



HAL
open science

Cartographies des temps de relaxation T2 sur des images IRM par la méthode de maximisation d'entropie

G. Henry

► **To cite this version:**

G. Henry. Cartographies des temps de relaxation T2 sur des images IRM par la méthode de maximisation d'entropie. Sciences de l'environnement. 2015. hal-02601965

HAL Id: hal-02601965

<https://hal.inrae.fr/hal-02601965>

Submitted on 16 May 2020

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.

INSA

INSA RENNES

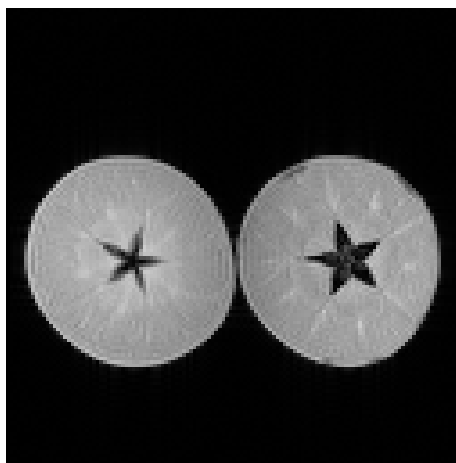


IRSTEA

STAGE : CARTOGRAPHIES DES TEMPS DE RELAXATION
T2 SUR DES IMAGES IRM PAR LA MÉTHODE DE
MAXIMISATION D'ENTROPIE

Rapport de stage

01/06/2015 - 18/08/2015



Auteur :
Gwendal Henry
Correspondant INSA :
Luce MORIN

Responsables :
Guylaine COLLEWET
Maja MUSSE
Stéphane QUELLEC

Table des matières

1	Introduction	4
1.1	Présentation d'Irstea	4
1.2	Objectifs du stage	5
2	Introduction aux signaux IRM	6
2.1	Acquisition des images	6
2.2	Traitement MEM	8
2.3	Bruit en IRM	9
3	Simulation de MEM	9
3.1	Méthode de simulation	10
3.2	Résultats	11
4	Correction de phase	13
5	Reconstruction des cartographies	15
5.1	Problèmes rencontrés	15
5.1.1	Pic parasite	15
5.1.2	Pic doublé	16
5.2	Résultats	16
5.3	Cartographies après une correction de phase	17
6	Conclusion	18

Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe d'Irstea pour leur accueil pendant la durée de mon stage.

Je remercie mes encadrants Mme Guylaine Collewet, Mme Maja Musse et M. Stéphane Quellec qui m'ont beaucoup appris sur le fonctionnement de l'IRM et qui m'ont accordé une grande autonomie pour l'étude du sujet de ce stage.

1 Introduction

1.1 Présentation d'Irstea

L'Institut national de Recherche en Sciences et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) est un organisme de recherche spécialisé en sciences et technologies pour l'environnement. Il est constitué de neuf centres, dont un à Rennes.

Le centre de Rennes d'Irstea est implanté sur le site de Rennes Beaugard. Il est constitué de deux unités de recherche (UR).

- UR GERE : Gestion environnementale et traitement biologique des déchets
- UR TERE : Technologie des équipements agro-alimentaires

L'unité TERE se consacre à l'amélioration et à la maîtrise de la qualité des matières premières et des produits agroalimentaires lors de leur transformation et de leur conservation. Elle développe des connaissances et des méthodologies en mécanique des fluides (aérodynamique) et pour la caractérisation non invasive des produits et procédés (RMN/IRM).

L'équipe de recherche ACTA mène des recherches portant sur la maîtrise des écoulements et des transferts de masse et de chaleur pour préserver l'hygiène des aliments. L'objectif est de préserver les aliments contre la contamination et le développement microbien, en particulier par la maîtrise des conditions physiques de température et de pollution sur et autour des aliments et des chaînes de production.

La deuxième équipe de recherche, IRMFood, a pour objectif d'apporter au secteur agroalimentaire une expertise s'appuyant sur le développement d'outils non invasifs tels que la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) et l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), pour mieux connaître les mécanismes de mise en place des structures internes (exemple figure 1) et les conséquences sur la qualité et la sûreté des produits.



FIGURE 1 – IRM Siemens avec un four pour l'étude de la cuisson du pain

1.2 Objectifs du stage

En résonance magnétique nucléaire, les signaux récupérés sont des décroissances exponentielles définies par des constantes de temps T_1 , T_2 et des intensités I . L'objectif du stage est d'étudier le calcul des cartographies des temps de relaxation T_2 et des intensités correspondantes I sur des images IRM avec un algorithme de maximisation d'entropie, aussi appelé MEM pour Maximum Entropy Method.

La formule (1) montre le signal de décroissance en fonction du temps pour un voxel. Il faut retrouver les constantes T_{2_k} et I_k . Les valeurs de ces constantes donnent des informations sur les tissus analysés, on peut en déduire par exemple les proportions de gras et de muscle pour des images de viande ou l'état et la proportion de l'eau dans les tissus pour des végétaux. Pour ce stage, l'étude porte sur les pommes qui sert de modèle pour les tissus végétaux.

$$S(t) = \sum_k I_k e^{-\frac{t}{T_{2_k}}} \quad (1)$$

Jusqu'à présent l'algorithme de Levenberg-Marquardt était utilisé pour retrouver les valeurs des constantes mais cette méthode présente plusieurs inconvénients. Il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance du résultat final. En effet, il faut connaître le nombre de décroissances exponentielles dans le signal et initialiser les constantes T_{2_k} et I_k à des valeurs assez proches des bonnes valeurs, sinon l'algorithme peut soit diverger soit converger sur des valeurs fausses.

