

# DOCTISS

ECOLE DOCTORALE INFORMATION STRUCTURES SYSTEMES

[www.edi2s.univ-montp2.fr](http://www.edi2s.univ-montp2.fr)

---

Le 9 avril 2009



Actes  
de la 17<sup>ème</sup>  
Journée  
doctiss

---

[www.doctiss.fr](http://www.doctiss.fr)

# Table des matières

<b>Mathématiques</b>	<b>2</b>
Contrôle asymptotique des trajectoires continues de type gradient, Hassan MCHEIK, I3M . . . . .	2
Un invariant géométrique : la courbure de Gauss, Benoît MICHEL, I3M . . . . .	8
<b>Biostatistique</b>	<b>13</b>
Un modèle markovien individu centré simple de dynamique de forêt, Khader KHADRAOUI, UMR ASB / INRA	13
Une approche de type k -plus proches voisins pour la régression fonctionnelle, Thomas LALOË, I3M . . . . .	19
Estimation de régularité locale, Rémi SERVIEN, I3M . . . . .	22
<b>Informatique</b>	<b>27</b>
Introduction de la négation atomique dans les graphes conceptuels, Khalil BEN MOHAMED, LIRMM . . . . .	27
Propriétés combinatoires des reseaux phylogénétiques de niveau k, Philippe GAMBETTE, LIRMM . . . . .	31
Aide la décision pour les domaines environnementaux, mise en place de chaînes de traitements pour la traçabilité et le diagnostic, Yuan LIN, LIRMM . . . . .	36
<b>Systèmes Automatiques et Microélectronique</b>	<b>41</b>
Suivi du coeur battant pour la chirurgie cardiaque robotisée, Rogério RICHA, LIRMM . . . . .	41
<b>Électronique</b>	<b>44</b>
Capteur acoustique résonant pour estimer les propriétés d'élasticité du tissu musculaire, Hugues BLASCO, IES	44
Détermination de la teneur en eau du miel grâce aux ondes acoustiques, Vivian CERESER CAMARA, IES MIRA	48
Influence de la Technologie du composant sur les performances laser, Alban GASSENQ, IES NANOMIR . . .	51
Électronique de puissance : multi échelle, multi usage, multi domaine, et enfin, plus spécifiquement à l'IES	
GEM : multicellulaire, Bertrand GÉLIS, IES GEM . . . . .	55
Prédiction par la Méthode des Débits Commutés de la dégradation des paramètres électriques de composants électroniques en technologie bipolaires soumis à un environnement radiatif, Yago GONZALEZ VELO, IES	60
Mise au point d'un système innovant de spectroscopie d'absorption multigaz par diodes lasers accordables dans le moyen infrarouge, Mohammad JAHJAH, IES . . . . .	65
<b>Mécanique / Génie civil</b>	<b>68</b>
Une approche expérimentale multi-physiques en soudage à l'arc sous flux gazeux, Julien CHAPUIS, LMGC .	68
Microfibril angle of cell wall in Eucalyptus wood : implication on breeding programs, Paulo Ricardo GHERARDI HEIN, CIRAD PERSYST / LMGC-MAB . . . . .	73
Contribution de la mécanique à la conservation du patrimoine culturel, Bertrand MARCON, LMGC . . . . .	77
Étude et modélisation de la fissuration à chaud en soudage, Aurélie NIEL, LMGC . . . . .	81
<b>Physique</b>	<b>86</b>
Capteurs optiques appliqués à la détection de biomolécules, Caroline DESFOURS, GES . . . . .	86
Raies polarisées de l'hydrogène en émission dans les étoiles Miras : un mystère derrière le choc, Nicolas FABAS, GRAAL . . . . .	90
Effet du recuit post-croissance sur l'anisotropie magnétique dans les films minces de $Ga_{1-x}Mn_xAs$ , Souleymane KAMARA, GES . . . . .	94
Détection de radiations Terahertz par les ondes de plasma dans des nano transistors et applications à l'imagerie, Salman NADAR, GES . . . . .	98
Astronomie $\gamma$ avec l'expérience embarquée en satellite <i>Fermi</i> , Véronique PELASSA, LPTA . . . . .	102
Émission et détection d'ondes TéraHertz par des transistors, Hadley VIDELIER, GES . . . . .	107

DOCTISS 2009

# Contrôle asymptotique des trajectoires continues de type gradient

Hassan MCHEIK <sup>1</sup> (Doctorant 3ème année)  
Marc-Olivier CZARNECKI <sup>2</sup> (Directeur de thèse)

Institut de Mathématiques et de Modélisation de Montpellier (I3M)  
Université de Montpellier II  
34095 MONTPELLIER cedex, France

<sup>1</sup>hmcheik@math.univ-montp2.fr  
<sup>2</sup>marco@math.univ-montp2.fr

**Résumé— On étudie le système dynamique dissipatif non linéaire (HBF) :  $\ddot{x}(t) + \lambda\dot{x}(t) + \nabla\Phi(x(t)) = 0, \lambda > 0$  avec des conditions initiales et avec un regard vers les contraintes minimales sur la fonction  $\Phi$ . Les résultats concernant la convergence d'une solution vers un point critique sont données dans plusieurs situations variées, incluant quand  $\Phi$  est convexe (avec possibilités de plusieurs minimums) ou dans une fonction de morse (les points critiques deviennent  $n$  groupes de points minimums locaux)**

**Mots-clés— système dynamique dissipatif, optimisation, minimum local, minimisation convexe, contrôle asymptotique, système de gradient, fonction de morse**

## I INTRODUCTION

On considère  $H$  un espace d'Hilbert réel muni du produit scalaire et de la norme associée, notés par  $\langle, \rangle$  et  $|\cdot|$  respectivement soit  $\Phi : H \rightarrow \mathbb{R}$  continue différentiable, l'ensemble des points critiques de  $\Phi$  est l'ensemble des solutions de l'équation  $\nabla\Phi(x) = 0$ . On étudie l'équation de la boule pesante (en anglais "heavy ball with friction" (HBF))

$$\ddot{x}(t) + \lambda\dot{x}(t) + \nabla\Phi(x(t)) = 0$$

$\lambda > 0$

On définit l'énergie par

$$E(t) = \frac{1}{2} |\dot{x}(t)|^2 + \Phi(x(t))$$

qui vérifie

$$\dot{E}(t) = -\lambda |\dot{x}(t)|^2$$

## II PROBLÈME MECANIQUE ÉQUATION DE LA BOULE PESANTE

Soit  $M = (x(t), \Phi(x(t)))$  un point matériel de masse  $m$  et  $\Sigma = \text{graphe}(\Phi)$  et  $r(t)$  = le vecteur de position à l'instant  $t$

$$r(t) = (x(t), \Phi(x(t))); x(t) \in H.$$

Le PFD (principe fondamental de la dynamique) nous donne

$$m\ddot{r}(t) = \vec{G} + \vec{F} + \vec{R} \quad (2.1)$$

avec :

$\vec{R}$  : réaction =  $R\vec{n}$ ,  $\vec{F} = -\lambda\vec{r}(t)$  le vecteur de frottement

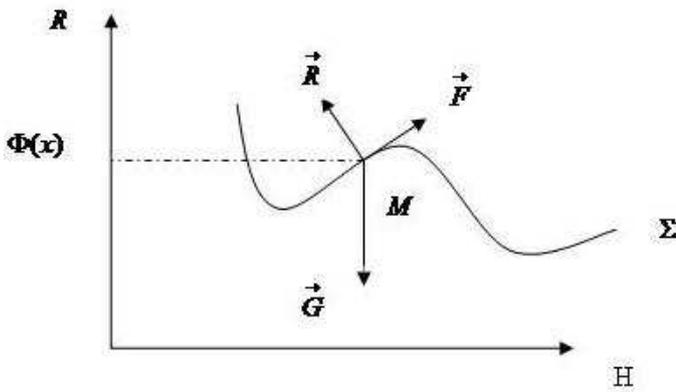
$\lambda > 0$  le coefficient de frottement,

$\vec{G} = (0, -mg)$  la force gravitationnelle,

$$\vec{n} = \frac{1}{\sqrt{1 + |\nabla\Phi(x)|^2}} (-\nabla\Phi(x), 1) \text{ le vecteur normal}$$

On s'intéresse avec les cas suivantes  $|\nabla\Phi(x)|$  et  $\dot{x}H_\Phi(x)\dot{x}$  sont négligables par rapport à 1.

L'interprétation des ces conditions est : le premier va nous aider à trouver l'ensemble des points limites dans un ensemble bien déterminé dépendant de  $\Phi$  (en général l'ensemble des points critiques de  $\Phi$ ) qui est  $\{x \in H \text{ tel que } \nabla\Phi(x) = 0\}$ , l'autre condition signifie que à partir d'un certain temps, la vitesse de la trajectoire devient très proche de zero.



On trouve les équations différentielles

$$m\ddot{x} = -\lambda\dot{x} - \frac{R}{\sqrt{1 + |\nabla\Phi(x)|^2}} \nabla\Phi(x) \quad (2.2)$$

$$m(\dot{x}H_{\Phi}(x)\dot{x} + \nabla\Phi(x)\ddot{x}) = -mg - \lambda\nabla\Phi(x)\dot{x} + \frac{R}{\sqrt{1 + |\nabla\Phi(x)|^2}}$$

$$R = m(g + \dot{x}\nabla\Phi(x)\dot{x}) \quad (2.3)$$

Donc dans cet article on s'intéresse à cette équation

$$\ddot{x} + \lambda\dot{x} + g\nabla\Phi(x) = 0$$

### III EXISTENCE GLOBALE

On considère l'équation suivante :

$$\ddot{x} + \lambda\dot{x} + g\nabla\Phi(x) = 0, \quad (3.1)$$

et les conditions  $H_{\Phi}$  :

$H_{\Phi}$  { (i) la fonction  $\Phi$  est de classe  $C^1$  sur  $H$   
(ii) la fonction  $\nabla\Phi$  Lipschitzienne sur les parties bornées de  $H$   
(iii) la fonction  $\Phi$  est bornée inférieurement sur  $H$  (minorée)

### III Existence globale avec de contrôle décroissante

**Théorème III.1.** Soit  $\Phi : H \rightarrow R$  une fonction qui vérifie les conditions  $(H_{\Phi})$ , alors On a alors les propriétés suivantes :

(i) Pour tout  $(x_0, \dot{x}_0)$  dans  $H \times H$ , il existe une solution unique  $x$  de (3.1) définie sur l'intervalle  $[0, +\infty[$ , et de classe  $C^2$  sur  $[0, +\infty[$ , qui vérifie les conditions initiales

$$x(0) = x_0, \quad \dot{x}(0) = \dot{x}_0$$

(ii) Pour toute trajectoire  $x(t)$  de (3.1), l'énergie correspondante  $E(t)$  est décroissante sur  $[0, +\infty[$ , minorée, converge vers  $E_{\infty}$  et en plus on a

$$\dot{x} \in L^{\infty}([0, \infty[; H) \cap L^2([0, \infty[; H)$$

(iii) Si en plus,  $x \in L^{\infty}([0, \infty[; H)$ , alors on a

$$\ddot{x}(t) \in L^{\infty}([0, \infty[; H) \text{ et}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{x}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \nabla\Phi(x(t)) = 0.$$

### III2 Idées de la preuve du théorème 3.1 et interprétations

i. évident (théorème Cauchy Lipschitz et les hypothèses sur  $\Phi$ )

ii.

$$E(t) = \frac{1}{2} \|\dot{x}(t)\|^2 + \Phi(x(t)) \quad (3.2)$$

On dérive l'énergie  $E$  du système dynamique, on obtient

$$\dot{E}(t) = -\lambda \|\dot{x}(t)\|^2 \quad (3.3)$$

alors ça nous donne que l'énergie est décroissante c'ad l'énergie diminue avec le temps vers une constante (régime permanente) alors

$$\frac{1}{2} \|\dot{x}(t)\|^2 \leq \frac{1}{2} \|\dot{x}_0\|^2 + \Phi(x_0) - \inf \Phi \quad (3.4)$$

$$\int_0^t |\dot{x}(s)|^2 ds \leq -\frac{1}{\lambda} \int_0^t \dot{E}(s) ds. \quad (3.5)$$

donc

$$\dot{x} \in L^{\infty}([0, \infty[; H) \cap L^2([0, \infty[; H)$$

Interprétation physique : le calcul nous montre que la vitesse de la trajectoire du système dynamique reste bornée indépendamment du temps, et l'augmentation et la diminution de la vitesse est de type  $\frac{1}{t^s}$  avec  $s > 1$  c'ad de type  $L^2$  entre l'instant d'augmentation et l'instant de diminution de vitesse.

iii. On a  $x \in L^{\infty}([0, \infty[; H)$  alors  $\nabla\Phi(x(t))$  est bornée car  $x$  est bornée. Alors d'après l'équation (3.1) et (ii) on a  $\ddot{x} \in L^{\infty}([0, \infty[; H)$ . interprétation : si on prend la trajectoire bornée on trouve que l'accélération de la trajectoire est bornée indépendamment du temps, et la vitesse  $(\vec{r})'(t)$  converge vers 0 quand  $t \rightarrow \infty$

On utilise le lemme suivant :

**Lemme III.2.** Si  $h \in L^2([0, \infty[; H)$  et  $\dot{h} \in L^{\infty}([0, \infty[; H)$ , alors  $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = 0$ .

D'après ce lemme on a  $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}(t) = 0$ .

Nous allons maintenant montrer que  $\lim_{t \rightarrow \infty} \nabla\phi(x(t)) = 0$ .

Soit

$$u_h(t) = \frac{\dot{x}(t+h) - \dot{x}(t)}{h}$$

On peut démontrer que  $\forall 0 < t' < t$  on a

$$u_h(t) = e^{-\lambda t} e^{\lambda t'} u_h(t') + e^{-\lambda t} \int_{t'}^t e^{\lambda u} f_h(u) du \quad (3.6)$$

$$\text{avec } f_h(t) = \frac{-\nabla\Phi(x(t+h)) + \nabla\Phi(x(t))}{h}.$$

Alors on peut trouver que

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} (\sup_{h > 0} |u_h(t)|) = 0 \quad (3.7)$$

Par suite

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{x}(t) = 0.$$

alors d'après l'équation 3.1 on a

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \nabla\Phi x(t) = 0.$$

#### IV CONVERGENCE DE LA TRAJECTOIRE

##### IV1 Convergence avec $\Phi$ convexe

Dans cette section  $\Phi : H \rightarrow \mathbb{R}$  est une fonction convexe de classe  $C^1$  et  $S = \text{argmin}\Phi = \{x \in H; \nabla\Phi(x) = 0\} \neq \emptyset$ .

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) + \lambda \dot{x}(t) + \nabla\Phi(x(t)) = 0 \\ x(0) = x_0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0 \\ \lambda \geq 0 \end{cases}$$

**Théorème IV.1.** *Pour tout  $(x_0, \dot{x}_0) \in H \times H$ , la solution unique de ce système (HBF) vérifie*

(i)  $x$  est borné sur  $H$

(ii) Il existe  $\bar{x} \in \text{argmin}\Phi$  tel que  $x(t) \rightarrow \bar{x}$  faiblement dans  $H$  quand  $t \rightarrow \infty$ . et aussi  $\lim_{t \rightarrow \infty} \Phi(x(t)) = \min \Phi$ .

##### IV2 Idée de la preuve, Théorème 4.1 et interpretation

Interpretation : les limites de la trajectoire toujours appartiennent à l'ensemble des points critiques et quand on travaille avec une fonction minorée ne pas convexe donc cette fonction possède plusieurs intervalles des points critiques, c'est pour cela qu'on ne peut pas trouver la convergence de la trajectoire, mais avec la fonction convexe on a une seule intervalle des points critiques c'est pour cela que les points limites appartiennent à une seule intervalle bornée qui est l'ensemble des points critiques et ainsi on peut montrer que la convergence est faible (elle peut être forte mais avec une condition de convexité forte voir plus loin) de la trajectoire.

i. Soit  $f(t) = \dot{h}(t)$ , nous avons

$$\dot{f} + \lambda f(t) \leq \frac{1}{2} |\dot{x}(t)|^2. \quad (4.1)$$

$$\text{soit } g(t) = |\dot{x}(t)|^2$$

Alors on peut démontrer que

$$f_+(t) \leq e^{-\lambda t} (f(0))_+ + \int_0^t e^{-\lambda(t-u)} g(u) du, \quad (4.2)$$

alors  $f_+(t) = (\dot{h}(t))_+ \in L^1([0, \infty[; H)$ .

D'autre part pour tout  $0 < s < t < \infty$  on a

$$h(t) - h(s) = \int_s^t \dot{h}(\tau) d\tau \leq \int_s^t (\dot{h}(\tau))_+ d\tau \quad (4.3)$$

alors l'inéquation précédente vérifie

$$h(t) - \int_0^t (\dot{h}(\tau))_+ d\tau \leq h(s) - \int_0^s (\dot{h}(\tau))_+ d\tau$$

c'est à dire  $t \rightarrow d(t) = h(t) - \int_0^t (\dot{h}(\tau))_+ d\tau$ , est une fonction décroissante.

De plus, puisque  $h \geq 0$ , et  $(\dot{h})_+ \in L^1([0, \infty[; \mathbb{R})$  alors  $d(\cdot)$  est minorée.

