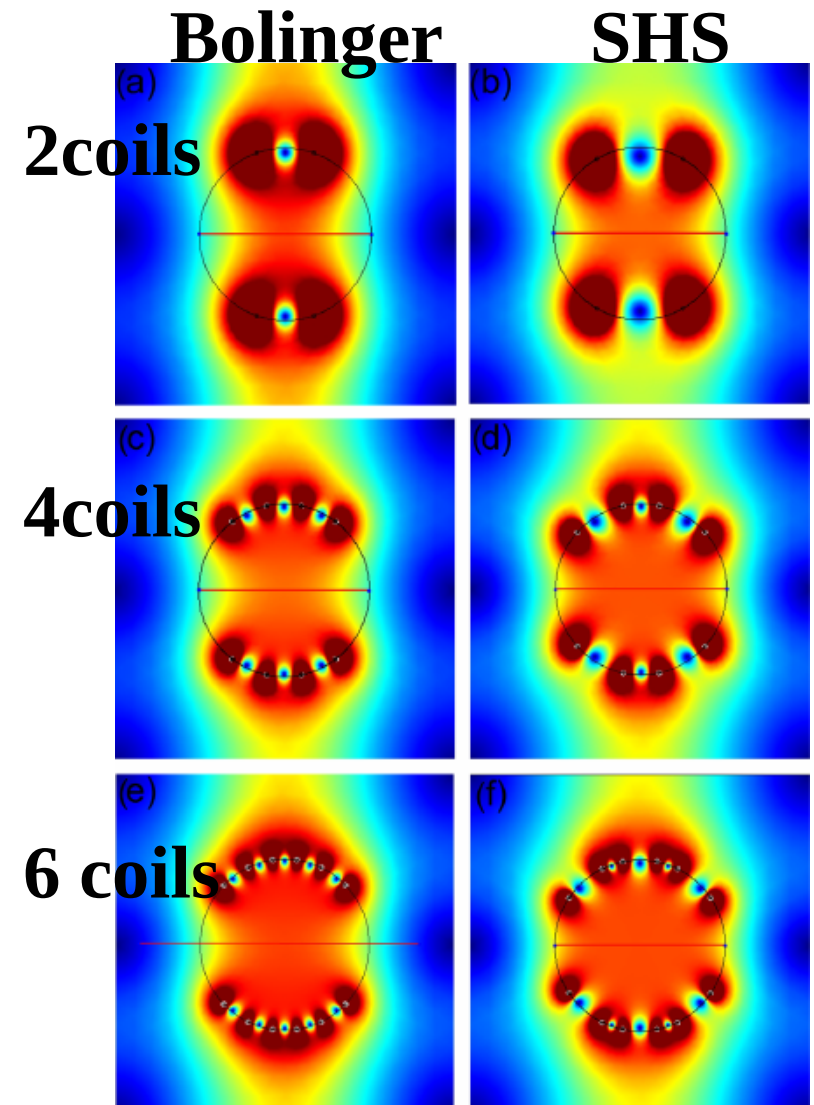
$$I_1 \cos(3\theta_1) + I_2 \cos(3\theta_2) = 0$$

$$I_1 \cos(5\theta_1) + I_2 \cos(5\theta_2) = 0$$

$$I_1 \cos(7\theta_1) + I_2 \cos(7\theta_2) = 0$$

Bobines cosine méthode de Space Harmonics Suppression(*):

1 % Homogénéité - % de $\Delta R/(2R)$	
Bolinger (2 coils)	10 %
Helmholtz (2 coils)	26,7 %
SHS (2 coils)	33 %
Bolinger (4 coils)	24 %
Hoult & Deslauriers (4 coils)	56 %
SHS (4 coils)	57 %
SHS (6 coils)	73 %