Il faut donc une connaissance assez forte du modèle pour obtenir des cartographies correctes. La méthode de maximisation d'entropie permet de s'affranchir de cela : il n'y a pas besoin de savoir le nombre de composantes exponentielles.

Plusieurs simulations seront faites pour étudier le comportement de la méthode de maximisation d'entropie en fonction du niveau de bruit et de la taille de la ROI (Region Of Interest, la région des pixels analysés).

2 Introduction aux signaux IRM

2.1 Acquisition des images

L'acquisition des images IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) repose sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire. Les protons, quand ils sont soumis à un champ magnétique peuvent être excités avec une impulsion d'onde électromagnétique à une fréquence bien précise. Une fois l'excitation relâchée, Les protons se relaxent selon deux constantes de temps T_1 et T_2 appelés temps de relaxation.

En jouant sur les valeurs du champ magnétique, sur les fréquences et les phases des ondes électromagnétiques, on peut construire une image sur le principe de résonance magnétique. Il faut cependant utiliser une transformée de Fourier inverse pour reconstruire l'image. Les images obtenues en imagerie par résonance magnétique (IRM) sont donc des images complexes, on récupère le module et la phase pour chaque pixel.

Le signal module est utilisé le plus souvent car il est le plus exploitable : il est composé d'une ou de plusieurs décroissances exponentielles. L'échantillonnage du signal se fait à des temps d'écho. En imagerie quantitative, une mesure est faite après chaque temps d'écho Te , on n'acquiert donc pas qu'une seule image mais une image pour chaque écho. Sur les images de pomme, on fixe le Te à 6,5 ms, et l'acquisition s'arrête au bout de 512 échos, soit 3328 ms.

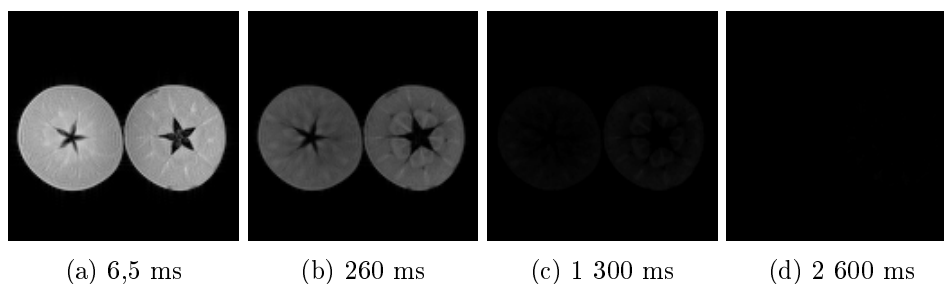


FIGURE 2 – Exemple d'acquisition sur deux pommes, signal en module

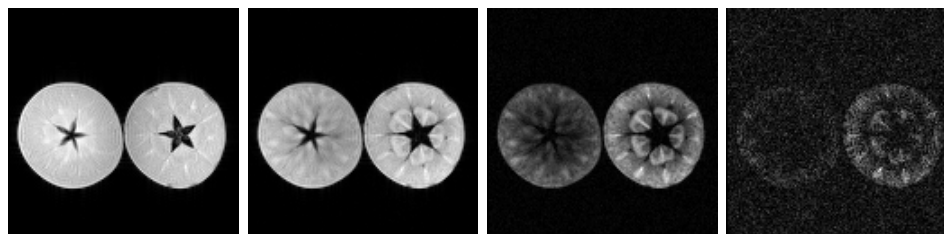


FIGURE 3 – Mêmes images mais en augmentant le contraste

On observe le phénomène de décroissance avec la figure 2. Le contraste des images peut être augmenté pour mieux voir les différences de tissus, voir figure 3.

Le coeur de la pomme contient les pépins, dans une poche d'air donc il n'y a presque aucun signal. On peut observer la structure de la pomme au bout d'un certain temps car les temps T_2 ne sont pas identiques en fonction du type de tissu dans la pomme. Le contraste entre les différents tissus devient plus important. On observe sur le dernier échantillon qu'il y a un bruit de fond, il y a le même bruit sur les autres images, mais il apparaît sur la dernière image car le rapport signal sur bruit est plus faible et que le contraste est augmenté.

Un pixel peut avoir plusieurs composantes exponentielles en fonction de l'état de l'eau dans la matière. L'eau est principalement à l'intérieur des cellules dans des tissus végétaux. C'est la cellule qui est compartimentée et les principaux compartiments sont la vacuole (environ 80 % de l'eau), le cytosol et la paroi. Ce sont ces trois compartiments qu'on pense distinguer dans les trois décroissances du signal IRM.

Chaque décroissance possède une constante de temps de relaxation T_{2k} et d'une intensité I_k qui correspond à la proportion de protons dans cet état. La figure 4 montre un signal en module (avec du bruit) pour un voxel dans une pomme, le modèle utilisé pour cette courbe est l'équation (2), où $b(t)$ est le bruit.