Alors  $\lim_{t \rightarrow \infty} d(t)$ , existe dans  $\mathbb{R}$  et alors

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} d(t) + \int_0^\infty (\dot{h}(\tau))_+ d\tau$$

Alors  $x$  est bornée sur  $H$ .

ii. On applique le lemme Opial sur l'ensemble

$$s = \text{argmin} \Phi = \{x \in H, \nabla\Phi(x) = 0\}$$

On sait, d'après le théorème 3.1, que l'on a,  $\nabla\Phi(x(t)) \rightarrow 0$  quand  $t \rightarrow \infty$  soit  $x(t_n) \rightarrow z$  avec  $z \in S$ , on a  $\Phi$  convexe, donc  $\nabla\Phi(z) = 0$ , alors pour tout  $\xi \in H$  on a,

$$\Phi(\xi) \geq \Phi(x(t_n)) + \langle \nabla\Phi(x(t_n)), \xi - x(t_n) \rangle. \quad (4.4)$$

alors pour tout  $\xi \in H$ ,

$$\Phi(\xi) \geq \limsup_{t \rightarrow \infty} \Phi(x(t)) \geq \liminf_{t \rightarrow \infty} \Phi(x(t)) \geq \Phi(\bar{x}), \forall \xi \in H.$$

On en déduit que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Phi(x(t)) = \min \Phi = \Phi(\bar{x}).$$

D'où  $\bar{x} \in S$ , alors on conclut grâce au lemme d'Opial.

**Lemme IV.2 (Opial).** : Soit  $H$  un espace d'Hilbert et  $x : [0, \infty[ \rightarrow H$ , une fonction telle qu'il existe un ensemble  $S$  non vide de  $H$  qui vérifie :

(i) Pour tout  $t_n \rightarrow \infty$  tel que  $x(t_n) \rightarrow \bar{x}$  faiblement dans  $H$ , on a  $\bar{x} \in S$

(ii) Pour tout  $z \in S$ ,  $\lim_{t \rightarrow \infty} |x(t) - z|$  existe.

alors  $x(\cdot)$  converge faiblement quand  $t \rightarrow \infty$ , vers un élément  $\bar{x} \in S$

### IV3 Convergence avec $\Phi$ fortement convexe

**Proposition IV.3.** : Si on a en plus dans le théorème 4.1 que  $\Phi$  est fortement convexe, ie  $\forall R > 0$ , il existe une fonction  $\beta_R : R_+ \rightarrow R_+$ , telle que si

$$\beta_R(t_n) \rightarrow 0 \implies t_n \rightarrow 0$$

et telle que  $\forall x, y \in H$  avec  $|x| < R, |y| < R$

$$\langle \nabla \Phi(x) - \nabla \Phi(y), x - y \rangle \geq \beta_R(|x - y|) \quad (4.5)$$

alors la trajectoire  $x(\cdot)$  du système (HBF) est fortement

convergente, quand  $t$  tend vers  $\infty$ , vers  $\bar{x}$  qui minimise la fonction  $\Phi$ .

### V CONVERGENCE ASYMPTOTIQUE DE SYSTÈME (HBF) $_\epsilon$

On cherche une famille de trajectoires  $x_\epsilon$  qui dépendent de  $\epsilon$  (facteur de frottement). On cherche à trouver leur limite faible ou forte dans certains espaces quand  $\epsilon \rightarrow 0$  ou  $t \rightarrow \infty$

Système (HBF) $_\epsilon$

$$\begin{aligned} \epsilon \ddot{x}_\epsilon(t) + \dot{x}_\epsilon(t) + \nabla \Phi(t) &= 0 \\ x_\epsilon(0) = x_0, \dot{x}_\epsilon(0) &= \dot{x}_0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

**Théorème V.1.** : Avec les memes hypothèse  $H_\Phi$ , avec en plus  $\Phi$  fonction inférieurement compacte, alors pour  $\epsilon > 0$  la solution unique  $x_\epsilon$  vérifiée les propriétés suivantes :

(i)  $x_\epsilon$  converge uniformement vers  $x$  dans l'espace  $C([0, T], H)$ , où  $x$  est la solution unique du système (SD) :

$$\dot{x}(t) + \nabla \Phi(t) = 0, x(0) = x_0 \quad (5.2)$$

(ii)  $\dot{x}_\epsilon \rightarrow \dot{x}$  faiblement dans  $L^2([0, \infty[, H)$  et  $\dot{x}_\epsilon \rightarrow \dot{x}$  fortement dans l'espace  $L^2([0, T], H)$

(iii) Si  $\Phi$  est de classe  $C^2$ , alors  $\epsilon \ddot{x} \rightarrow 0$  dans l'espace  $L^2([0, \infty[, H)$  pour tout  $T < \infty$ .

Interprétation :si vous regarder le rayon d'onde ou le rayon solaire qui passent par plusieurs milieux, la trajectoire depend de la force gravitationnelle qui n'est pas constante et qui est sous la forme  $g = \epsilon$ . dans le vide  $g$  tend vers zéro c'est pour cela qu'on étudie ce système avec un contrôle  $\epsilon$ , et on cherche la limite de la solution qui ne depend pas de  $\epsilon$  pour savoir qu'est ce qui se passe dans le vide exact pour ce système dynamique

**Théorème V.2.** Soit  $\Phi$  une fonction convexe, alors pour  $(x_0, \dot{x}_0) \in H^2$ , et pour  $\epsilon > 0$ , la solution  $x_\epsilon$ , verifie :

(i)  $x_\epsilon$  converge uniformement vers  $x$  dans l'espace  $C([0, \infty[, H)$ , et  $\exists C \geq 0$ , telle que

$$\|x_\epsilon - x\|_{L^\infty([0, \infty[, H)} \leq C\sqrt{\epsilon} \quad (5.3)$$

(ii) Si  $S = \operatorname{argmin} \Phi \neq \emptyset$ , alors on a :

(a.)  $\exists x(\infty) \in S$ , tel que  $x(\infty) = w - \lim_{t \rightarrow \infty} x(t)$ .

(b.)  $x_\epsilon(\infty) \rightarrow x(\infty)$  fortement dans  $H$  quand  $\epsilon \rightarrow 0$ .

(c.)  $\dot{x}_\epsilon \rightarrow \dot{x}$  fortement dans l'espace  $L^2([0, \infty[, H)$ .

### VI CONCLUSION

On s'intéresse dans ce papier à étudier l'équation (3.1) avec un contrôle  $\lambda$  constant (où  $\lambda$  désigne un coefficient de frottement) et avec l'opérateur de gradient, mais pour illustrer l'étude de ce système on travaille au sein de notre laboratoire ACSIOM et aux autres laboratoires dans le monde avec des contrôles dépendants du temps et avec d'autres opérateurs (comme le laplacien sur  $H$  un espace de sobolev etc.) et ces problèmes maintenant sont ouverts.

### RÉFÉRENCES

- [1] F. Alvarez, On the minimizing property of a second order dissipative system in Hilbert space, preprint 98-05, Département de Mathématiques, Université Montpellier II, To appear in SIAM J. of control and optimization.
- [2] H. ATTOUCH AND M.-O. CZARNECKI, Asymptotic control and stabilization of non linear oscillators with non isolated equilibria, J. Differential Equations, 179 (2002), pp.278-310.
- [3] H. ATTOUCH, X. GOUDOU, AND P. REDONT, The heavy ball with friction method. I. The continuous dynamical system, commun. contemp. Math., 2(2000), pp.1-34
- [4] H. Attouch and R. Cominetti, A dynamical approach to convex minimization coupling approximation with the steepest descent method, J. Differential Equations, 128 (2), (1996), 519-540.
- [5] H. Attouch, X. Goudou, and P. Redont, The heavy ball with friction method. I The continuous dynamical system, Communications in Contemporary Math. vol. 2, 1 (2000), 1-34.
- [6] H. Brézis, Monotonicity methods in Hilbert spaces and some applications to nonlinear partial differential equations, in "Contributions to Nonlinear Analysis" (E.H. Zarantonello Ed.), Academic Press, New-York, 101-156, 1971.
- [7] A. CABOT, AND M.-O. CZARNECKI, Asymptotic control of pairs of oscillators coupled by a repulsion, with non isolated equilibria I : The regular case
- [8] X. Goudou, Genericity of the convergence towards a local minimum of the heavy ball method, to appear.
- [9] A. Haraux, Systèmes dynamiques dissipatifs et applications, RMA 17, Masson, Paris, 1991.

- [10] Z. Opial, Weak convergence of the sequence of successive approximations for nonexpansive mappings, *Bull. of the American Math. Society*, 73, (1967), 591-597.
  
- [11] P. Redont, Equation de la boule pesante avec frottement : exemple de solution non convergente, *Prépublication 99*, Département de Mathématiques, Université de Montpellier II, [http ://www.math.univ-montp2.fr](http://www.math.univ-montp2.fr).

# Un invariant géométrique : la courbure de Gauss

Benoît MICHEL <sup>1</sup> (Doctorant 3ème année)  
(sous la direction de Marc HERZLICH <sup>2</sup>)

Institut de Mathématiques et Modélisation de Montpellier  
Université Montpellier II  
34095 MONTPELLIER cedex, France

<sup>1</sup>benoit.michel@math.univ-montp2.fr

<sup>2</sup>marc.herzlich@math.univ-montp2.fr

**Résumé**— En s’attachant plus aux idées intuitives qui la sous-tendent qu’au formalisme et à la rigueur, cet article de vulgarisation introduit à un domaine des mathématiques fondamentales, la géométrie différentielle. Dans ce cadre est présentée une démarche typique de mathématicien, la recherche d’invariants. Son intérêt est illustré par un exemple ancien mais concret, la courbure de Gauss, qui permet de montrer que toute carte de la Terre distord les distances.

**Mots-clés**— mathématiques : géométrie, surfaces, courbure de Gauss

## I. INTRODUCTION

En raison du niveau de connaissances et d’abstraction requis, les mathématiques dites fondamentales sont délicates à présenter au profane. Il a donc semblé plus intéressant à l’auteur de ces lignes de se concentrer sur la présentation de son domaine de recherche, et d’une démarche de mathématicien, la recherche d’invariants. À cette fin, on s’appuiera sur un exemple ancien, mais fondateur et facilement accessible à l’intuition, la *courbure de Gauss*.

On s’intéresse dans cet article à une surface courbée dans l’espace. L’exemple le plus simple est celui d’une sphère, par exemple la Terre. Dans une première partie seront introduits quelques concepts de géométrie différentielle, dans le but de donner un sens mathématique à la notion d’échelle d’une carte, qu’on appellera *métrique riemannienne*. La seconde sera dédiée à la définition de la courbure de Gauss; on y verra que *via* une application d’une surface sur une autre, préservant les longueurs des courbes, celle-ci est inchangée, d’où la dénomination d’*invariant*. À titre d’application et d’illustration, le cas d’une sphère montrera que toute carte de la Terre a nécessairement une échelle variable.

L’objet de cet article étant avant tout de faire passer des idées intuitives, le vocabulaire technique a été volontairement écarté, au détriment de la rigueur de la présentation.

Néanmoins, rétablir celle-ci devrait être un exercice facile pour le lecteur mathématicien.

## II. GÉOMÉTRIE SUR DES SURFACES COURBES

On commence par quelques définitions et propriétés qui seront utilisées pour étudier les surfaces.

### II.1. Surface paramétrée

#### II.1.1. Cartes

On s’intéresse une surface  $S$  dans l’espace usuel (à 3 dimensions)  $\mathbb{R}^3$ . Pour décrire mathématiquement  $S$ , on emprunte aux géographes le concept de carte : tout point de la Terre peut être situé, d’abord en choisissant une région cartographiée dont il fait partie, puis en recherchant ses coordonnées sur cette carte.

De façon analogue, on considérera que  $S$  se décompose en régions  $R$  « cartographiables », c’est-à-dire que les points de  $R$  sont repérés par un (et un seul, de préférence) couple de coordonnées  $(u, v)$ .

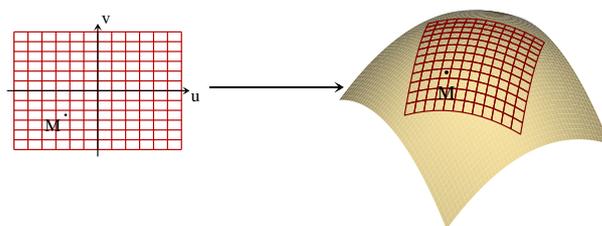


FIGURE 1 : Une carte d’une partie d’une surface  $S$

Pour formaliser, on dispose en fait d’une fonction  $\Phi$  qui à un couple de réels  $(u, v)$ , les coordonnées sur la carte, associe

les trois coordonnées spatiales d'un point de  $S$  :

$$\Phi : (u, v) \mapsto \Phi(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \in S$$

C'est à une telle fonction  $\Phi$  que l'on donne le nom de *carte*.

Par exemple, un point de la Terre est repéré par sa latitude  $\lambda$  et sa longitude  $\varphi$ . Si l'on choisit correctement les coordonnées spatiales, et si l'on note  $r_T$  le rayon de la Terre, la « carte » obtenue, dans le sens qu'on vient de donner à ce mot, est :

$$(\lambda, \varphi) \mapsto \left( x = r_T \cos(\lambda) \cos(\varphi), y = r_T \cos(\lambda) \sin(\varphi), z = r_T \sin(\lambda) \right).$$

Demander que tout point soit paramétré par un *unique* couple latitude-longitude impose d'exclure les pôles, et de se limiter par exemple à  $\lambda \in ]-180^\circ, 180^\circ]$  et  $\varphi \in ]-90^\circ, 90^\circ[$ .

Une partie  $R$  de  $S$  ainsi cartographiée s'appelle une *nappe paramétrée*.  $S$  s'obtient en recollant plusieurs nappes paramétrées.

L'intérêt de cette description est qu'elle permet d'utiliser, pour étudier une forme géométrique  $S$ , un objet mathématique d'usage connu, les fonctions de deux variables. Pour le mathématicien et le lecteur rigoureux, précisons qu'on fait l'hypothèse pour la suite que  $S$  est cartographiable avec des cartes 3 fois continûment différentiables.

### II.1.2. Changement de cartes

Bien sûr, il existe quantité de cartes différentes. Pour la Terre, on peut citer la carte de Mercator, représentation très courante de la Terre (qui montre le Groenland plus gros que l'Afrique), ou les coordonnées de Lambert, utilisées par exemple par l'armée. De manière générale, si  $S$  est une surface fermée, il sera impossible de la paramétrer en une seule carte.

Certaines parties de  $S$  seront donc décrites par deux cartes (ou plus). Il convient donc de décrire comment l'on passe de l'une à l'autre.

Formalisons un peu : soit une région  $R$  de  $S$  munie de deux cartes  $\Phi(u, v)$  et  $\Psi(p, q)$ . Tout point  $M$  de  $R$  s'écrit de deux manières  $M = \Phi(u, v) = \Psi(p, q)$ . Les coordonnées  $(p, q)$  de  $M$  s'expriment alors comme fonction de ses coordonnées  $(u, v)$  :

$$(p, q) = (p(u, v), q(u, v)) = f(u, v).$$

Inversement,  $(u, v) = f^{-1}(p, q)$ , où  $f^{-1}$  est appelée transformation réciproque de  $f$  (cf. figure 2).

On condense cette écriture en  $\Phi(u, v) = \Psi(p, q) = \Psi(f(u, v)) = \Psi \circ f(u, v)$ .

## II.2. Échelle d'une carte et longueur d'une courbe

### II.2.1. Échelle

Étant donnée une carte  $(u, v) \mapsto (x, y, z) = \Phi(u, v) \in S$ , et un couple  $(u, v)$  de coordonnées sur cette carte, on cherche le lien entre un déplacement infinitésimal  $(du, dv)$

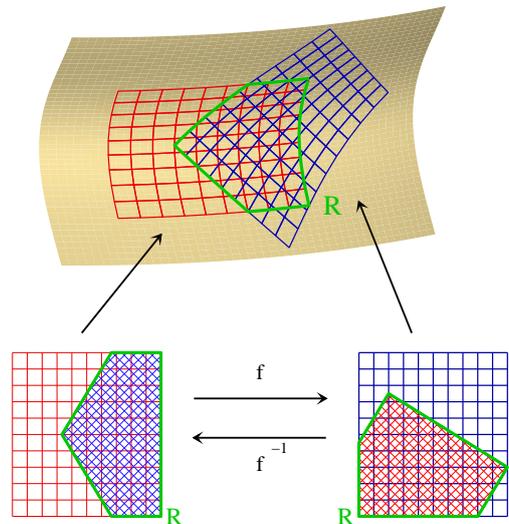


FIGURE 2 :  $R$  est une région décrite par deux cartes

et la longueur du déplacement correspondant sur  $S$  :  $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$ .

Le déplacement infinitésimal correspondant sur la surface,  $d\vec{s} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}$ , est donné par  $dx = \frac{\partial x}{\partial u}(u, v)du + \frac{\partial x}{\partial v}(u, v)dv$ , et les formules analogues pour  $dy$  et  $dz$ . Sous forme plus condensée, utilisant la différentielle de  $\Phi$  :

$$D_{u,v}\Phi = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(u, v) & \frac{\partial x}{\partial v}(u, v) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(u, v) & \frac{\partial y}{\partial v}(u, v) \\ \frac{\partial z}{\partial u}(u, v) & \frac{\partial z}{\partial v}(u, v) \end{bmatrix}$$

on a le produit matriciel

$$d\vec{s} = D\Phi \cdot \begin{bmatrix} du \\ dv \end{bmatrix}$$

D'où

$$\begin{aligned} ds^2 &= d\vec{s}^T \cdot d\vec{s} = [du \ dv] \cdot D\Phi^T \cdot D\Phi \cdot \begin{bmatrix} du \\ dv \end{bmatrix} \\ &= [du \ dv] \cdot g \cdot \begin{bmatrix} du \\ dv \end{bmatrix} = Edu^2 + 2Fdu dv + Gdv^2 \end{aligned}$$

en notant  $g = \begin{bmatrix} E & F \\ F & G \end{bmatrix} = D\Phi^T \cdot D\Phi$ . On a abusé des notations pour alléger, mais bien sûr, les coefficients de  $g$ , de même que de  $D\Phi$ , dépendent de  $u$  et  $v$ . Ainsi,  $ds$  dépend du point  $(u, v)$  où l'on se place (échelle non constante), et de la direction dans laquelle on se déplace sur la carte (échelle non isotrope). C'est donc la matrice  $2 \times 2$   $g$  ci-dessus qu'il convient de considérer comme l'échelle au point  $(u, v)$ . Elle a pris le nom de *métrique riemannienne*.