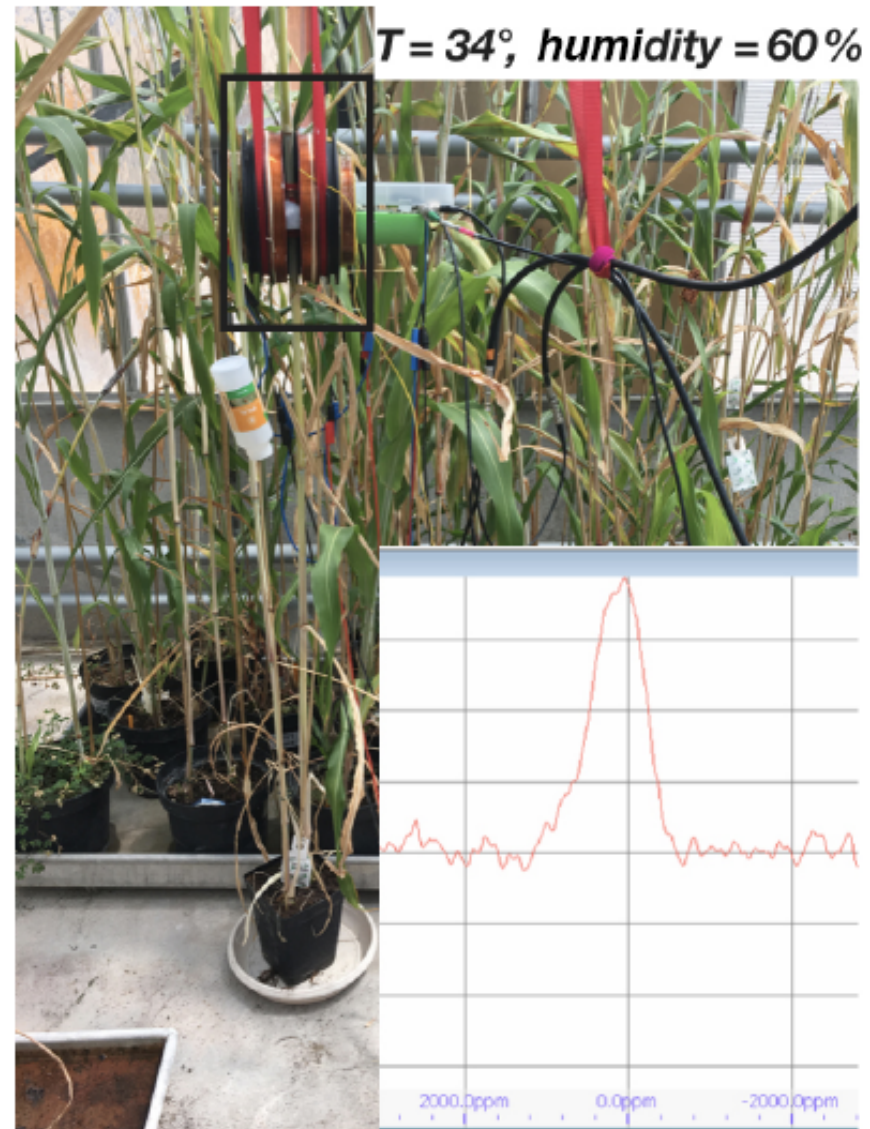
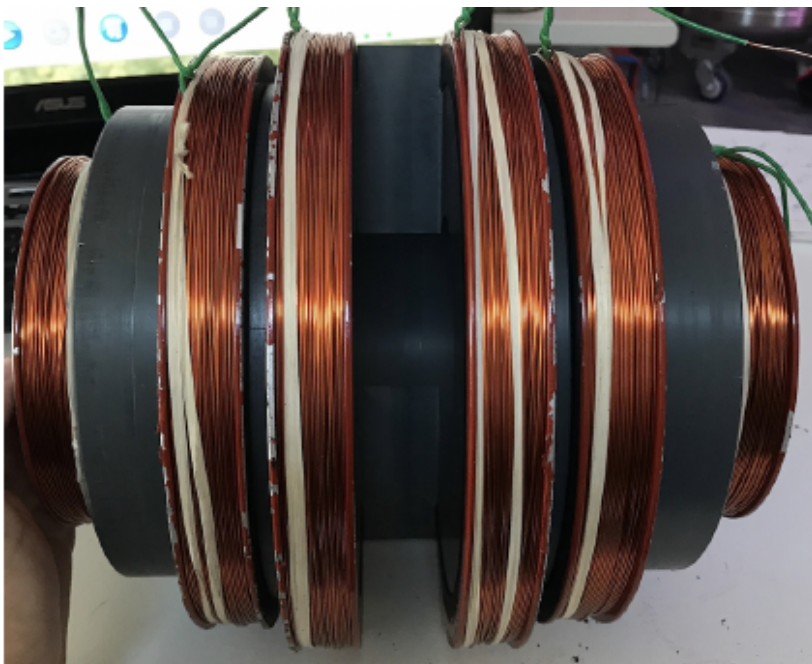


Vers un instrument de suivi des flux de sève dans les végétaux en condition agro-écologiques :

=> Bobines SHS 6 sphérique : 8mT

=> Homogénéité <900ppm dans 4cm³

=> échauffement limité $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$



La **RMN portable** pour étudier la croissance des végétaux *in naturae* dans des **conditions agroécologiques** :

Done :

- **Sonde RMN SHS + ampli bas bruit (Rx) et ampli Tx**

Under Progress :

- **Séquenceur « miniature » (RS2D)**
- **Implémentation des gradients de champ magnétique :**
 - **Méthode de mesure de flux de sève flip-flop**
- **Gestion de l'énergie autonome**

=> **Quels capteurs magnétiques pour quelles applications au service de la transition écologique ?**

=> **Vers une ingénierie « EcoTronique » ?**

MERCI !

Des Questions ?