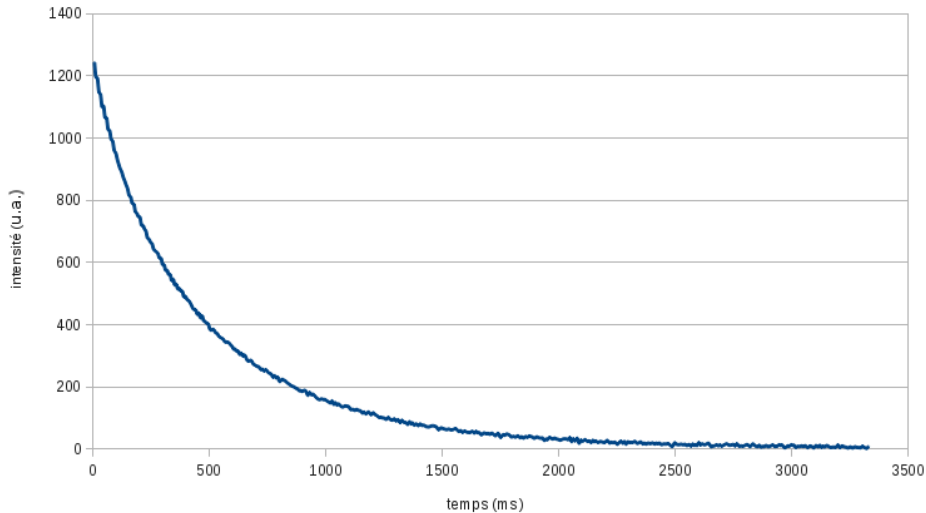


FIGURE 4 – Signal d'un pixel, en module

$$S(t) = I_1 e^{-\frac{t}{T_{21}}} + I_2 e^{-\frac{t}{T_{22}}} + I_3 e^{-\frac{t}{T_{23}}} + b(t) \quad (2)$$

Les constantes des temps de relaxation donnent des informations sur les tissus. Pour retrouver les valeurs, une méthode classique est de faire une regression avec les moindres carrés. Pour la pomme par exemple, on sait qu'il y a une triple décroissance exponentielle. On peut appliquer l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour retrouver les six constantes T_{21} , I_1 , T_{22} , I_2 , T_{23} et I_3 .

2.2 Traitement MEM

Une autre approche est de considérer qu'il y a un spectre de distribution des temps de relaxation. On ne considère plus seulement trois composantes mais une distribution continue. Le signal est construit avec la formule 3. L'algorithme MEM permet de retrouver le spectre le plus probable en maximisant l'entropie du spectre des temps de relaxation, exemple figure 5. Les constantes de relaxation sont retrouvées en faisant une extraction de spectre, un algorithme trouve les valeurs T_2 des pics et les aires des pics qui correspondent aux intensités.

$$S(t) = \int P(T) e^{-\frac{t}{T}} dT \quad \text{avec } P(T) \text{ le spectre de distribution} \quad (3)$$

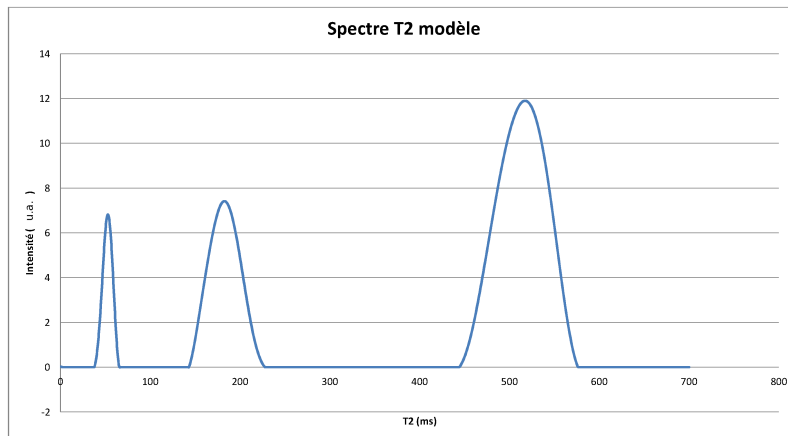


FIGURE 5 – Spectre des T_2 pour la chair d'une pomme

2.3 Bruit en IRM

Lors de l'acquisition, il y a un bruit gaussien sur la partie réelle et sur la partie imaginaire du signal, de paramètre σ . Le signal module présente donc un bruit ricien. Quand le rapport signal sur bruit est élevé, le bruit ricien est équivalent au bruit gaussien mais ce n'est plus le cas quand le signal est faible, ce qui arrive toujours en IRM, à la fin de la relaxation. La différence entre les deux types de bruit est montrée sur la figure 6 pour une décroissance simulée.

Ce bruit ricien pose un problème quand on recherche les temps de relaxation puisque ce bruit, quand le signal devient faible, n'est pas centré sur zéro, mais sur une valeur positive proche de $\sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}}$. Il introduit un léger offset quand le signal devient faible, il n'est pas possible de l'éliminer par un simple moyennage du signal sur une ROI (Region Of Interest). Sur la figure 6, l'offset dû au bruit ricien est proche de 12 unités arbitraires à la fin de la décroissance, pour un signal qui au début de la relaxation est à 1300 u.a.