### II.2.2. Longueur

L'échelle permet de calculer la longueur d'une courbe paramétrée. Soit  $c : t \in [a, b] \mapsto c(t) = \Phi(u(t), v(t)) = (x(t), y(t), z(t)) \in S$  une courbe tracée sur  $S$ . La vitesse est

$$v(t) = \left| \frac{dc(t)}{dt} \right| = \sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2 + z'(t)^2}.$$

Comme juste au dessus,  $x'^2 + y'^2 + z'^2 = Eu'^2 + 2Fu'v' + Gv'^2$ , et la longueur de  $c$  est donnée par

$$\begin{aligned} L &= \int_a^b v(t) dt \\ &= \int_a^b \sqrt{Eu'(t)^2 + 2Fu'(t)v'(t) + Gv'(t)^2} dt. \end{aligned}$$

### II.2.3. Échelle et changement de cartes

Bien sûr, l'échelle dépend de la carte. Si l'on dispose de deux cartes d'une même région de  $S$ ,  $\Phi(u, v)$  et  $\Psi(p, q)$ , la loi de changement de cartes  $(p, q) = f(u, v)$  permet d'écrire que  $\Psi(p, q) = \Psi(f(u, v)) = \Phi(u, v)$  (pour tout couple de coordonnées  $(u, v)$ ), donc  $D_{(u,v)}\Phi = D_{(p,q)}\Psi \cdot D_{(u,v)}f$ . Les échelles des cartes  $\Phi$  et  $\Psi$  sont par conséquent reliées par :

$$g_{(u,v)}^{\Phi} = D_{(u,v)}f^T \cdot g_{(p,q)}^{\Psi} \cdot D_{(u,v)}f$$

### II.3. Surfaces applicables

Les métriques riemanniennes sont définies pour calculer les longueurs des courbes sur les surfaces, connaissant leur tracé sur des cartes. Elles vont donc être identiques pour deux surfaces qui peuvent s'envoyer l'une sur l'autre d'une manière qui préserve les longueurs des courbes.

Plus précisément, la surface  $S_1$  est dite *applicable* sur une autre surface  $S_2$  lorsqu'il existe une application  $A : S_1 \rightarrow S_2$  telle que pour toute courbe  $c$  tracée sur  $S_1$ , la courbe  $A(c)$  tracée sur  $S_2$  ait même longueur. On emploiera le même terme si on ne peut « appliquer » ainsi qu'une région  $R_1 \subset S_1$  sur  $S_2$ . Une telle application est appelée *isométrie (locale)* si elle ne concerne qu'une région de  $S_1$ .

Par exemple, un cylindre est applicable sur un plan. Mieux qu'avec la figure 3, le lecteur peut enrouler et dérouler une feuille de papier (cet article par exemple) pour se convaincre que l'opération conserve les distances (la taille du texte par exemple).

Soit alors une carte  $\Phi_1(u, v)$  (d'une région) de  $S_1$ .  $\Phi_2(u, v) = A(\Phi_1(u, v))$  définit une carte de  $S_2$ .  $A$  préservant les longueurs, un déplacement infinitésimal  $(du, dv)$  autour d'un point  $(u, v)$  sur la carte induit des déplacements de longueurs respectives  $ds_1$  et  $ds_2$  sur  $S_1$  et  $S_2$  respectivement, qui sont égales. Les matrices-échelles  $g_1$  et  $g_2$  sont donc égales.

Un cas particulier est formé par les surfaces  $S$  sur lequel une partie  $\Omega$  d'un plan (plat) est applicable, comme le cylindre précédent. Si l'on choisit des coordonnées orthonormales  $(x, y)$  sur ledit plan, l'isométrie  $A : \Omega \rightarrow S$  peut être prise comme carte de  $S$ . Comme elle préserve les longueurs, un petit déplacement  $(dx, dy)$  dans  $\Omega$  se traduit *via*  $A$  par un

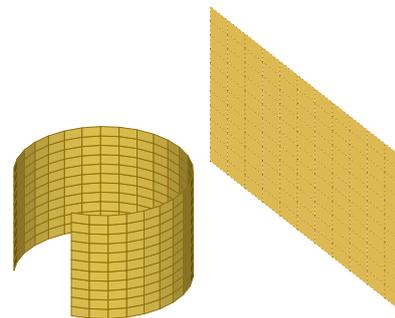


FIGURE 3 : Un cylindre s'applique sur un plan.

déplacement de longueur  $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2}$  sur  $S$ . Reprenant la définition de la partie II.2.1., l'échelle de la carte est donc donnée par  $E = G = 1$  et  $F = 0$ , soit  $g = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ . C'est dans ce cas, où l'échelle est constante et isotrope, que l'on parlera de carte qui ne distord pas les distances.

## III. COURBURE DE GAUSS

Autant on imagine dans quelle direction chercher s'il s'agit de prouver qu'une surface est applicable sur une autre (il « suffit » de trouver une isométrie), autant il semble délicat de démontrer une assertion de la forme « il est impossible de construire une isométrie entre  $S_1$  et  $S_2$ , ni même entre une partie de  $S_1$  et  $S_2$ . » C'est ici qu'entre en jeu le concept d'*invariant*. Étant un point  $M$  sur une surface  $S$ , on va construire un nombre, la *courbure de Gauss* de  $S$  en  $M$ ,  $k_S(M)$ , tel que si  $A$  est une isométrie d'un voisinage de  $M$  dans  $S$  vers une autre surface  $S'$ , alors  $k_{S'}(A(M)) = k_S(M)$  :  $A$  préserve la courbure de Gauss. À l'inverse, si les courbures de Gauss de  $S$  et  $S'$  diffèrent, il sera impossible de trouver une isométrie entre ces deux surfaces.

Pour l'anecdote, elle a été découverte en 1827 par le mathématicien K.F. Gauss alors qu'il était employé à cartographier (au sens usuel des géographes) le royaume de Hanovre.

### III.1. Définition

On va utiliser la définition classique de la courbure d'une courbe plane. Soit  $c$  une telle courbe, dont on supposera que la vitesse  $c'(t)$  ne s'annule pas : on appelle *courbure* de  $c$  en un point  $c(t)$  le nombre  $\kappa = \frac{1}{|c'(t)|^2} \left| c''(t) - \frac{c'(t)}{|c'(t)|} \cdot c''(t) \right|$ . Il s'agit de la norme de la composante de l'accélération  $c''(t)$  normale à  $c'(t)$ . Lorsque  $\kappa \neq 0$ , son inverse  $r = 1/\kappa$  est bien connu : il s'agit du rayon de courbure de  $c$  en  $t$ . C'est le rayon du cercle qui approche le mieux  $c$  au point  $c(t)$ .

Soient maintenant une surface  $S$  et un point  $M \in S$ . On se fixe une normale  $\vec{n}$  à  $S$  en  $M$ . On considère un plan  $P$  passant par  $M$ , et contenant  $\vec{n}$ . Il coupe la surface  $S$  suivant une courbe  $c_P$  qui passe par  $M$  (voir la figure 4). Cette courbe admet une courbure en  $M$ ,  $| \kappa(P) |$ . On détermine de plus un

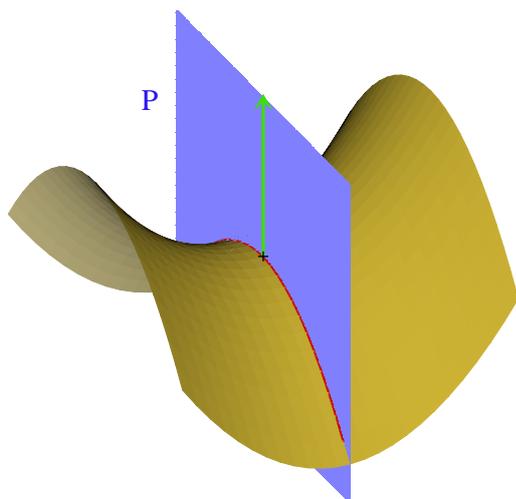


FIGURE 4 : Plan contenant la normale à une surface et coupant celle-ci suivant une courbe

signe à  $\kappa(P)$  en le choisissant positif si la courbure de  $c_P$  en  $M$  est dirigée vers  $\vec{n}$ , et négatif sinon. Lorsque  $P$  varie,  $\kappa(P)$  varie entre deux valeurs extrêmes,  $\kappa_{min}$  et  $\kappa_{max}$ . On définit la courbure de Gauss en  $M$  comme le produit  $k(M) = \kappa_{min}\kappa_{max}$ .

### III.2. Premières propriétés

$k(M)$  est défini de manière géométrique, partant de la seule forme de  $S$  dans l'espace. Il peut être calculé si on se donne une carte d'une région contenant  $M$ ; mais notre définition assure, sans calcul, la propriété pas forcément évidente que le résultat ne dépend pas de la carte choisie.

D'autres nombres vérifient la même propriété : c'est le cas par exemple de la courbure moyenne de  $S$  définie par  $H(M) = \kappa_{min} + \kappa_{max}$ ; on peut en fabriquer beaucoup d'autres. Néanmoins, *a priori* tous dépendent de la forme de la surface, et changeront d'une surface à l'autre, même applicables l'une sur l'autre.

Pour l'instant, on se contentera de remarquer que si la normale choisie  $\vec{n}$  est changée en  $-\vec{n}$ ,  $\kappa_{min}$  et  $\kappa_{max}$  sont changés respectivement en  $-\kappa_{max}$  et  $-\kappa_{min}$ .  $k(M)$  n'est donc pas changé.

### III.3. Invariance par isométrie

On se fixe une carte  $\Phi(u, v)$  de  $S$ , et on pose  $g = \begin{bmatrix} E & F \\ F & G \end{bmatrix}$  son échelle. La définition de  $k$  permet de faire le calcul explicite en fonction de  $\Phi(u, v)$  et de ses dérivées premières et secondes par rapport à  $u$  et  $v$ . C'est un peu fastidieux, et le résultat n'est guère intéressant, donc n'est pas reporté ici. En revanche, avec (beaucoup) plus de calcul, et

d'astuce, Gauss obtient dans [1] la formule suivante.

$$4(EG - F^2)k = E \left[ \frac{\partial E}{\partial v} \frac{\partial G}{\partial v} - 2 \frac{\partial F}{\partial u} \frac{\partial G}{\partial v} + \left( \frac{\partial G}{\partial u} \right)^2 \right] + F \left[ \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial G}{\partial v} - \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial G}{\partial v} - 2 \frac{\partial E}{\partial v} \frac{\partial F}{\partial v} - 2 \frac{\partial F}{\partial u} \frac{\partial G}{\partial u} + 4 \frac{\partial F}{\partial u} \frac{\partial F}{\partial v} \right] + G \left[ \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial G}{\partial u} - 2 \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial F}{\partial v} + \left( \frac{\partial E}{\partial v} \right)^2 \right] - 2(EG - F^2) \left[ \frac{\partial^2 E}{\partial v^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial v^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial u \partial v} \right]$$

L'intérêt de cette formule n'est pas le détail des termes qu'elle contient, il est trop compliqué. Ce qu'il convient de remarquer, c'est que  $k$  ne dépend que des coefficients de  $g$  et de leurs dérivées. Ainsi, si deux surfaces sont applicables l'une sur l'autre, comme elles admettent respectivement des cartes dont les échelles ont la même matrice, elles auront même courbure de Gauss. Plus précisément, si  $A$  est une isométrie de  $S_1$  vers  $S_2$ , et si  $S_1$  a pour courbure de Gauss  $k_1$  en  $M$ , alors  $S_2$  a pour courbure en  $A(M)$   $k_2 = k_1$ . Ce qui justifie le nom d'invariant donné à  $k$ . Comme noté en III.2., cette propriété n'était absolument pas évidente *a priori* : c'est pourquoi Gauss lui a donné le nom de *theorema egregium*, théorème remarquable.

### III.4. Cartes géographiques

Comme exemple, on peut calculer la courbure de Gauss de la Terre, que l'on assimile à une sphère parfaite.

Un plan contenant une normale à la sphère est un plan de symétrie : il la coupe suivant un grand cercle, c'est-à-dire un « cercle diamétral », de même rayon  $r$  que la sphère, cf. figure 5. Tous ces grands cercles ont donc pour courbure  $1/r$  (en tout point). D'après la définition de III.1., la courbure de Gauss en tout point est  $1/r^2$ .

Comme remarqué dans la partie II.3., fabriquer une carte de la Terre qui ne distorde pas les distances revient à appliquer isométriquement la sphère sur un plan. D'après le *theorema egregium*, une telle isométrie doit préserver la courbure de Gauss : il convient donc de calculer celle-ci pour un plan  $P$ .

Un plan normal à  $P$  le coupe suivant une droite, qui est de rayon de courbure infini, donc de courbure nulle. Il s'ensuit que  $\kappa_{min} = \kappa_{max} = 0$  en tout point de  $P$  :  $P$  a pour courbure de Gauss 0 partout.

Les courbures de Gauss du plan et de la sphère étant différentes, il est impossible de trouver une application de la sphère, ni même d'une partie de celle-ci, sur un plan, qui préserve les distances : il est donc impossible de faire des cartes de la Terre à échelle constante.

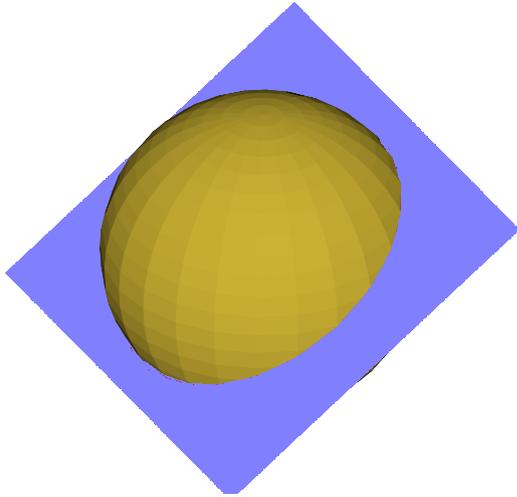


FIGURE 5 : Plan contenant une normale à une sphère

#### RÉFÉRENCES

- [1] K.F. Gauss. « Disquisitiones generales circa superficies curvas », *Commentationes Societatis Regiae Scientiarum Gottingensis Recentiores*, Vol. VI, p 99–146, 1827.
- [2] S. Gallot, D. Hulin, J. Lafontaine. *Riemannian Geometry*, 2e édition, Springer-Verlag, 1993.
- [3] M. Spivak. *A Comprehensive Introduction to Differential Geometry, Vol. 2*, Publish or Perish.

# Un modèle markovien individu centré simple de dynamique de forêt\*

Khader KHADRAOUI<sup>1</sup> (Doctorant 1ere année)  
Christophe ABRAHAM<sup>2</sup> (Directeur de thèse)

Unité Mixte de Recherche: Analyse des Systèmes et de Biométrie (UMR ASBINRA Montpellier)  
Université Montpellier 2 -Sciences et Techniques  
Place Eugène Bataillon, 34095 MONTPELLIER cedex, France

<sup>1</sup>khadraou@supagro.inra.fr

<sup>2</sup>abraham@supagro.inra.fr

**Résumé**— Les forêts sont en effet des systèmes écologiques d'une très grande complexité qui présentent des phénomènes d'interaction liés à la compétition entre individus d'une même espèce mais aussi entre individus d'espèces différentes. Cette compétition porte sur l'accès aux ressources (lumière, eau, nutriments etc.). Enfin, les échelles temporelles des écosystèmes forestiers sont très longues. Pour cette raison nous souhaitons aborder dans ce travail la modélisation markovienne de la répartition spatiale des individus sous forme d'un modèle individu centré moyennant les processus stochastiques de branchement.

**Mots clés**— Dynamique de forêts, processus stochastique de branchement, phénomènes d'interaction, phénomènes de compétition, modèle individu centré (IBM).

## I. INTRODUCTION

Ce travail n'a pas la prétention de proposer un modèle fidèle de systèmes écologiques forestiers mais, au contraire, de proposer un modèle individu centré prenant en compte deux caractéristiques essentielles :

- (i) Naissance : chaque individu est susceptible de donner une naissance à un nouvel arbre situé dans le voisinage de l'arbre parent (dispersion).
- (ii) Mort : cette mort est due à des causes naturelles ou bien à la compétition pour l'accès aux ressources naturelles.

La croissance ne sera pas abordée.

Les modèles markoviens de particules en interaction, en temps et espace continu, de branchement (naissance/mort) sont particulièrement adaptés à cette situation. Nous nous sommes particulièrement intéressé à un modèle développé par

Méléard–Fournier [2]. Ce modèle avait à l'origine été proposé par Bolker–Pacala [1]. Les traitements proposés dans ces deux articles étaient différents.