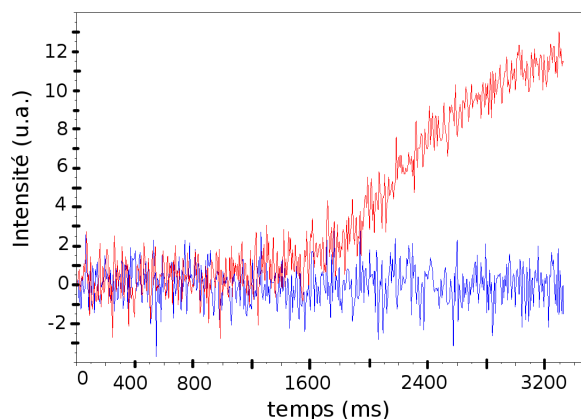


FIGURE 6 – Bruit gaussien en bleu et bruit ricien en rouge

Dans la partie Correction de phase, on introduit une méthode pour revenir à un bruit gaussien à partir des images de modules et de phases.

3 Simulation de MEM

Les simulations des algorithmes vont nous permettre de connaître le comportement en fonction de plusieurs paramètres. Deux implémentations de MEM sont testées, l'une codée sous Scilab et l'autre codée sous Matlab et développée par l'équipe ADTSI de l'IRCCyN (Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes). L'algorithme Scilab utilise un modèle avec offset, c'est-à-dire que l'algorithme recherche à la fois une dis-

tribution de T_2 et une constante (appelé P_0) pour minimiser l'écart entre le signal fourni et le modèle théorique. L'implémentation de MEM sous Matlab est un modèle sans offset, il ne recherche que la distribution de T_2 .

3.1 Méthode de simulation

Nous avons utilisé un spectre obtenu à partir des images IRM d'une pomme Granny Smith avec dix accumulations (moyennage temporel). Une suite de dix acquisitions IRM est faite et les parties réelles et imaginaires sont moyennées. Cela permet de réduire le niveau du bruit ricien.

On détermine une ROI sur une partie homogène de la pomme, le parenchyme intérieur par exemple (comme illustré figure 7). Avec le logiciel imageJ, on extrait le signal moyenné sur la ROI et on détermine le spectre T_2 avec l'algorithme MEM sur Scilab et une détection de pic automatique. Les valeurs du spectre sont extraites et sauvegardées dans un fichier.

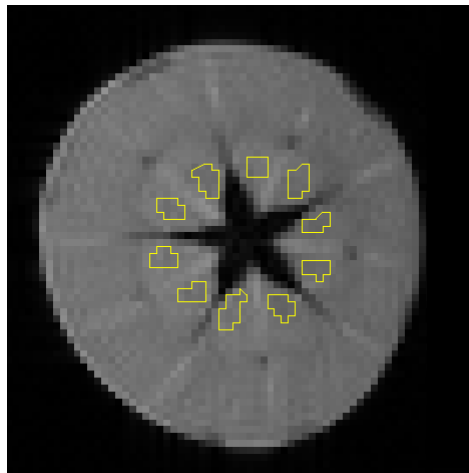


FIGURE 7 – ROI sur la partie intérieure d'une pomme

Pour les simulations, nous comparerons les valeurs retrouvées par les algorithmes, aux valeurs du spectre modèle. Ces valeurs sont déterminées avec un algorithme de détection de pics.

	T_2 (ms)	I (ua)
1 ^e pic	52	94
2 ^e pic	182	331
3 ^e pic	516	860

On étudie l'influence de plusieurs paramètres sur les performances de MEM :

- le type de bruit (gaussien ou ricien)
- Taille de la ROI
- Niveau de bruit

On utilise un script Scilab pour générer 10 000 fichiers de décroissance à partir du spectre modèle en rajoutant du bruit gaussien ou du bruit ricien. Le nommage des fichiers permet un traitement par lot. Le traitement MEM dure plus de dix heures dans nos conditions.

3.2 Résultats

Beaucoup de paramètres ont été testés mais ce rapport ne présente que quelques exemples de résultats. Pour chaque simulation, un script analyse le nombre de pics trouvés et calcule les moyennes et écarts-types des constantes T_{2k} et I_k .

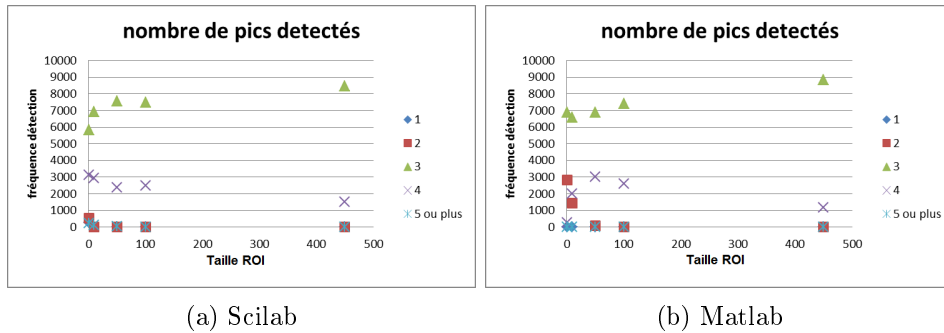


FIGURE 8 – Fréquence de détection du nombre de pics, en fonction de la taille de la ROI, bruit gaussien