Bolker–Pacala [1] décrivent l'équation, dite de Kolmogorov (ou équation "master"), qui décrit l'évolution de la loi du processus modélisant l'écosystème. Cette équation est complexe et "vit" dans un espace de grande dimension. Les auteurs proposent alors une approximation par méthode de moments : l'approximation permet de retrouver les deux premiers moments de la solution exacte.

Méléard–Fournier [2] reprennent ce modèle et en proposent une formulation mathématique rigoureuse. Ils décrivent également sous forme algorithmique de Monte Carlo comme sous forme mathématique, le processus de Markov sous-jacent.

Nous présentons le modèle simple que nous avons étudié ainsi que des essais numériques de simulation. Les simulations numériques ont été faites en MatLab.

## II. UN MODÈLE DE DYNAMIQUE FORESTIÈRE

### II.1. Modélisation de la dynamique des forêts

On considère une "parcelle forestière" :

$$\mathcal{X} = [x_{min}^1, x_{max}^1] \times [x_{min}^2, x_{max}^2] \subset \mathbb{R}^2$$

pour simplifier imaginons une parcelle d'un hectare (un carré de 100 mètres de côté). Nous souhaitons proposer un modèle très simple de dynamique de forêt : elle sera constituée d'une seule espèce et nous ne considérerons que la localisation des arbres (des individus). À chaque instant  $t$ , cette forêt sera représentée par

$$\nu_t \stackrel{\text{déf}}{=} \{x_t^i; i = 1 \dots N_t\} \subset \mathcal{X}$$

\*Ce travail a été entièrement réalisé dans le cadre de stage M2 par K. Khadraoui sous la direction de M. Fabien Campillo.

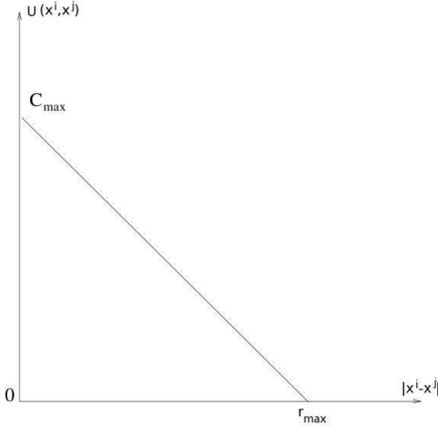


FIG. 1 : Figure illustrant les paramètres de la fonction de compétition.

donc chaque individu  $i$  sera représenté par sa position  $x_t^i$  et  $N_t$  désigne la taille de la population à l'instant  $t$ , i.e.  $N_t = |\nu_t|$  (cardinal de  $\nu_t$ ).

Cette forêt sera soumise à des mécanismes “ponctuels” de base. Partant d'une forêt  $\nu$  et d'un individu  $x \in \nu$

- (i) Cet individu est susceptible de mourir de mort naturelle avec un taux  $\lambda^m$  et alors :

$$\nu \mapsto \nu \setminus \{x\}$$

(i.e. la forêt perd l'individu  $x$ ).

- (ii) Il est susceptible de donner naissance à un nouvel individu avec un taux  $\lambda^n$ , la position  $x'$  de ce nouvel individu est déterminé par un noyau de dispersion  $D(dx')$  et alors :

$$\nu \mapsto \nu \cup \{x'\}$$

(i.e. la forêt gagne un nouvel individu  $x'$ ).

- (iii) Il est susceptible de mourir à cause de la compétition modélisée par un taux  $\lambda^c(x, \nu)$  qui dépend de  $x$  et  $\nu$ ; alors :

$$\nu \mapsto \nu \setminus \{x\}$$

(i.e. la forêt perd l'individu  $x$ ).

On suppose de plus que ces mécanismes de base sont indépendants (au sens probabiliste).

On peut considérer des modèles plus complexes où les taux peuvent dépendre de la position dans l'espace. On peut également considérer un modèle de croissance : en plus de sa position, chaque individu est également caractérisé par une taille. Nous préférons ici conserver le modèle le plus simple.

## II.2. Noyau de dispersion

Pour le noyau de dispersion nous allons considérer un noyau gaussien  $D(dx') = \mathcal{N}(0, \sigma^2 I)$ . Afin de gérer simplement les conditions aux bords nous supposons que  $\mathcal{X}$  est un tore.

## II.3. Noyau de compétition

Pour le taux de compétition, on considère :

$$\lambda^c(x, \nu) = \sum_{y \in \nu} u(x, y)$$

où

$$u(x, y) = \begin{cases} C_{\max} \left(1 - \frac{1}{r_{\max}} \|x - y\|\right)^+ & \text{si } x \neq y, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

La signification de ce noyau d'interaction est simple : plus l'individu  $x$  est entouré de voisins plus il y a de risques qu'il disparaisse (cf. Figure 1).

## III. SIMULATION

Partant du dernier événement  $T_{k-1}$  et de la forêt  $\nu_{T_{k-1}}$ , on simule  $T_k$  et  $\nu_{T_k}$  de la façon suivante : on calcule l'horloge globale des événements donnée par

$$m_k = m_k^n + m_k^m + m_k^c$$

avec

$$m_k^n = \lambda^n |\nu_{T_{k-1}}|, \quad m_k^m = \lambda^m |\nu_{T_{k-1}}|, \quad m_k^c = C_{\max} |\nu_{T_{k-1}}|^2.$$

On pose  $T_k = T_{k-1} + S_k$  avec  $S_k \sim \text{Exp}(m_k)$ , et  $\nu_t = \nu_{T_{k-1}}$  pour  $t \in [T_{k-1}, T_k]$ .

On calcule les probabilités :

$$\alpha_k^n = m_k^n / m_k, \quad \alpha_k^m = m_k^m / m_k, \quad \alpha_k^c = m_k^c / m_k$$

On tire au hasard l'événement de la façon suivante :

- avec probabilité  $\alpha_k^n$  : naissance. On tire au hasard l'individu  $i$  dans  $\{1, \dots, |\nu_{T_{k-1}}|\}$ . On tire  $z \in \mathbb{R}^d$  selon la loi de dispersion  $D(dz)$ . On ajoute un nouveau individu à la position  $x' = x_{\nu_{T_{k-1}}}^i + z$  et on pose

$$\nu_{T_k} = \nu_{\nu_{T_{k-1}}} \cup \{x'\}.$$

- avec probabilité  $\alpha_k^m$  : mort naturelle. On tire au hasard l'individu  $i$  dans  $\{1, \dots, |\nu_{T_{k-1}}|\}$  et on pose :

$$\nu_{T_k} = \nu_{\nu_{T_{k-1}}} \setminus \{x_{\nu_{T_{k-1}}}^i\}.$$

- avec probabilité  $\alpha_k^c$  : mort par compétition. On tire au hasard deux individus  $i$  et  $j$  dans  $\{1, \dots, |\nu_{T_{k-1}}|\}$ . On rejette l'événement d'une mort due à la compétition avec probabilité  $1 - (u(x_{\nu_{T_{k-1}}}^i, x_{\nu_{T_{k-1}}}^j) / C_{\max})$ , sinon on supprime l'individu  $i$  de la forêt et on pose

$$\nu_{T_k} = \nu_{\nu_{T_{k-1}}} \setminus \{x_{\nu_{T_{k-1}}}^i\}.$$

### III.1. Test 1 : forte dispersion

La forêt de forte dispersion des individus dans le domaine forestier  $\bar{\mathcal{X}}$  a été simulée selon ces paramètres :

Les paramètres :	$\lambda^n$	$\lambda^m$	$C_{\max}$	$r_{\max}$	$\sigma$
Valeurs :	2	1	$2.5 \cdot 10^{-3}$	100	$\sqrt{5}$

Après leur naissances, la dispersion des nouveaux arbres est d'autant plus forte que l'écart type du noyau gaussien est grand.

### III.2. Test 2 : faible dispersion

La forêt qui fait apparaître des clusters dans le domaine forestier  $\bar{\mathcal{X}}$  a été simulée selon ces paramètres :

Les paramètres :	$\lambda^n$	$\lambda^m$	$C_{\max}$	$r_{\max}$	$\sigma$
Valeurs :	2	1	$2.5 \cdot 10^{-3}$	100	$\sqrt{0.01}$

Donc, lorsque l'écart type du noyau gaussien est petit, la dynamique de la forêt évolue selon un processus de clusterisation.

### III.3. Test 3 : forte compétition

La forêt de faible densité a été simulée selon ces paramètres :

Les paramètres :	$\lambda^n$	$\lambda^m$	$C_{\max}$	$r_{\max}$	$\sigma$
Valeurs :	2	1	$3 \cdot 10^{-3}$	100	1

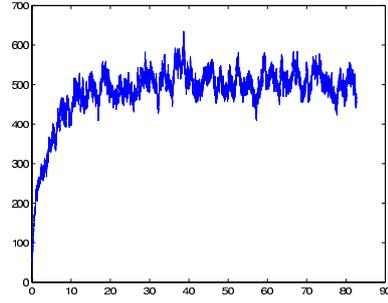
Donc, si la compétition est forte, on obtient un phénomène de désertification de la forêt, ce qui empêche la croissance de la densité arboricole dans  $\bar{\mathcal{X}}$ .

### III.4. Test 4 : faible compétition

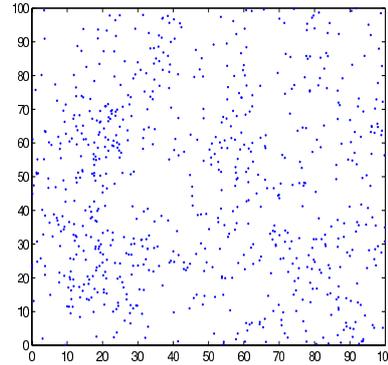
La forêt de forte densité a été simulée selon ces paramètres :

Les paramètres :	$\lambda^n$	$\lambda^m$	$C_{\max}$	$r_{\max}$	$\sigma$
Valeurs :	2	1	$3 \cdot 10^{-4}$	100	1

Donc, si la compétition est faible, la forêt envahit tout le domaine  $\bar{\mathcal{X}}$  ce qui aboutit à une forte croissance de la densité arboricole.

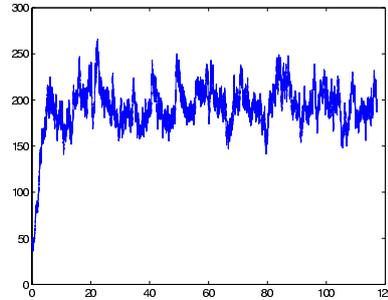


Évolution du nombre d'individus au cours du temps.

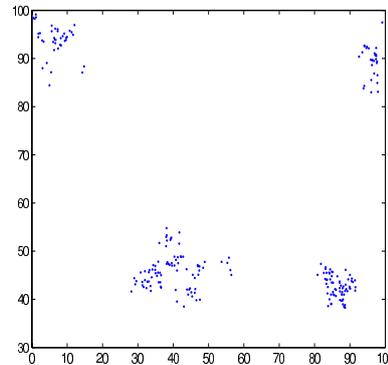


État de la forêt à l'instant final.

FIG. 2 : Test 1 : forte dispersion.



Évolution du nombre d'individus au cours du temps.



État de la forêt à l'instant final.

FIG. 3 : Test 2 : faible dispersion.

## IV. CALAGE DE PARAMÈTRE PAR GRADIENT STOCHASTIQUE

Bien que nous disposions de données fournies par l'unité "Dynamique des forêts naturelles" du CIRAD nous avons préféré – avant de traiter des problèmes de statistique – vérifier dans quelle mesure le genre de modèle proposé ici est "pilotable" ou non.

Pour cela on se fixe une caractéristique cible comme une taille de population  $N^*$ , le problème est de savoir s'il est possible de régler un paramètre, par exemple le taux de naissance  $\lambda^n$ , afin de retrouver une population empirique moyenne de  $N^*$ . Le but est naturellement de faire cela automatiquement.

Nous faisons appel à un algorithme de gradient stochastique, notamment sous sa forme dite de KieferWolfowitz. Les algorithmes de gradients stochastiques combinent la méthode d'optimisation du gradient et la méthode de Monte Carlo afin d'optimiser un critère qui s'écrit sous forme d'une espérance.

Ici nous souhaitons minimiser, pour  $k$  grand, le critère :

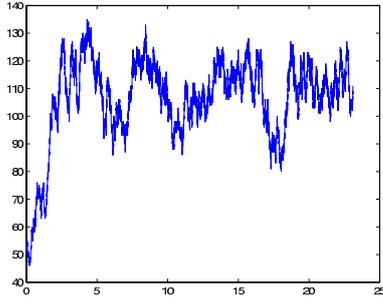
$$J(\lambda^n) = \mathbb{E}_{\lambda^n} (|\nu_{T_k}| - N^*)^2.$$

**ATTENTION** : ici  $|\nu_{T_k}|$  est le cardinal de l'ensemble  $\nu_{T_k}$ .  $\mathbb{E}_{\lambda^n}$  signifie que le processus est engendré avec la valeur  $\lambda^n$ .

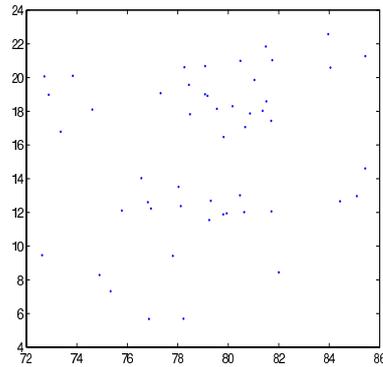
Pour être plus rigoureux, il faut comprendre "pour  $k$  grand" dans un sens ergodique : le critère rigoureux serait  $\lim_{T \uparrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (|\nu_t| - N^*)^2 dt$ .

L'algorithme de gradient stochastique s'écrit :

$$\lambda_{k+1}^n \leftarrow \lambda_k^n - a_k \frac{\hat{J}(\lambda_k^n + c_k) - \hat{J}(\lambda_k^n - c_k)}{2c_k}, \quad (1)$$

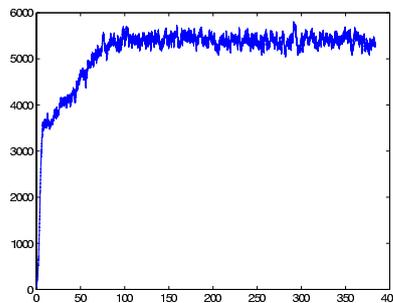


Évolution du nombre d'individus au cours du temps.

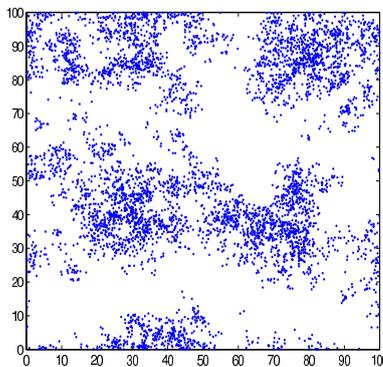


État de la forêt à l'instant final

FIG. 4 : Test 3 : forte compétition



Évolution du nombre d'individus au cours du temps.



État de la forêt à l'instant final.

FIG. 5 : Test 4 : faible compétition.

où

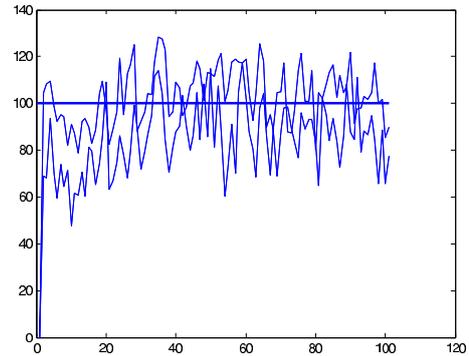
- (i)  $\hat{J}(\lambda_k^n \pm c_k)$  est l'approximation empirique de  $J(\lambda_k^n \pm c_k)$  calculée en simulant une forêt de paramètre  $\lambda_k^n \pm c_k$  et à l'aide d'une moyenne mobile ;
- (ii) les paramètres  $a_k$  et  $c_k$  sont choisis tels que

$$\sum_k a_k c_k < \infty \quad \text{et} \quad \sum_k a_k^2 / c_k^2 < \infty .$$

En pratique il est conseillé de prendre  $a_k = a \times k^{-1}$  et  $c_k = c \times k^{-1/6}$  avec  $a$  et  $c$  deux constantes positives [3].

- (iii) Dans (1) il est nécessaire de projeter à chaque itération l'estimée dans un intervalle  $[\lambda_{min}^n, \lambda_{max}^n]$  donné.

Comme les suites  $a_k$  et  $c_k$  dépendent itérativement de  $k$ , alors le choix des constantes  $a$  et  $c$  est déterminant pour la vitesse de convergence de l'algorithme. En effet, si on fixe deux valeurs faibles de  $a$  et  $c$  au départ, alors, comme le montre la Figure 6, on obtient une convergence avec une vitesse un peu faible. De même, si on fixe deux valeurs plus ou moins élevées de  $a$  et  $c$ , on obtient une convergence avec une vitesse rapide comme on voit dans la Figure 7 pour la taille de la forêt et également pour le paramètre qui est dans cet exemple le taux de naissance  $\lambda^n$ .



Taille de population cible  $N^*$  (trait horizontal); évolution de  $k \mapsto \hat{N}^{\lambda_k^n - c_k}$  et  $k \mapsto \hat{N}^{\lambda_k^n + c_k}$ .

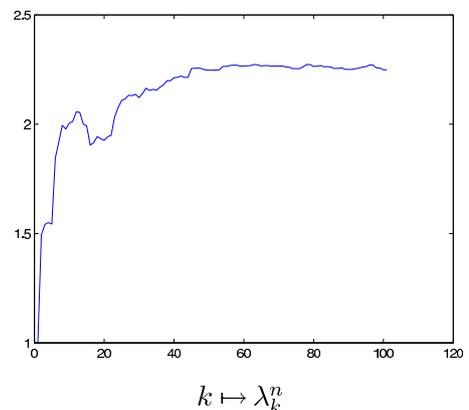
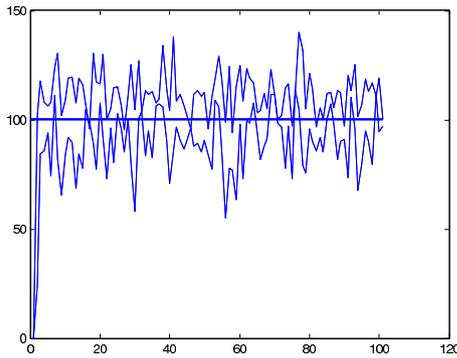
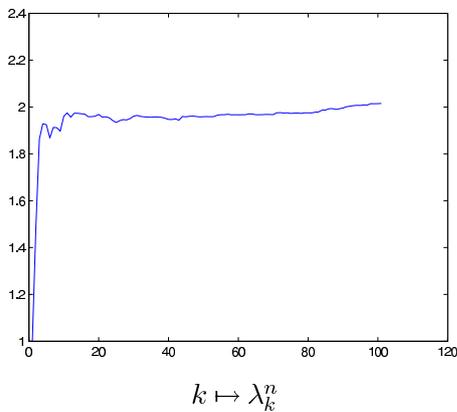


FIG. 6 : Optimisation du taux de naissance : convergence lente.



Taille de population cible  $N^*$  (trait horizontal); évolution de  $k \mapsto \hat{N}_k^{\lambda_k^r - c_k}$  et  $k \mapsto \hat{N}_k^{\lambda_k^r + c_k}$ .



$k \mapsto \lambda_k^r$

FIG. 7 : Optimisation du taux de naissance : convergence rapide

## V. CONCLUSION

Nous avons appliqué les résultats classiques sur les processus ponctuels et sur les processus de Markov de saut pur à un modèle (simple) de dynamique de forêt. Cette approche est individuelle : chaque arbre (individu) est explicitement représenté au sein d'une population. Les mécanismes de base (naissance, dispersion, mort naturelle, mort par compétition) sont explicitement décrits. Notamment le noyau de compétition est explicité sous la forme d'un taux de mort  $\lambda^c(x, \nu)$  qui décrit la compétition subie par l'individu  $x$  de la part de la forêt  $\nu$ .

Bien que très simple, le modèle qui en découle présente des caractéristiques très intéressantes. Il permet de rendre compte de différents comportements (dispersion faible ou forte, compétition faible ou forte).

Dans une première phase de simulation, nous avons décrit un algorithme de Monte Carlo en temps continu et en espace continu. Nous avons pu constater que, malgré sa simplicité, ce modèle permet de rendre compte d'une grande variété d'agrégations.

Dans le cadre du couplage du modèle aux données, nous nous sommes intéressés à une méthode de gradient stochas-

tique qui permet de "régler" un paramètre afin d'atteindre une caractéristique cible donnée. Ici nous avons optimisé le taux de naissance  $\lambda^n$  afin d'atteindre une taille de population cible  $N^*$  donnée.

Dans le futur, il serait intéressant (i) de prendre en compte la croissance des individus, (ii) de traiter le cas de deux ou quelques espèces. Avant de nous atteler à l'utilisation d'un tel modèle dans un cadre statistique, il serait intéressant de poursuivre des tests d'optimisation de paramètres par technique de gradient stochastique. Il serait alors envisageable d'utiliser ce genre de modèle dans un cadre statistique.

## RÉFÉRENCES

- [1] B. M. Bolker and S. W. Pacala. Using moment equations to understand stochastically driven spatial pattern formation in ecological systems. *Theoretical Population Biology*, 52 :179–197, 1997.
- [2] N. Fournier and S. Méléard. A microscopic probabilistic description of a locality regulated population and macroscopic approximations. *The Annals of Applied Probability*, 52 :1–50, 2004.
- [3] S. G. Henderson and B. L. Nelson. Stochastic gradient estimation. Course notes originally used University of Maryland, College Park, 2006.
- [4] N. Picard. *Modélisation de la dynamique de forêts naturelles tropicales : quel niveau de description ?* Habilitation à diriger des recherches, document de synthèse, Université de Montpellier II, 2007.

ANNEXE : LES ALGORITHMES DE SIMULATION NUMÉRIQUE

---

```

simuler  $\nu_0$  et poser  $T_0 = 0$ 
pour  $k = 1, 2, \dots$  faire
   $N \leftarrow |\nu_{T_{k-1}}|$ 
  % définition des horloges
   $m^n \leftarrow \lambda^n N$ 
   $m^m \leftarrow \lambda^m N$ 
   $m^c \leftarrow C_{\max} N^2$ 
   $m \leftarrow m^n + m^m + m^c$ 
  % nouvel instant d'évènement
   $S \sim \text{Exp}(m)$ 
   $T_k \leftarrow T_{k-1} + S$ 
   $u \sim \mathcal{U}[0, 1]$ 
   $i \sim \mathcal{U}\{1, \dots, N\}$ 
  si  $u \leq m^n/m$  alors
     $z \sim D(dz)$ 
     $\nu_{T_k} \leftarrow \nu_{T_{k-1}} \cup \{x_{\nu_{T_{k-1}}}^i + z\}$  % naissance
  sinon si  $u \leq (m^n + m^m)/m$  alors
     $\nu_{T_k} \leftarrow \nu_{T_{k-1}} \setminus \{x_{\nu_{T_{k-1}}}^i\}$  % mort naturelle
  sinon
     $j \sim \mathcal{U}\{1, \dots, N\}$ 
     $\beta \sim \mathcal{U}[0, 1]$ 
    si  $\beta \leq u(x_{\nu_{T_{k-1}}}^i, x_{\nu_{T_{k-1}}}^j)/C_{\max}$  alors
       $\nu_{T_k} \leftarrow \nu_{T_{k-1}} \setminus \{x_{\nu_{T_{k-1}}}^i\}$  % mort par compé-
      titio
    fin si
  fin si
fin pour

```

---

ALG. 1: *Algorithme de simulation de la forêt.*

---

```

choisir  $\lambda_0^n$ 
pour  $k = 1, 2, \dots$  faire
   $a_k = a/k$ 
   $c_k = c/k^{1/6}$ 
  % simulation des forêts (cf. Alg. 1) :
  simuler  $T_k^\pm$  avec le paramètre  $\lambda_k^n \pm c_k$ 
   $T_k \leftarrow T_k^+ \wedge T_k^-$ 
  simuler deux forêts :  $\nu_{T_k}^{\lambda_k^n \pm c_k}$ 
  % tailles de population empiriques :
   $\hat{N}^\pm \leftarrow \frac{1}{L} \sum_{\ell=k-L}^k |\nu_{T_\ell}^{\lambda_\ell^n \pm c_\ell}|$ 
  % itération de Kiefer-Wolfowitz :
   $\lambda_{k+1}^n \leftarrow \lambda_k^n + a_k \frac{(\hat{N}^+ - N^*)^2 - (\hat{N}^- - N^*)^2}{2c_k}$ 
fin pour

```

---

ALG. 2: *Algorithme de Kiefer-Wolfowitz.*

DOCTISS 2009

# Une approche de type $k$ -plus proches voisins pour la régression fonctionnelle

Thomas LALOË<sup>1</sup> (Doctorant 3eme année)  
GÉRARD BIAU<sup>2</sup>, BENOÎT CADRE<sup>3</sup> (Directeurs de thèse)

Institut de Mathématiques et de Modélisation de Montpellier  
Equipe de Probabilités et Statistique  
Université Montpellier II  
34095 MONTPELLIER cedex 5, France

<sup>1</sup>tlaloe@math.univ-montp2.fr

<sup>2</sup>gerard.biau@upmc.fr, <sup>3</sup>Benoit.Cadre@bretagne.ens-cachan.fr

*Résumé*— Tout le monde connaît le célèbre jeu ‘l’entraînement cérébral du Docteur Kawashima’. Un des tests phares de ce jeu est de dire à haute voix la couleur dans laquelle est écrit un mot. Imaginons que M. Nintendo désire une variante. Dans le but de proposer un jeu d’orthophonie, il souhaite faire un jeu dans lequel le joueur doit prononcer une phrase, et se voit attribuer une note en fonction de sa prononciation. Pour mettre au point ce jeu, il faut que M. Nintendo soit capable de déterminer de manière automatique si une phrase est correctement prononcée par son client. Pour cela, M. Nintendo dispose d’une base de données de phrases prononcées  $P_1, \dots, P_n$  associées à leur note  $N_1, \dots, N_n$ . Il lui faut alors définir une procédure qui à chaque nouvelle phrase  $P$  prononcée, associe une note  $N \in [0, 20]$ . Pour résoudre ce problème, nous utiliserons une méthodologie classique en apprentissage statistique : la méthode des  $k$ -plus proches voisins. Tous les paramètres introduits sont déterminés de manière automatique par les données.

*Mots-clés*— Apprentissage Statistique ; Données fonctionnelles ; Régression ;  $k$ -plus proches voisins.

## I. INTRODUCTION

Le problème de M. Nintendo (et de son ami le docteur Kawashima) est primordial ! Ils doivent trouver un moyen de faire en sorte que leur petite console soit capable de distinguer différents sons. En effet, une des attractions phares de leur nouveau jeu est un test orthophonique, dans lequel un joueur est noté sur sa prononciation. Pour cela le joueur devra lire à haute voix une phrase qui lui est présentée et le jeu lui retourne une note en fonction de sa prononciation. Seulement pour ça, il faut que leur nouveau produit soit lui-même

capable de différencier les différentes prononciations des joueurs (pour simplifier le problème on considèrera que les joueurs n’ont qu’une seule phrase à prononcer). Fort heureusement, messieurs Nintendo et Kawashima disposent de deux choses :

- ★ Une base de données de différentes prononciations  $P_1, \dots, P_n$  associés à leur note  $N_1, \dots, N_n$  ;
- ★ Un statisticien.

Revenons au commencement : comment est représentée une phrase lue à haute voix ? Lorsque l’on parle dans un micro, le son est enregistré sous la forme d’une courbe (voir figure 1). C’est à partir de cette courbe que nous allons travailler. En pratique cette courbe est observée en un nombre fini de points et chaque mot est alors représenté par un vecteur d’une certaine taille. Avec les progrès de l’informatique et l’augmentation des capacités de stockage, le nombre de points d’observation peut aujourd’hui être très élevé. Cette grande précision d’observation est à la fois une chance (elle permet de représenter le mot avec une grande fidélité) mais aussi un obstacle (plus la taille du vecteur, i.e. la dimension de notre observation sera grande, et plus les calculs seront compliqués). Face à ces évolutions, deux approches sont possibles :

1. Considérer les données comme des vecteurs de dimension finie ;
2. Considérer les données comme des fonctions, donc des objets de dimension infinie.

Dans le Premier cas on utilise les méthodes classiques d'apprentissage, tout en sachant que le grand nombre de dimension va diminuer leur efficacité. La deuxième approche, celle qui nous intéresse dans cet article, s'est considérablement développée ces dernières années et les méthodes classiques sont peu à peu adaptées pour prendre en compte la nature fonctionnelle des données (voir par exemple le livre de Ramsay et Silverman [7] pour une introduction complète aux données fonctionnelles).

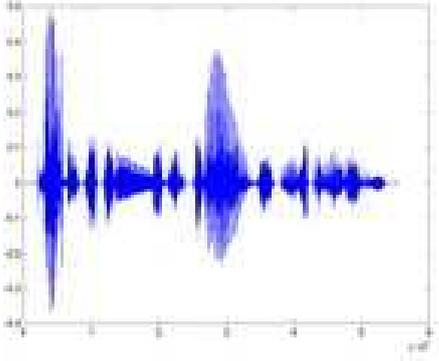


FIGURE 1 : Exemple de courbe sonore.

Mais revenons à notre Monsieur Nintendo et son problème. Comment déterminer la qualité  $N$  de la nouvelle phrase prononcée  $P$ ? L'idée de base est de comparer le nouveau son enregistré, donc cette nouvelle courbe, aux courbes de références  $P_1, \dots, P_n$ , et d'une façon ou d'une autre d'en déduire une note. Tout d'abord nous allons projeter nos courbes dans un espace de dimension réduite, autrement dit nous allons représenter chaque courbe par un vecteur de taille réduite  $d$ . Ensuite nous utiliserons une méthode simple : la méthode des  $k$ -plus proches voisins ( $k$ -ppv). C'est une méthode classique en apprentissage statistique, étudiée en 1975 par Hartigan [5]. On considère simplement les  $k$  courbes de références les plus proches de  $P$  et on calcule la moyenne de leur notes respectives (voir figure 2).

En utilisant le formalisme statistique, on considère  $(P, N)$  un couple de variables aléatoires de loi  $\rho$  (inconnue), et l'on cherche à calculer un estimateur  $f_n$  de la fonction de régression  $f$  définie par  $f(p) = \mathbb{E}[N|P = p]$ , généralisant ainsi les résultats de Biau, Bunea et Wegkamp [3]. Cette fonction de régression minimise l'erreur  $L_2$  donnée par  $\sigma^2 = \mathbb{E}(\|N - f(P)\|^2)$ . Nous présenterons une méthode pour choisir automatiquement la dimension  $d$  et le nombre de voisins  $k$ , entièrement pilotée par les données. Enfin nous montrerons la convergence faible de notre estimateur  $f_n$ .

## II. NOTATIONS ET DÉFINITIONS

On suppose que le couple  $(P, N)$  "vit" dans  $\mathcal{Z} = \mathcal{H} \times [0, 20]$ , où  $\mathcal{H}$  est un espace de Hilbert séparable de dimension infinie (pour faire simple  $\mathcal{H}$  admet une base orthonormale

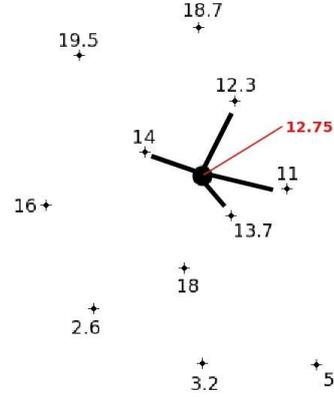


FIGURE 2 : Illustration de la méthode des  $k$ -ppv (avec  $k = 4$ ) :  $12.75 = 1/4(11 + 12.3 + 13.7 + 14)$

dénombrable). On note respectivement  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  et  $\|\cdot\|$  le produit scalaire et la norme associée sur  $\mathcal{H}$ , et on se donne  $(\phi_j)_{j \geq 1}$  une base orthonormale de  $\mathcal{H}$  (Akhiezer et Glazman [1]). Pour chaque observation  $P_i$ , on définit  $P_{ij} = \langle P_i | \phi_j \rangle$ . On sait que

$$P_i = \sum_{j=1}^{\infty} P_{ij} \phi_j.$$

Soit  $\mathcal{H}^{(d)}$ , l'espace vectoriel de dimension finie engendré par les fonctions  $\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_d\}$  (i.e. tout élément de  $\mathcal{H}^{(d)}$  est une combinaison linéaire des vecteurs  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_d$ ). A tout  $P_i \in \mathcal{H}$  on associe

$$P_i^{(d)} = \sum_{j=1}^d P_{ij} \phi_j.$$

Autrement dit, chaque phrase lue sera représentée par un vecteur de taille réduite  $d$ . Finalement, on note respectivement  $f$  et  $f_d$  les fonctions de régression dans  $\mathcal{H}$  et  $\mathcal{H}^{(d)}$ , et  $\sigma^2$  et  $\sigma_d^2$  leurs erreurs  $L^2$  respectives. En d'autres termes,  $f$  et  $f_d$  sont les meilleures fonctions permettant d'associer une note à une prononciation, au sens où  $\sigma^2$  et  $\sigma_d^2$  sont les plus petites erreurs possibles. Pour revenir au formalisme statistique, on a  $f(p) = \mathbb{E}[N|P = p]$ ,  $\sigma^2 = \int_{\mathcal{Z}} (n - f(p))^2 d\rho(p, n)$ , et pareillement dans  $\mathcal{H}^{(d)} \times [0, 20]$  pour  $f_d$  et  $\sigma_d^2$ . Tout au long de la présentation, on supposera que  $\mathbb{E}(N^2) < \infty$  p.s.

## III. $k$ -PLUS PROCHES VOISINS DANS $\mathcal{H}^{(d)}$

Commençons par définir notre estimateur de type  $k$ -plus proches voisins. Pour cela, on considère la suite  $(P_1^{(d)}, N_1), \dots, (P_n^{(d)}, N_n)$  où les observations ont été projetées sur  $\mathcal{H}^{(d)}$ . Pour chaque  $p$  dans  $\mathcal{H}^{(d)}$ , on ordonne les observations

$$\left( P_{(1)}^{(d)}(p), N_{(1)}(p) \right), \dots, \left( P_{(n)}^{(d)}(p), N_{(n)}(p) \right),$$

selon les distances euclidiennes croissantes  $\|P_i^{(d)} - p\|$  entre  $P_i^{(d)}$  et  $p$ . Autrement dit,  $P_{(i)}^{(d)}(p)$  est la  $i$ -ème prononciation la plus proche de  $p$  parmi les prononciations de référence  $P_j^{(d)}, j = 1, \dots, n$ . Si  $\|P_i^{(d)} - p\| = \|P_j^{(d)} - p\|$ ,  $P_i^{(d)}$  est le plus proche de  $p$  si  $i < j$ . L'estimateur de type  $k$ -plus proches voisins de  $f$  est alors défini (Györfi, Kohler, Krzyzak et Walk [4]) par

$$f_{n,k,d}(p) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_{(i)}(p).$$

Autrement dit, on calcule simplement la moyenne des notes des  $k$  prononciations de références les plus proches de  $p$ . Cet estimateur est assez naturel, dans le sens où il paraît logique que deux prononciations très proches aient des notes équivalentes. L'importance du choix du nombre de voisins est assez simple à comprendre. Si l'on choisit  $k$  trop grand on va considérer de l'information non pertinente, et l'on obtiendra un estimateur très lisse qui donnera la même note tout le temps. Et si au contraire on choisit  $k$  trop petit, l'estimateur sera très irrégulier et deux prononciations proches pourront se voir attribuer des notes très différentes.