Les figures 8a et 8b représentent pour les deux implémentations de MEM la fréquence de détection pour 1, 2, 3, 4, 5 et plus pics en fonction de la taille de la ROI dans le cas du bruit gaussien. Quand la taille de la ROI augmente (donc en même temps le rapport signal sur bruit) la détection est meilleure : l’algorithme MEM retrouve plus souvent 3 pics. Il y a une différence entre les deux algorithmes : MEM Scilab détecte soit 3 soit 4 pics alors que MEM Matlab détecte assez souvent 2 pics quand la ROI est faible : le pic avec le T_2 le plus court n’est pas retrouvé par l’algorithme

Un quatrième pic est trouvé dans au moins 10 % des cas, avec les deux implémentations de MEM. Il n’a pas pourtant pas d’existence réelle, puisqu’on est parti d’un spectre modèle avec trois composantes. Il correspond très souvent à un T_2 très faible, en général inférieur à 5 ms. Le premier échantillon est pris à 6.5 ms et est donc plus grand que ce T_2 : il ne faut pas tenir compte de ce «pic parasite», voir figure 9 pour un exemple de ce phénomène.

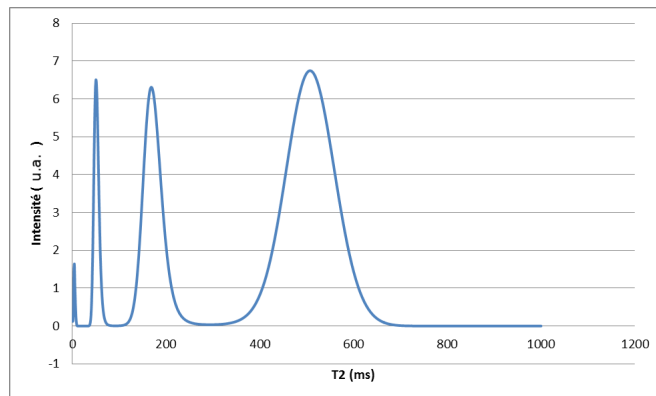


FIGURE 9 – Exemple spectre T_2 avec un pic parasite avec un T_2 court

Les performances de MEM pour le cas du bruit ricien sont plus difficiles à interpréter. Les deux implémentations n'ont pas le même modèle : MEM Scilab est un modèle avec offset et MEM Matlab est sans offset. L'algorithme sur Scilab va mieux réagir au bruit ricien, puisqu'il va éliminer l'offset dû au bruit. MEM Matlab essaye de minimiser l'écart entre le modèle et les données : il doit donc trouver une distribution T_2 qui simule un offset. Cela se fait avec les temps T_2 les plus longs (donc proche de la limite supérieure de distribution, ici toujours fixée à 1 sec).

La conséquence est que MEM Matlab détecte systématiquement un pic supplémentaire pour compenser l'offset dans le cas du bruit ricien. Ce pic introduit un biais sur toutes les autres valeurs (voir figure 10).

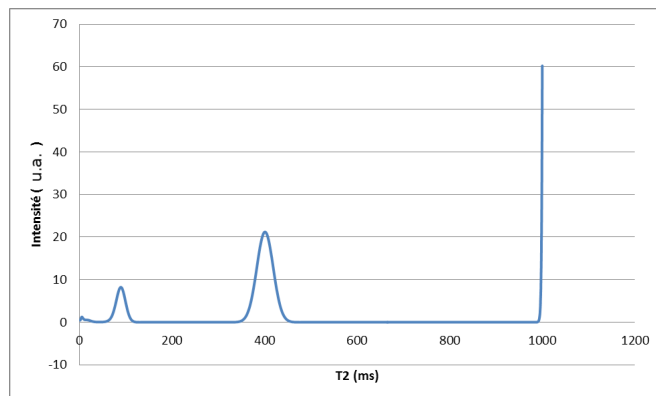


FIGURE 10 – Exemple spectre T_2 avec un pic de compensation d'offset (bruit ricien)

En regardant le nombre de pics qui sont détectés par MEM Matlab avec du bruit ricien (figure 11), on constate effectivement que la détection de 4 pics est très fréquente et surtout avec une ROI petite. Il est alors très complexe

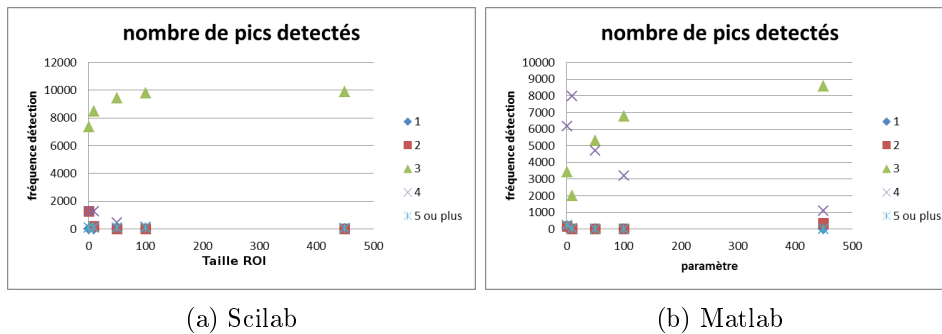


FIGURE 11 – Fréquence de détection du nombre de pics, en fonction de la taille de la ROI, bruit ricien

d’analyser les performances de l’algorithme puisqu’on ne sait pas à priori si le quatrième pic détecté correspond au «pic offset» avec un T_2 très long ou au «pic parasite» avec un T_2 très court.