Pour choisir simultanément la dimension  $d$  et le nombre de voisins  $k$ , nous suggérons la méthode de type "data-splitting" suivante. Premièrement on coupe les données en un ensemble d'apprentissage  $\{(P_i, N_i), i \in \mathcal{I}_\ell\}$  de taille  $\ell$ , et un ensemble de validation  $\{(P_j, N_j), j \in \mathcal{J}_m\}$  de taille  $m$ , avec  $m + \ell = n$  ( $\ell$  et  $m$  peuvent être des fonctions de  $n$ ). Pour tout  $d \geq 1$ ,  $1 \leq k \leq \ell$ , on construit un estimateur de type plus proches voisins à partir de l'ensemble d'apprentissage. Ensuite on utilise l'ensemble de validation pour choisir  $\hat{d}$  et  $\hat{k}$  de la façon suivante :

$$(\hat{d}, \hat{k}) \in \arg \min_{d \geq 1, 1 \leq k \leq \ell} \left[ \frac{1}{m} \sum_{j \in \mathcal{J}_m} \left( N_j - f_{\ell,k,d}(P_j^{(d)}) \right)^2 + \frac{\lambda_d}{\sqrt{m}} \right].$$

Le terme  $\lambda_d/\sqrt{m}$  est un terme de pénalité qui tend vers l'infini avec  $d$  pour éviter de trop grandes valeurs pour  $d$ .

Cette méthode, qui est très facile à programmer, conduit à l'estimateur

$$\hat{f}_n(p) := f_{\ell, \hat{k}, \hat{d}}(p^{(\hat{d})}),$$

qui a une erreur

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(\hat{f}_n) &= \int_{\mathcal{Z}} (y - \hat{f}_n(x))^2 d\rho(x, y) \\ &= \int_{\mathcal{H}} (\hat{f}_n(x) - f(x))^2 d\rho_P(x) + \sigma^2. \end{aligned}$$

Finalement, sous des hypothèses similaires à celles de Biau, Bunea et Wegkamp [2], on montre que  $\hat{f}_n$  converge faiblement vers  $f$ , i.e.,

$$\mathbb{E} \int_{\mathcal{H}} (\hat{f}_n(x) - f(x))^2 \rightarrow 0 \text{ quand } n \rightarrow \infty.$$

En d'autres termes, lorsque la taille de la base de données est suffisamment grande, notre estimateur est très proche de la vraie fonction de régression, c'est-à-dire de la manière optimale d'attribuer une note à une prononciation.

#### IV. CONCLUSION

En conclusion, nous pouvons donc dire que nous avons apporté une solution au problème de M. Nintendo. En effet, nous avons développé une méthode fiable permettant d'affecter une note à une nouvelle prononciation. Cette méthodologie, proposée par Laloë [6], est bien sûr beaucoup plus large, et donne une solution à la fois théorique et pratique au problème de la classification de données fonctionnelles.

#### RÉFÉRENCES

- [1] N. I. Akhiezer and I. M. Glazman. *Theory of Linear Operators in Hilbert Space*. Dover Publications Inc., New York, 1993.
- [2] G. Biau, F. Bunea, and M. H. Wegkamp. Functional classification in Hilbert spaces. *IEEE Transactions on Information Theory*, 51(6) :2163–2172, 2005.
- [3] G. Biau, L. Devroye, and G. Lugosi. On the performance of clustering in Hilbert spaces. *IEEE Transactions on Information Theory*, 54 :781–790, 2007.
- [4] L. Györfi, M. Kohler, A. Krzyzak, and H. Walk. *A Distribution-Free Theory of Nonparametric Regression*. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag, New York, 2002.
- [5] J. A. Hartigan. *Clustering Algorithms*. John Wiley & Sons, New York-London-Sydney, 1975. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics.
- [6] T. Laloë. A  $k$ -nearest neighbor approach for functional regression. *Statistics & Probability Letters*, 78(10) :781–790, 2008.
- [7] J. O. Ramsay and B. W. Silverman. *Functional Data Analysis*. Springer Series in Statistics. Springer, New York, second edition, 2005.

DOCTISS 2009

# Estimation de régularité locale\*

Rémi SERVIEN<sup>1</sup> (Doctorant 3e année)  
Alain BERLINET<sup>2</sup> (Directeur de thèse)

Institut de Mathématiques et de Modélisation de Montpellier  
UMR CNRS 5149, Equipe de Probabilités et Statistique  
Université Montpellier II, CC 051,  
Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, France

<sup>1</sup>rservien@math.univ-montp2.fr

<sup>2</sup>berlinet@math.univ-montp2.fr

**Résumé**— Un volet important de la Statistique concerne l'estimation de certaines caractéristiques (moyenne, variance, mode, probabilité de grandes valeurs, ...) d'une quantité qui a été observée et qui est considérée comme une variable aléatoire. Ces informations sont présentes dans la loi de probabilité de la variable, mais cette dernière est en général inconnue et différentes techniques sont utilisées en pratique pour l'estimer. Ce texte de vulgarisation en présente quelques-unes. Cependant des difficultés apparaissent lorsque la loi de probabilité comporte des irrégularités. Afin de les mesurer et d'y remédier, il est possible de définir et d'utiliser un *indice de régularité*. Mais cet indice à caractère fortement local s'avère délicat à estimer.

**Mots-clés**— Statistique mathématique : statistique non-paramétrique ; densité de probabilité ; point de Lebesgue ; indice de régularité.

## I. INTRODUCTION

Considérons un médecin qui aurait comme données les poids de ses patients et qui souhaiterait à partir de ses données effectuer différentes analyses concernant le poids des personnes dans l'ensemble de la population de sa région. Ce médecin pourrait par exemple souhaiter définir un poids maximal au-delà duquel la population totale (c'est à dire non limitée à son échantillon) est en surpoids (et inversement pour le sous-poids). Il fixe, selon ses connaissances, un seuil à 5% pour le pourcentage de personne en surpoids (et en sous-poids). Pour définir le poids maximal à ne pas dépasser il veut donc remonter, à l'aide de ses données, à la loi de la variable poids sur la population totale. Il peut aussi vouloir estimer la proportion de personnes dont le poids va se trouver dans tel ou tel intervalle. Pour cela il va considérer que le poids d'une personne est une variable aléatoire et il va estimer certaines

de ses caractéristiques à partir de son échantillon. Nous allons tout d'abord rappeler quelques notions primordiales en Statistique. Puis nous verrons certaines méthodes permettant d'estimer la loi d'une variable aléatoire à l'aide des données tout d'abord dans un cadre simple, puis en élargissant notre domaine d'étude.

La densité de probabilité  $f$  d'une variable aléatoire  $X$  (le poids dans notre exemple d'introduction), modélisant un phénomène, caractérise entièrement la loi de  $X$  (valeurs les plus probables, valeurs les moins probables, moyenne, variance ...). Il est également possible de caractériser la loi de  $X$  à l'aide de la fonction de répartition  $F$  définie pour tout nombre réel  $t$  par

$$F(t) = P(X \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt.$$

Le nombre  $F(t)$  est donc la probabilité que  $X$  prenne une valeur inférieure ou égale à la valeur  $t$ . Les fonctions  $f$  et  $F$  sont donc 2 manières différentes de caractériser un phénomène. Nous pouvons voir sur les figures 1 et 2 ci-dessous des exemples avec des lois Normales de moyennes et de variances différentes.

En règle générale,  $f$  ou  $F$  sont malheureusement inconnues. Les données recueillies sont les  $n$  réalisations de la variable aléatoire  $X$  (par exemple le poids),  $S_n = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , tirées à partir de la densité inconnue  $f$ . Un problème classique en Statistique est donc de remonter à  $f$  ou à  $F$  à l'aide de l'échantillon  $S_n$ .

## II. QUELQUES ESTIMATEURS USUELS

Certains estimateurs, que nous allons définir ci-dessous, sont relativement simples et n'en restent pas moins très efficaces dans la plupart des cas.

\*Travail réalisé dans le cadre d'une thèse co-financée par le CNRS et la région Languedoc-Roussillon.

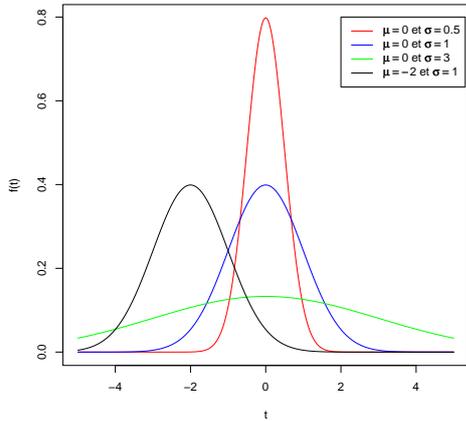


FIG. 1 : Densités de lois Normales d'espérances  $\mu$  et d'écart-types  $\sigma$  différents.

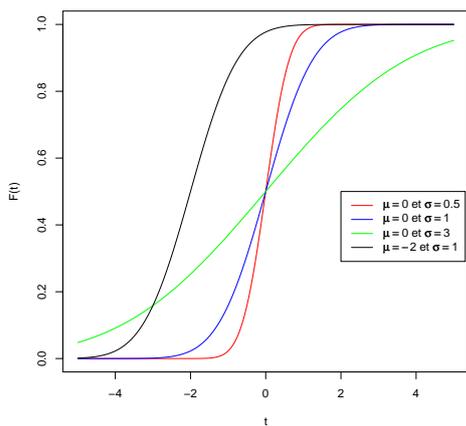


FIG. 2 : Fonctions de répartition de lois Normales d'espérances  $\mu$  et d'écart-types  $\sigma$  différents.

### II.1. Fonction de répartition empirique

Une première idée assez naturelle pour l'estimation de la fonction de répartition est d'utiliser les fréquences mesurées pour les intervalles de la forme  $] -\infty, t]$ . On obtient alors la fonction de répartition empirique  $F_n$  telle que

$$F_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{]-\infty, t]}(X_i).$$

Par exemple, si le médecin recueille les 10 valeurs suivantes :  $\{60, 61.041, 61.428, 69.92, 72.341, 73.295, 78.767, 86.38, 94.015, 95.004\}$ , nous obtenons la figure 3 comme estimation de la fonction de répartition par  $F_n$  (cet échantillon de taille très petite nous permet d'obtenir une figure bien lisible mais est bien sûr impropre à l'étude envisagée).

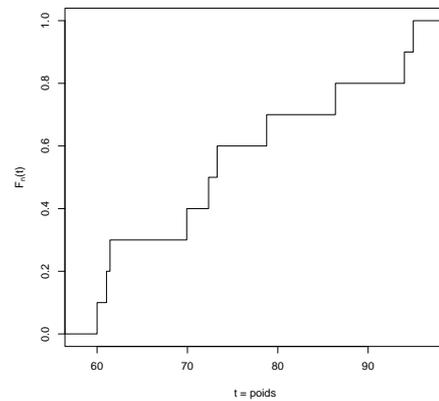


FIG. 3 : Fonction de répartition empirique pour la variable poids avec  $n = 10$ .

Avec un échantillon de taille  $n = 1000$ , nous obtenons l'estimation de la figure 4. Nous pouvons remarquer que l'estimation à l'aide de  $F_n$  est très proche de la fonction de répartition d'une loi normale d'espérance 75 et d'écart-type 10. Il est possible de tester, à l'aide de résultats que nous ne citerons pas ici, que  $F_n$  et  $F$  peuvent être appariées et, par la suite, de résoudre le problème en déterminant les zones de poids à risques.

Finalement, cet estimateur est très simple à mettre en œuvre. En effet, il ne dépend d'aucun paramètre extérieur et converge vers  $F$  lorsque  $n$  tend vers l'infini. Cependant, cet estimateur est clairement discontinu ce qui peut poser des problèmes notamment en terme d'estimation locale. Certains estimateurs comme l'estimateur à noyau [6] permettent de régler ce problème en lissant la fonction de répartition empirique. Mais ils font intervenir un nouveau paramètre de lissage (la taille de la fenêtre) qu'il faut calibrer.

### II.2. Estimateur des $k_n$ -plus proches voisins.

Les zones de densité élevée sont celles où les points de l'échantillon  $S_n$  vont se retrouver très proches les uns des autres, pour autant que l'on dispose de suffisamment d'ob-

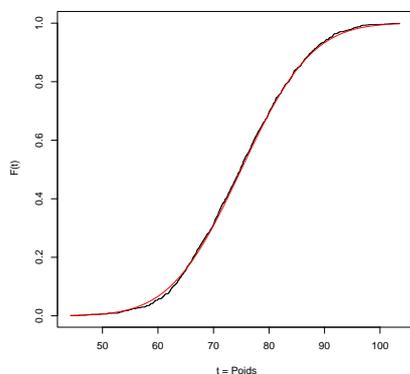


FIG. 4 :  $F_n$  pour la variable poids avec  $n = 1000$  (en noir) et fonction de répartition d'une loi  $N(75,10)$  (en rouge).

servations. Cette idée est à la base de l'estimateur des  $k_n$ -plus proches voisins [4] suivant

$$f_{k_n}(x) = \frac{k_n}{n||X_{(k_n)}(x) - x||},$$

où  $k_n$  sera le nombre de voisins à prendre en compte et  $X_{(k_n)}(x)$  sera le  $k_n$ -ème point de l'échantillon  $S_n$  le plus proche de  $x$ . Nous pouvons remarquer que plus le  $k_n$ -ème point sera proche, plus la valeur de l'estimateur de la densité  $f_{k_n}(x)$  sera élevée et inversement. Mais, ici aussi, la principale difficulté sera de fixer le nombre de voisins  $k_n$  à prendre en compte. Les figures 5 et 6 ci-dessous sont ainsi réalisées sur notre échantillon de taille 1000 pour la variable poids avec respectivement  $k_n = 50$  et  $k_n = 200$ . Elles sont fortement différentes et renforcent l'idée de forte dépendance au nombre de voisins  $k_n$ .

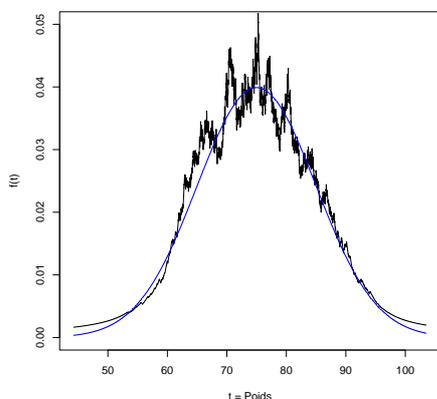


FIG. 5 : Estimateur des plus proches voisins avec  $k_n = 50$ (en noir) et densité de la loi  $N(75,10)$ (en bleu).

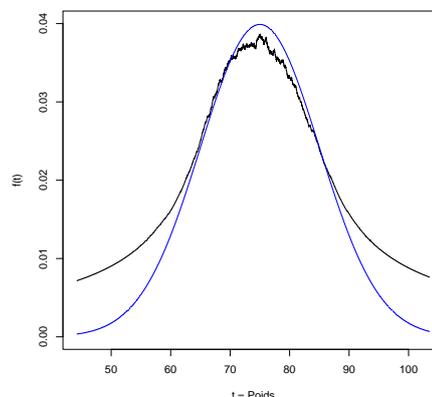


FIG. 6 : Estimateur des plus proches voisins avec  $k_n = 400$  et densité de la loi  $N(75,10)$ (en bleu).

Déterminer un bon estimateur du nombre de voisins  $k_n$  est donc primordial afin d'obtenir un bon estimateur de la densité. On peut noter que le problème pour le calibrage de la fenêtre de l'estimateur à noyau est sensiblement le même.

### III. DIFFICULTÉS

Pour des densités plus "délicates" (comprenant par exemple des discontinuités comme sur la figure 7 ci-dessous), les méthodes simples ci-dessus peuvent rencontrer des problèmes.

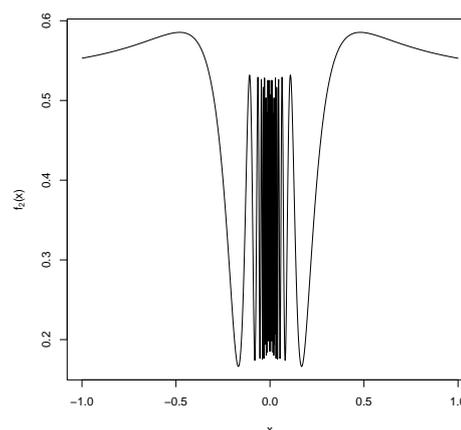


FIG. 7 : Représentation de la densité  $f_2$  telle que  $f_2(x) = (2 - \cos(1/x) + 2x \sin(1/x))/c$ .