De la même façon, quand 3 pics sont détectés, on ne sait pas si ce sont effectivement les 3 pics attendus ou alors si MEM a détecté 2 «vrais» pics et le troisième pic est la compensation de l’offset (c’est souvent ce cas de figure qui se présente en fait). Il est très difficile de comparer les valeurs trouvées et les valeurs cibles, on est obligé de «trier» les valeurs pour soit les considérer comme correctes soit les refuser car elles ne sont que des artefacts. Nous verrons que pour la construction de la cartographie, ce problème est très difficile à résoudre.

4 Correction de phase

Les parties réelle et imaginaire du signal d’un pixel ont l’avantage d’avoir un bruit gaussien, donc centré sur zéro, mais ne sont pas facilement exploitables. La correction de phase est une technique pour transformer les images en module en images réelles pour avoir un bruit gaussien, tout en conservant l’information du signal module.

Le principe le plus simple de la correction de phase est de considérer que la phase d’un pixel est constante dans le temps (voir figure 12a) et de faire une rotation du signal complexe pour le ramener sur l’axe des réels. La technique consiste à retirer la phase initiale (la première image de phase) à chacune des autres images de phases.

Le premier écho, après la correction, possède donc une phase nulle, et les autres échos ont une phase qui varie autour de zéro. Quand le signal devient très faible, il est logique que la phase oscille beaucoup.

On retrouve bien la même forme que le signal module avec la décroissance exponentielle avec les mêmes constantes T_2 , voir figure 13. De plus le bruit obtenu est gaussien, voir l'histogramme du bruit à la fin de la décroissance sur figure 14. Le bruit est centré sur zéro, on observe cependant des «pics» dans l'histogramme qui sont peut-être dus à des arrondis.

Dans le cas où l'hypothèse de la phase constante dans le temps n'est pas valable d'autres approches sont envisagées. On peut par exemple séparer le cas des images paires et des images impaires pour éviter un phénomène d'oscillation de phase qui semble être lié à la parité de l'écho. Le principe reste le même, on corrige la phase des images impaires avec la première image et la phase des paires avec la deuxième image.

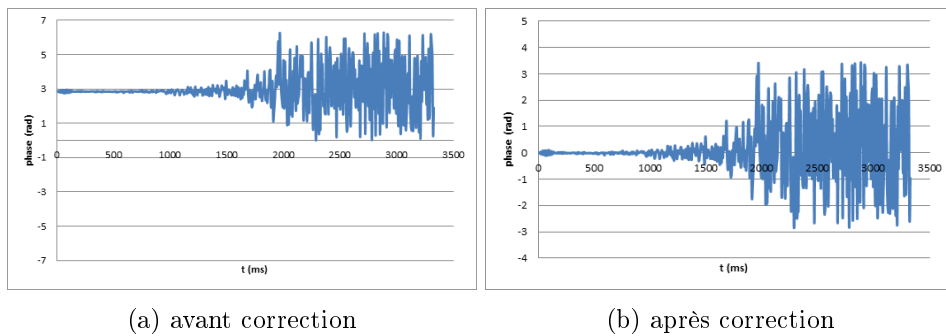


FIGURE 12 – Phase en radians d'un pixel

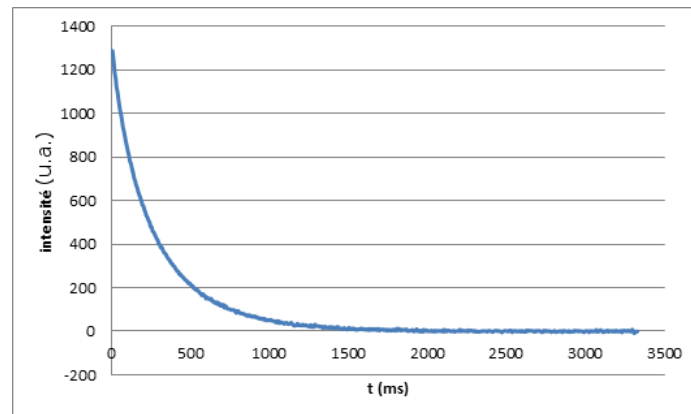


FIGURE 13 – Signal réel, après correction de phase

5 Reconstruction des cartographies

Pour établir une cartographie T_2 , la première étape est d'extraire les signaux pour le traitement par MEM. On utilise un script Scilab qui extrait, pour chaque pixel des images IRM, un signal et l'enregistre dans un fichier. Le script applique un masque sur les pixels qui ont un signal trop faible, cela élimine le bruit de fond et la partie centrale de la pomme avec les pépins.

Une fois les signaux extraits, on applique MEM sur l'ensemble des fichiers de signaux et on obtient les fichiers de spectre, les informations sont extraites de ces spectres : les pics sont détectés et les valeurs des T_{2k} et des I_k sont enregistrées.