Il est notamment possible d'en rencontrer en illumination : il s'agit de modéliser la géométrie d'objets, les propriétés optiques de la lumière et le processus de propagation de la lumière afin de prédire l'illumination d'une scène ou d'une pièce d'habitation construites à partir de ces données.

Il est fréquent d’avoir des discontinuités dans le recueil des données. En effet, le passage de l’ombre à la lumière ou d’un objet à l’autre fait varier très brutalement la densité comme nous pouvons le remarquer sur la figure 8 ci-dessous, où la luminosité varie très rapidement entre les derniers points éclairés et les premiers points correspondants au lapin [5]. Grossièrement, la figure 7 pourrait être la vue d’un classeur entrouvert rempli de feuilles. Ces points de discontinuité sont pourtant très importants à estimer car ils délimitent le contour des différents objets. Utiliser un estimateur non local peut alors nous induire en erreur et lisser ou décaler la discontinuité si elle est trop brutale ou, dans le pire des cas, ne pas la détecter. De plus, les conclusions de certains théorèmes d’estimation (notamment sur le mode [1]) ne sont plus valables sans les hypothèses de continuité sur la densité  $f$ .

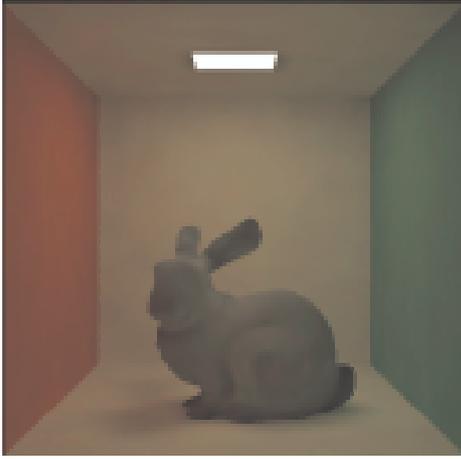


FIG. 8 : Exemple simple de scène modélisée en illumination.

Il faut donc envisager de faire intervenir des notions qui seraient moins contraignantes que celle de la continuité et permettant de travailler de manière plus locale au sens de la loi de probabilité sous-jacente.

#### IV. ELÉMENTS DE RÉPONSE

La mesure de probabilité  $P$  associée à la densité de probabilité  $f$  vérifie

$$P([x - \delta, x + \delta]) = \int_{x-\delta}^{x+\delta} f(x)dx = F(x + \delta) - F(x - \delta).$$

On peut remarquer que, lorsque  $\delta \rightarrow 0$ , les valeurs de  $P([x - \delta, x + \delta])/(2\delta)$  et de la densité au point  $x$  sont très proches si la densité  $f$  n’est pas trop irrégulière. C’est pourquoi nous définissons  $x$  un point de Lebesgue de la mesure  $P$  si

$$f(x) = \lim_{\delta \rightarrow 0^+} \frac{P([x - \delta, x + \delta])}{2\delta}.$$

Cette notion est plus large que celle de continuité. Si nous reprenons l’exemple de la densité  $f_2$  de la figure 7 il est clair

qu’en 0 nous avons une discontinuité et ni limite à droite ni limite à gauche. Et pourtant, on obtient

$$\lim_{\delta \rightarrow 0^+} \frac{P_2([- \delta, + \delta])}{2\delta} = 2/c,$$

où  $P_2$  est la mesure associée à  $f_2$ . En posant  $f_2(0) = 2/c$ , 0 est donc bien un point de Lebesgue. Cette notion nous permet alors d’étendre certains théorèmes.

Il est possible d’aller plus loin que cette définition. En effet, si en  $x$  point de Lebesgue on a le développement suivant

$$\frac{P([x - \delta, x + \delta])}{2\delta} = f(x) + a_x \delta^{\alpha_x} + o(\delta^{\alpha_x}), \quad \alpha_x > 0$$

alors  $\alpha_x$  est appelé *indice de régularité* de la mesure  $P$  au point  $x$  [3]. Clairement, cet indice reflète le degré de régularité de la mesure  $P$  autour du point  $x$ . Plus  $\alpha_x$  sera grand, plus  $P$  sera lisse et inversement. Pour revenir à l’exemple de l’illumination, l’étude de  $\alpha_x$  pourra nous aider à déterminer précisément les contours des objets autour du point  $x$  où la luminosité (mesurée par la densité) varie brutalement.

Cet indice intervient également dans différents problèmes d’estimation comme l’estimation du mode ou la correction du nombre optimal de voisins pour l’estimateur de la densité. Nous pouvons en effet voir sur la figure 9 ci-dessous trois estimations différentes de la densité  $f_1(x) = 0.5 * \exp(-|x|)$  en 0 en fonction de  $k_n$ . Nous comparons les estimations issues de l’estimateur à noyau, de  $f_{k_n}$  et de  $f_{k_n}(a)$  l’estimateur des  $k_n$ -plus proches voisins décrit précédemment corrigé par un terme dépendant de l’indice de régularité  $\alpha_x$  [2]. Il est clairement moins dépendant du choix de  $k_n$  que les deux autres et donne une bonne estimation de  $f_1(0)$  indépendamment de  $k_n$ .

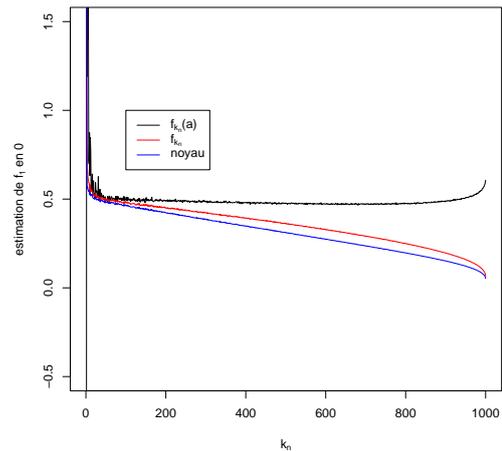


FIG. 9 : Représentation des estimateurs  $f_{k_n}, f_{k_n}(a)$  et  $f_{h_n}$  de la densité  $f_1$  en fonction de  $k_n$  pour  $n = 1000$ .

Mais l’estimation de  $\alpha_x$  est difficile car cet indice est fortement local. Par exemple, nous pouvons considérer la densité  $f_3(x) = 1 - (\sqrt{2}/3) + \sqrt{|x|}$  pour  $x \in [-0.5, 0.5]$ , qui

est représentée sur la figure 10 ci-dessous. Pour cette densité, nous obtenons  $\alpha = 1$  si  $x \neq 0$  mais  $\alpha = 0.5$  si  $x = 0$ . L'indice de régularité pouvant varier de manière aussi brutale, il va s'avérer délicat à estimer.

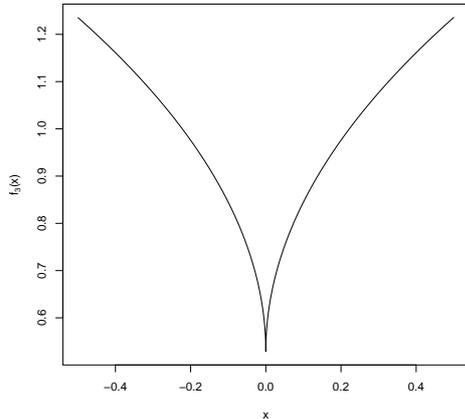


FIG. 10 : Représentation graphique de la densité  $f_3$ .

### V. EXEMPLE D'ESTIMATION DE $\alpha_x$

Si on se place en  $x = 0$  et que l'on définit la fonction  $\phi$  comme

$$\phi(h) = \frac{F(2h) - F(0) - 2hF'(0)}{F(h) - F(0) - hF'(0)},$$

on peut montrer que

$$\lim_{h \rightarrow 0} \phi(h) = 2^{\alpha_0 + 1}.$$

En appliquant cette définition à une loi Normale  $N(0,1)$  ( $\alpha_0 = 2$  dans ce cas), nous pouvons voir sur la figure 11 que l'utilisation dans l'expression de  $\phi$  de la fonction de répartition empirique (et alors que  $n = 10000$ ) à la place de la véritable fonction de répartition ne nous permet pas de définir un bon estimateur de  $\alpha_0$ .

Même en utilisant différentes techniques de lissage sur le numérateur et le dénominateur de  $\phi$ , nous n'obtenons pas un bon estimateur pour  $\alpha_x$ . Ceci est dû aux très légères erreurs que nous faisons en estimant le dénominateur et qui se répercutent énormément sur le calcul de  $\phi(h)$ .

D'autres estimateurs faisant notamment intervenir différentes estimations de la fonction de répartition  $F$  s'avèrent convergents. Leur exploitation est en cours.

### VI. CONCLUSION

L'utilisation de la notion de point de Lebesgue et surtout celle de l'indice de régularité nous permet d'envisager la résolution de certains cas problématiques. L'indice de régularité intervient également dans différents problèmes d'estimation et nous donne d'importantes indications sur le comportement local de la mesure. Cependant, l'estimation de

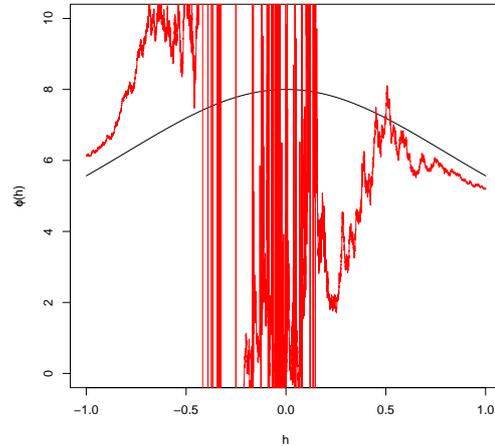


FIG. 11 : Utilisation de  $F$  (en noir) et de  $F_n$  (en rouge) dans la fonction  $\phi$ .

ce dernier est rendue difficile par son caractère fortement local.

### RÉFÉRENCES

- [1] Abraham, C., Biau, G. et Cadre, B. « Simple estimation of the mode of a multivariate density, » *The Canadian Journal of Statistics*, vol. 31, pp. 23–34, 2003.
- [2] Beirlant, J., Berlinet, A. et Biau, G. « Higher order estimation at Lebesgue points, » *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, vol. 60, pp. 651–677, 2008.
- [3] Berlinet, A. et Levallois, S. « Higher order analysis at Lebesgue points, » Dans M. Puri, éditeur, *G.G Roussas Festschrift - Asymptotics in Statistics and Probability*, pp. 1–16, 2000.
- [4] Loftsgaarden, D.O. et Quesenberry, C.P. « A nonparametric estimate of a multivariate density function, » *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 36, pp. 1049–1051, 1965.
- [5] Lavignotte, F. et Paulin, M. « Scalable Photon Splatting for Global Illumination, » *Graphite*, Melbourne, 2003.
- [6] Rosenblatt, M. « Remarks on some non-parametric estimates of a density function, » *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 27, pp. 832–837, 1956.

# Introduction de la négation atomique dans les graphes conceptuels

Khalil BEN MOHAMED <sup>1</sup> (Doctorant 2<sup>e</sup> année)  
Marie-Laure MUGNIER <sup>2</sup>, Michel LECLÈRE <sup>3</sup> (Directeurs de thèse)

LIRMM, Univ. Montpellier 2, CNRS  
161, rue Ada  
34392 Montpellier, France

<sup>1</sup>benmohamed@lirmm.fr  
<sup>2</sup>mugnier@lirmm.fr, <sup>3</sup>leclere@lirmm.fr

**Résumé**— Nous nous intéressons à l'introduction de la négation atomique dans le formalisme des graphes conceptuels. La négation atomique permet d'accroître l'expressivité de ce langage de représentation de connaissances, donnant la possibilité d'exprimer des connaissances de la forme « cette entité n'a pas cette propriété », « cette relation n'apparaît pas entre ces entités »... Nous étudions son introduction d'un point de vue sémantique (que signifie la négation ?) et computationnel (que devient la complexité des problèmes ?).

**Mots-clés**— Graphes conceptuels, négation atomique, déduction, monde clos, monde ouvert.

## I. INTRODUCTION

Dans ce papier, nous étudions l'introduction d'une forme de négation basique mais néanmoins fondamentale, la négation atomique. Elle porte uniquement sur un littéral et non pas sur une formule entière :  $\neg sur(A, B)$  mais pas  $\neg (sur(A, B) \wedge sur(C, D))$  par exemple. La négation atomique permet d'exprimer des connaissances de la forme « cette entité n'a pas cette propriété », « cette relation n'apparaît pas entre ces entités »...

Différentes interprétations de la négation atomique sont étudiées. Si la question posée est de la forme «  $\neg sur(A, B)$  ? » (est-ce que  $A$  n'est pas sur  $B$ ), le symbole «  $\neg$  » peut être interprété de différentes façons :

1. La connaissance «  $sur(A, B)$  » ne peut pas être prouvée.
2. La connaissance «  $\neg sur(A, B)$  » peut être prouvée.

Dans le premier cas, nous sommes en présence de l'hypothèse du monde clos, notamment utilisé en bases de données classiques, qui suppose une connaissance complète du monde : si  $sur(A, B)$  n'apparaît pas dans la base alors  $\neg sur(A, B)$  est vrai. Dans le second cas nous avons une

connaissance incomplète du monde, c'est à dire que si ni  $sur(A, B)$  ni  $\neg sur(A, B)$  n'apparaît dans la base alors nous ne pouvons rien déduire directement, soit  $sur(A, B)$  est vrai, soit  $\neg sur(A, B)$  est vrai. Tout ce qui n'apparaît pas dans la base est considéré comme « inconnu ». Pour que  $\neg sur(A, B)$  soit vrai il faut donc qu'il soit déductible de la base. C'est l'hypothèse du monde ouvert.

L'article s'articule comme suit : dans la section II nous introduisons brièvement le formalisme des graphes conceptuels. Dans la section III nous étudions différentes sortes de négation, que ce soit d'un point de vue sémantique ou computationnel sur deux problèmes particuliers.

## II. NOTIONS SUR LES GRAPHES CONCEPTUELS

Le formalisme des graphes conceptuels [1] est un formalisme de représentation de connaissances basé sur des graphes (ou hypergraphes) étiquetés. Il est développé depuis maintenant près de 15 ans au LIRMM par l'équipe RCR (voir [2]). Dans ce formalisme, non seulement les connaissances sont représentées par des graphes, mais les mécanismes de raisonnement sont également réalisés par des opérations de graphes. De plus, le raisonnement est logiquement fondé, ce qui permet de garantir les résultats obtenus. Nous donnons ici un bref aperçu de ce formalisme à travers quelques notions fondamentales qui seront utilisées par la suite.

### II.1. Les graphes conceptuels polarisés

Un graphe conceptuel est un graphe biparti composé de deux sortes de sommet : les sommets concepts définissant des entités et les sommets relations représentant des relations entre ces entités. Chaque sommet a un type : par exemple « Voiture » ou « Personne » pour un sommet concept et « appartient » ou « possède » pour un sommet relation. Un som-

met concept possède également un marqueur permettant soit de représenter une entité connue (ex. « Pablo », « Montpellier »...) soit inconnue (noté « \* » sur les dessins). Les étiquettes des sommets (types et marqueurs) sont prises dans un vocabulaire appelé *support* (ou *ontologie*) qui peut être plus ou moins riche. En ce qui concerne les dessins de graphe, les sommets concepts sont représentés par des rectangles et les sommets relations par des ovales, et les arêtes liant un sommet relation à ses voisins concepts sont étiquetées de 1 à l'arité du sommet relation (son nombre de voisins).

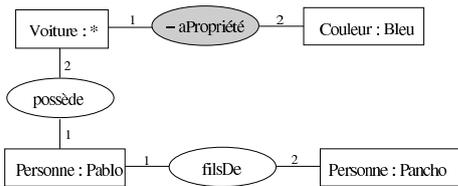


FIG. 1 : Un graphe conceptuel polarisé.

Enfin, on dit qu'un graphe conceptuel est polarisé s'il possède au moins un sommet relation négatif (le graphe de la figure 1 est polarisé car il possède un sommet relation négatif, coloré en gris sur le dessin).

### III.2. L'homomorphisme de graphes conceptuels

La notion fondamentale pour comparer des graphes conceptuels est une application d'un graphe dans un autre appelée *homomorphisme*. Un homomorphisme  $\pi$  de  $Q$  dans  $G$  (deux graphes conceptuels) est une application des sommets de  $Q$  sur les sommets de  $G$  qui préserve les arêtes, i.e. si  $xy$  est une arête dans  $Q$ , alors  $\pi(x)\pi(y)$  est une arête dans  $G$ . Intuitivement, l'existence d'un homomorphisme de  $Q$  dans  $G$  signifie que la connaissance représentée par  $Q$  est contenue dans  $G$ .

### III. DIFFÉRENTES SORTES DE NÉGATION

Pour illustrer les différences fondamentales entre les deux approches qui sont étudiés (monde clos et monde ouvert), nous nous focalisons sur deux problèmes particuliers : (1) la déduction de graphes polarisés (Déduction) : « Étant donné deux graphes polarisés  $Q$  et  $G$ , est-ce que  $Q$  se déduit de  $G$  ? », c'est à dire « est-ce que les informations représentées par  $Q$  sont contenues dans  $G$  ? » (2) le Query Answering sous forme décisionnelle (QAD) : « Étant donné deux graphes polarisés  $Q$  et  $G$  (avec  $Q$  représentant une requête), existe-t-il une réponse à  $Q$  dans  $G$  ? », c'est à dire « l'ensemble des réponses à  $Q$  dans  $G$  est-il non-vide ? »

Il est à noter que pour des graphes conceptuels positifs, ces deux problèmes sont équivalents et reviennent à rechercher l'existence d'un homomorphisme de  $Q$  dans  $G$ . Ceci est un problème *NP-complet*. intuitivement, les problèmes dans *NP* (une classe de complexité, voir [3]) sont les problèmes qui peuvent être résolus en énumérant l'ensemble des solutions possibles et en les testant à l'aide d'un algorithme polynomial. Et un problème est dit *NP-complet* s'il fait partie des problèmes les plus difficiles de la classe *NP*.