Pour produire les cartographies, il est nécessaire d'appliquer une correction aux informations enregistrées. En effet, avec MEM, le nombre de pics détectés est quelquefois faussé à cause des pics parasites et quelquefois l'algorithme n'a pas pu retrouver une composante.

5.1 Problèmes rencontrés

5.1.1 Pic parasite

Cette erreur est la plus facile à éliminer, il faut analyser les valeurs des T_2 et éliminer les pics quand le T_2 est aberrant. On peut, par exemple dans le cas de la pomme, éliminer les pics avec un T_2 inférieur à 10 ms et supérieur à 950 ms.

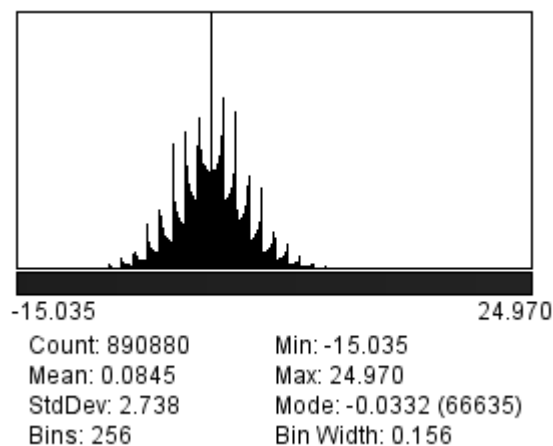


FIGURE 14 – Histogramme du bruit de fond après correction de phase

5.1.2 Pic doublé

Quelquefois, pour un seul pic physique réel, on peut avoir deux pics de détectés. Ils correspondent au même temps de relaxation T_2 mais il y a une variation de la courbe, comme on peut la voir sur la figure 16b. Le nombre de pics trouvés n'est donc pas bon et tous les pics sont décalés. On doit fusionner les pics s'ils sont trop proches.

5.2 Résultats

En appliquant les corrections dans l'extraction des informations, les cartographies sont plus correctes, voir figure 17. On remarque que la cartographie pour T_{2_3} est très correcte. C'est logique car ce pic correspond à plus de trois quarts de la puissance du signal. Les cartographies en T_{2_1} et en T_{2_2} ne sont pas aussi bien, elles présentent des trous car MEM n'a pas toujours détecté le pic correspondant.

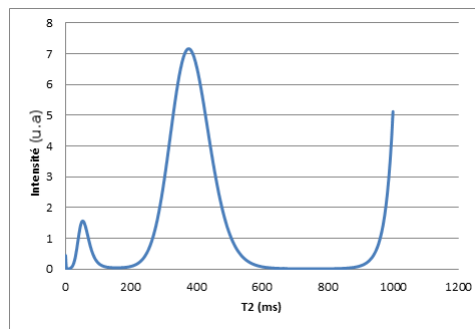
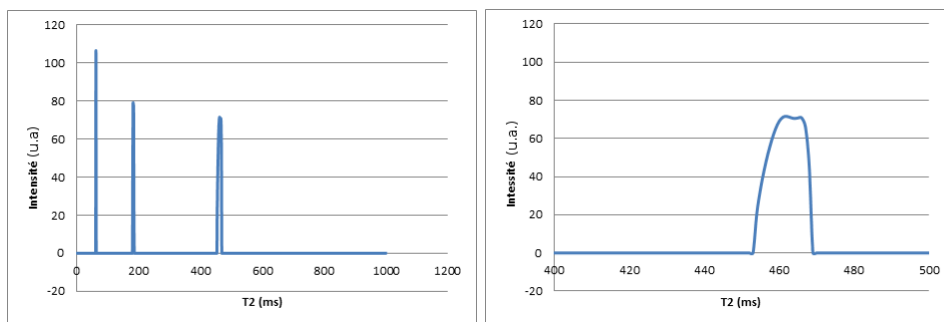


FIGURE 15 – Spectre avec pic pour compenser l'offset dû au bruit ricien



(a) spectre correct avec 3 composantes (b) détection de 2 pics au lieu de 1

FIGURE 16 – Spectre avec une mauvaise détection de pic

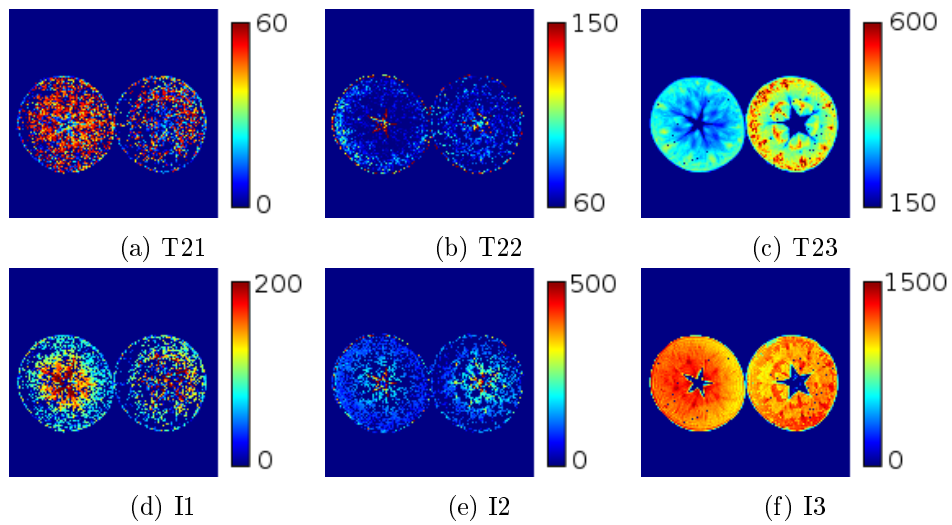


FIGURE 17 – Cartographies de deux pommes, obtenu avec MEM

5.3 Cartographies après une correction de phase

Les cartographies ont aussi été calculées pour des images réelles, après une correction de phase. Elles sont moins bonnes, il y a plus de trous et elles sont bruitées, voir par exemple la comparaison des cartographies T_{23} sur la figure 18. La correction de phase introduite est trop simple, il existe des techniques plus complexes qui permettraient d'améliorer le calcul des cartographies.

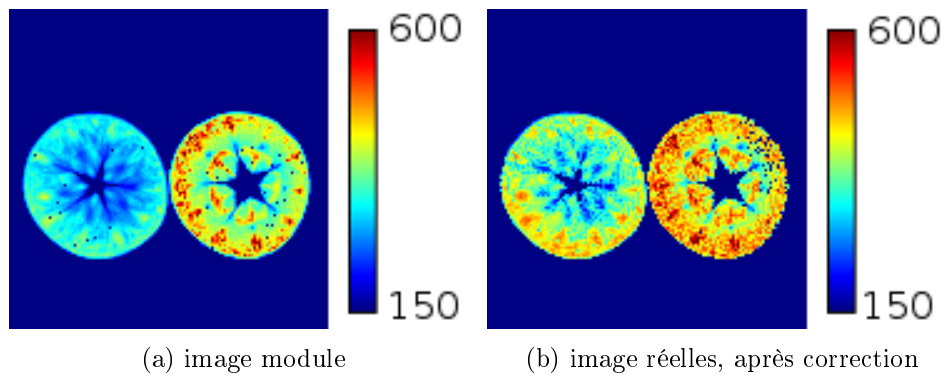


FIGURE 18 – Comparaison T_{23}

6 Conclusion

Plusieurs pistes d'amélioration se présentent pour le calcul des cartographies avec MEM. Utiliser une échelle de temps logarithmique permettrait d'améliorer les calculs sur les T_2 courts. La correction de phase permet d'analyser les signaux avec du bruit gaussien, ce qui enlève le problème de l'offset et du pic de compensation d'offset, il faut cependant essayer une correction de phase plus performante mais plus complexe.

Une autre option à explorer est de tronquer les signaux, c'est-à-dire de ne conserver que les n premiers points. Cela permet de se concentrer uniquement sur la partie du signal qui possède le plus d'informations : dans cette partie du signal, le bruit rien est équivalent à un bruit gaussien, il n'y a donc pas de problème d'offset. Il faut cependant adapter les algorithmes pour traiter seulement une partie des signaux. Cela implique notamment des changements dans les conditions d'arrêt de l'algorithme MEM.

Ce stage m'a permis de comprendre le fonctionnement d'un laboratoire de recherche. J'ai eu une grande autonomie pour l'approche du sujet de ce stage, c'était très intéressant d'utiliser une méthode qui jusqu'à présent n'était pas appliquée aux images IRM. Pour cela, j'ai dû revoir du code source et comprendre un algorithme de traitement du signal spécifique aux signaux de résonance magnétique nucléaire.

Gwendal Henry

IRSTEA
RENNES (35000)

juin à août 2015

Resumé

Cartographies des temps de relaxation T_2 sur des images IRM par la méthode de maximisation d'entropie

Les signaux en IRM sont des décroissances multi-exponentielles et les constantes de temps de relaxation donnent beaucoup d'informations sur les tissus analysés. Faire une cartographie de ces constantes permet d'analyser spatialement les aliments. L'algorithme de Levenberg-Marquardt est généralement utilisé pour retrouver les valeurs des constantes.

La méthode de maximisation d'entropie possède plusieurs avantages par rapport à l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Il n'y a pas besoin d'avoir une connaissance à priori du nombre de composantes exponentielles et l'algorithme n'a pas besoin d'être initialisé. Le but est d'établir automatiquement une cartographie uniquement à partir des images IRM. Mais cette méthode est plus complexe à appliquer, notamment à cause du bruit présent en IRM.

Ce stage est un premier essai pour l'application de la méthode de maximisation d'entropie pour établir des cartographies des temps de relaxation.

Abstract

Cartographies of the relaxation times T_2 on MRI images with the maximum entropy method

the signals in MRI are multi-exponential decreases and the relaxation time constants provide many information on the tissues. The cartographies of those constants allow one to spatially analyze the aliments. The Levenberg-Marquardt algorithm is usually used to find the values of the constants.

The maximum entropy method present several advantage compare to the Levenberg-Marquardt algorithm. The number of exponential components is not set and the algorithm is not initialized. The goal is to establish a cartography only from the MRI images. However, the method is more complex to use, partly due to the noise in MRI.

This internship is a first try on the application of the maximum entropy method to establish the cartographies of the relaxation times.