L'exemple de la figure 2 servira de fil rouge à notre démonstration des différences fondamentales de la résolution des problèmes susmentionnés selon l'hypothèse choisie. Dans un souci de clarté des dessins et sans perte de généralité, nous représenterons la connaissance « n'a pas la propriété d'être de couleur bleu » (voir figure 1) par le sommet relation étiqueté « -bleu ».

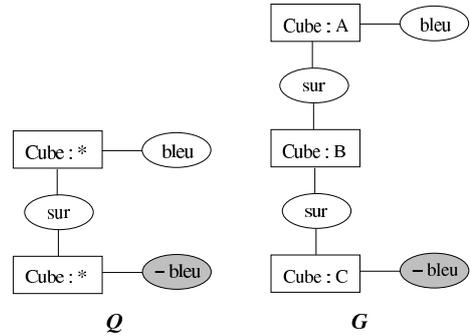


FIG. 2 : Deux graphes polarisés  $Q$  et  $G$ .

#### III.1. L'hypothèse du monde clos

L'hypothèse du monde clos est généralement utilisée dans les bases de données. Elle suppose une connaissance complète du monde, traduisant l'absence d'une information par sa négation. Il n'est alors plus possible de résoudre les problèmes de *Déduction* et de *QAD* par une simple recherche d'homomorphisme : une étape préliminaire est nécessaire. Le graphe  $G$  doit être complété avec toutes les informations négatives possibles en conformité avec son support. On notera un tel graphe *completed(G)*.

Le problème *Déduction*, équivalent au problème *QAD*, devient : «  $Q$  se déduit de  $G$  s'il existe un homomorphisme de  $Q$  dans *completed(G)*. »

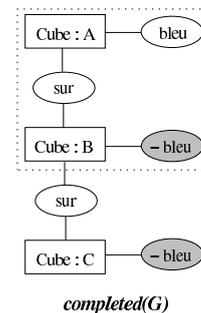


FIG. 3 : Le graphe complété négativement de  $G$ .

En pratique, le graphe complété négativement n'est pas construit. En effet, soit  $Q^+$  la partie positive de  $Q$  (sommets concepts + sommets relations positifs), alors  $Q$  se déduit de  $G$  s'il existe un homomorphisme  $\pi$  de  $Q^+$  dans  $G$  qui ne contredit pas de sommet relation négatif de  $Q$  :  $-r(c_1, \dots, c_k)$  de  $Q$  est contredit si  $G$  contient un sommet relation  $+r(\pi(c_1), \dots, \pi(c_k))$ .

Dans l'exemple de la figure 2,  $Q$  se déduit de  $G$  car il existe un homomorphisme de  $Q$  dans  $completed(G)$  (en pointillé sur la figure 3).

### III.2. L'hypothèse du monde ouvert

Reprenons l'exemple de la figure 2 en faisant l'hypothèse du monde ouvert : la couleur du cube  $B$  est inconnu. Le cube  $B$  pouvant être soit bleu soit non-bleu, nous nous retrouvons avec un raisonnement par cas. D'un côté, si nous ajoutons à  $G$  l'information «  $B$  est bleu », il existe un cube bleu sur un cube non-bleu dans le graphe  $G_1$  obtenu :  $B$  sur  $C$  (en pointillé sur la figure 4). De l'autre, si nous ajoutons à  $G$  l'information «  $B$  est non-bleu », il existe également un cube bleu sur un cube non-bleu dans le graphe  $G_2$  obtenu :  $A$  sur  $B$  (en pointillé sur la figure 4).  $Q$  se déduit de  $G_1$  et de  $G_2$  donc  $Q$  se déduit de  $G$ . Néanmoins y a-t-il une réponse à  $Q$  dans  $G$ ?  $A$  sur  $B$  ou  $B$  sur  $C$ ? Nous sommes assurés qu'il y ait une "solution" à  $Q$  dans  $G$  mais nous ne sommes pas capable de la construire.

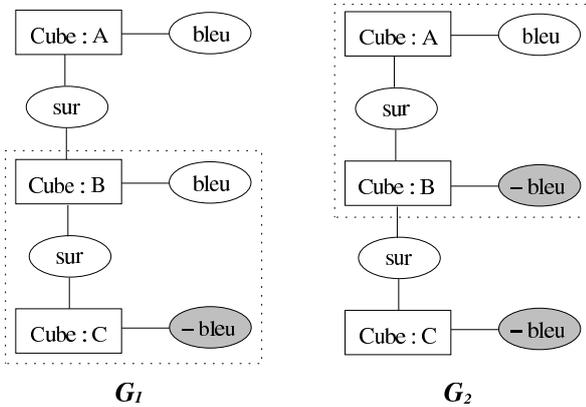


FIG. 4 : Les deux graphes obtenus à partir de  $G$ .

Cet exemple permet de montrer que :

- Les affirmations «  $Q$  se déduit de  $G$  » et « l'ensemble des réponses à  $Q$  dans  $G$  est non-vide » peuvent ne plus être équivalentes. En d'autres termes, les problèmes *Déduction* et *QAD* ne sont plus équivalents.
- La différence entre les problèmes est due à l'utilisation de la loi du tiers exclu : soit  $B$  est bleu soit il est non-bleu.

En ce qui concerne le problème *Déduction*, plus généralement, nous devons considérer toutes les possibilités d'ajout de sommet relation à un graphe polarisé donné par rapport à un ensemble de types de relation, ce qui nous amène à la définition suivante :

**Définition 1** (Complétion). Une complétion  $G'$  de  $G$  est un graphe polarisé obtenu de  $G$  par ajouts successifs de nouveaux sommets relations (composés de types et de concepts apparaissant déjà dans  $G$ ) aussi longtemps qu'aucune inconsistance n'apparaît ( $G \subseteq G'$ ). Chaque ajout représente une étape de complétion. Une complétion de  $G$  est dite totale si tout nouvel ajout d'information représente soit une redondance soit une inconsistance.

Le problème *Déduction* devient : «  $Q$  se déduit de  $G$  si quelque soit  $G^c$ , une complétion de  $G$ , il existe un homomorphisme de  $Q$  dans  $G^c$  »

Ce problème est  $\Pi_2^P$ -complet<sup>1</sup> (intuitivement cela signifie que pour le résoudre il faudra faire appel un nombre exponentiel de fois à un problème se trouvant dans *NP*) : l'ajout de la négation atomique sous l'hypothèse du monde ouvert a augmenté d'un niveau la complexité ( $NP$ -complet  $\rightarrow \Pi_2^P$ -complet)

Une approche brutale pour résoudre ce problème de déduction (introduite dans [4]) consiste à calculer l'ensemble des complétions de  $G$  et à effectuer un test d'homomorphisme de  $Q$  dans chaque complétion obtenue. Un algorithme le résolvant de cette manière est le suivant :

---

**Algorithme 1:** DeductionBrutale( $Q, G, \mathcal{R}$ )

---

**Données:** deux graphes polarisés  $Q$  et  $G$ , un ensemble de types de relation  $\mathcal{R}$

**Résultat:** Vrai si  $Q$  se déduit de  $G$ , faux sinon  
début

Soit  $G^{complet}$  l'ensemble des complétions de  $G$  ;  
**pour** chaque  $G^c \in G^{complet}$  **faire**  
  **si** il n'y a pas d'homomorphisme de  $Q$  dans  $G^c$  **alors**  
    //  $G^c$  est un contre-exemple ;  
    **retourner** faux ;  
**retourner** vrai ;

**fin**

---

Plusieurs algorithmes et améliorations sont présentés dans [5]. Une première amélioration consiste en une exploration incrémentale de l'espace de recherche menant de  $G$  à ses complétions totales. Elle permet notamment d'élaguer l'arbre de recherche. Un deuxième niveau d'amélioration consiste à identifier des sous-graphes de  $Q$  pour lesquels il existe nécessairement un homomorphisme dans  $G$  quand  $Q$  se déduit de  $G$ . Les deux objectifs principaux liés à de tels sous-graphes sont (1) de mettre en place un filtrage (s'il n'y a pas d'homomorphisme d'un de ces sous-graphes dans  $G$  alors  $Q$  ne se déduit pas de  $G$ ) ; (2) de les utiliser comme heuristique de choix du sommet relation à ajouter lors de la prochaine étape de complétion. Enfin, un algorithme prenant en compte ces améliorations est proposé.

## IV. CONCLUSION

L'ajout de la négation atomique dans le formalisme des graphes conceptuels permet un enrichissement de l'expressivité du langage. Néanmoins, la résolution des problèmes de base (*Déduction*, *QAD*...) devient beaucoup plus complexe, notamment lorsque l'hypothèse du monde ouvert est levée. Des problèmes qui étaient jusqu'ici équivalents deviennent différents et un certain nombre de questions se posent, allant de la sémantique de la négation à la façon de résoudre les problèmes et d'optimiser cette résolution.

Une étude approfondie est effectuée dans [6] et plusieurs algorithmes sont proposés. D'autres algorithmes plus élaborés

---

<sup>1</sup> $\Pi_2^P = NP^{NP}$

permettant de résoudre le problème *Déduction* ainsi que plusieurs heuristiques sont proposés dans [5]. Enfin, nous avons présenté une nouvelle approche de résolution sur un problème équivalent au problème *Déduction* sous l'hypothèse du monde ouvert dans [7].

Nous expérimentons actuellement les différentes approches ainsi que les heuristiques proposées afin de les comparer entre elles. En parallèle, nous nous intéressons à la résolution du problème *QA* (recherche de toutes les réponses à *Q* dans *G*) sous l'hypothèse du monde ouvert. Plusieurs questions sont soulevées, allant de la sémantique d'une réponse à la mise en place d'algorithmes efficaces, en passant par la complexité du problème *QA* dans ce contexte particulier.

#### RÉFÉRENCES

- [1] J. F. SOWA : *Conceptual Structures : Information Processing in Mind and Machine*. Addison-Wesley, 1984.
- [2] M. CHEIN et M.-L. MUGNIER : *Graph-based Knowledge Representation*. Springer, 2009.
- [3] Christos M. PAPADIMITRIOU : *Computational complexity*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1994.
- [4] Jeffrey D. ULLMAN : Information Integration Using Logical Views. *In Proc. of ICDT'97*, volume 1186 de LNCS, pages 19–40. Springer, 1997.
- [5] M. LECLÈRE et M.-L. MUGNIER : Some Algorithmic Improvements for the Containment Problem of Conjunctive Queries with Negation. *In Proc. of ICDT'07*, volume 4353 de LNCS, pages 401–418. Springer, 2007.
- [6] M.-L. MUGNIER et M. LECLÈRE : On querying simple conceptuals graphs with negation. *Data and Knowledge Engineering (DKE)*, 2006.
- [7] K. Ben MOHAMED, M. LECLÈRE et M.-L. MUGNIER : De la déduction dans le fragment  $\{\exists, \wedge, \neg\}$  de la logique du premier ordre à sat. *Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentale (JIAF)*, 2008.

DOCTISS 2009

# Propriétés combinatoires des réseaux phylogénétiques de niveau $k$

Philippe GAMBETTE <sup>1</sup> (Doctorant 2ème année)  
Christophe PAUL, Vincent BERRY (Directeurs de thèse)

Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier.  
C.N.R.S., Université Montpellier 2.  
161 rue Ada, 34392 Montpellier Cedex 5 France

<sup>1</sup><http://www.lirmm.fr/~gambette>

**Résumé**— Les réseaux phylogénétiques représentent l'évolution des espèces en généralisant l'Arbre de la vie. En effet, certaines branches de l'arbre se rejoignent parfois, créant des parties réticulées, pour indiquer des échanges de matériel génétique entre espèces. Le *niveau* est un paramètre introduit sur les réseaux phylogénétiques enracinés pour décrire la complexité de leur structure par rapport à un arbre. Nous montrons tout d'abord que tout réseau phylogénétique de niveau  $k$  peut être décomposé en un arbre de *générateurs*. Puis nous montrons qu'il est impossible de reconstruire sans ambiguïté de tels réseaux phylogénétiques à partir de certains jeux de données. Enfin nous étudions la pertinence du paramètre de niveau dans le cadre d'un modèle qui décrit l'évolution en présence de recombinaisons : le modèle coalescent.

**Mots-clés**— informatique : combinatoire, décomposition, graphe, réseau phylogénétique

## I. INTRODUCTION ET DÉFINITIONS

### I.1. Réseaux phylogénétiques

Un *arbre phylogénétique* est un arbre binaire enraciné avec des arcs (orientés, donc) et des feuilles étiquetées bijectivement par un ensemble  $X$  de *taxons*, qui représentent le plus souvent des espèces ou des gènes. La racine de l'arbre correspond à l'ancêtre commun à toutes les espèces représentées aux feuilles.

Un *réseau phylogénétique explicite* est une généralisation d'arbre phylogénétique qui permet de prendre en compte les échanges de matériel génétique entre espèces, qui sont très fréquents entre les bactéries [1] mais aussi présents chez les végétaux ou même les animaux [2]. Ces échanges peuvent correspondre à divers événements biologiques : hybridation (apparition d'un descendant fertile de deux espèces différentes), recombinaison (échange d'une portion du chromosome du père et de la mère), transferts horizontaux (trans-

mission d'une portion d'ADN d'un individu à un autre)...

On peut définir formellement un tel réseau phylogénétique comme un multigraphe orienté acyclique, contenant : exactement un sommet de degré entrant 0 et de degré sortant 2 (la *racine*) ; des sommets de degré entrant 1 et de degré sortant 2 (*sommets de spéciation*) ; des sommets de degré entrant 2 et de degré sortant 1 (*sommets hybrides*) ; des sommets étiquetés bijectivement par un ensemble  $X$  de taxons, de degré entrant au plus 2 et de degré sortant 0 (*feuilles*). Un ensemble de feuilles est appelé *clade*. Dans la Figure 2(a) est représenté un réseau phylogénétique explicite  $N$  de racine  $\rho$  et d'ensemble de taxons  $X = \{a, b, c, d, e, f, g, h, i\}$ . Les sommets  $h_i$  sont des sommets hybrides et ceux non étiquetés sont des sommets de spéciation.

Notons que parler de multigraphe, c'est à dire autoriser la présence de plusieurs arcs entre deux sommets, est un détail technique qui permet la présence de cycles à deux sommets dans le réseau phylogénétique, comme celui contenant  $h_1$  en figure 2(a).

### I.2. Niveau

Un paramètre a été introduit en 2004 pour exprimer à quel point la structure d'un réseau phylogénétique est proche d'un arbre, le *niveau* [3].

Un graphe orienté est dit *biconnexe* s'il ne contient aucun sommet d'articulation (dont la suppression déconnecte le graphe). Une *composante biconnexe* (ou *blob*) d'un réseau phylogénétique  $N$  est un sous-graphe biconnexe maximal de  $N$ . Pour tout arc  $(u, v)$  de  $N$ , on appelle  $u$  un père de  $v$ , et  $v$  un fils de  $u$ .

Un réseau phylogénétique explicite est dit de *niveau  $k$*  si toute composante biconnexe contient au plus  $k$  sommets hybrides. Un réseau de niveau  $k$  qui n'est pas de niveau  $k-1$  est dit strictement de niveau  $k$ . Par exemple, dans la Figure 2(a),

la composante biconnexe de  $N$  qui contient le plus de sommets hybrides est située dans la zone grise (elle contient  $h_3$  et  $h_4$ ), donc  $N$  est strictement de niveau 2.

Un réseau de niveau 0 est un arbre phylogénétique, un réseau de niveau 1 est communément appelé *galled tree*. De nombreux problèmes NP-complets peuvent être résolus en temps polynomial sur ces classes de réseaux phylogénétiques [4], ce qui motive l'étude des niveaux supérieurs, en particulier celui de la *reconstruction phylogénétique*.

### 1.3. Reconstruction phylogénétique à partir de triplets ou clades

Le problème le plus classique en phylogénie, consiste à reconstruire l'arbre (ou le réseau) phylogénétique qui explique les données fournies en entrée à propos des feuilles, qui correspondent à des espèces actuellement existantes. Ces données peuvent être des séquences ADN, des distances génétiques entre taxons, des clades, ou des triplets. On utilise des clades ou des triplets principalement dans le cas où l'on ne dispose pas de séquences ADN communes à toutes les espèces étudiées, ce qui empêche de les comparer toutes entre elles. Dans ce cas, une approche alternative, de *super-arbre* ou *super-réseau*, consiste à commencer par calculer un arbre pour chaque ensemble de données cohérent, puis d'agglomérer les informations contenues dans ces arbres, c'est à dire les triplets ou clades qui y sont contenus.

Un *triplet*  $x|yz$  est un arbre phylogénétique sur trois feuilles  $x$ ,  $y$  et  $z$ , où les fils de la racine sont  $x$ , et le père de  $y$  et  $z$ . Un triplet  $x|yz$  est *compatible* avec un réseau phylogénétique  $N$  (ou  $N$  est compatible avec  $x|yz$ ) si  $N$  contient deux sommets  $u$  et  $v$ , et deux chemins sans sommet interne en commun deux à deux, de  $u$  à  $y$ , de  $u$  à  $z$ , de  $v$  à  $u$  et de  $v$  à  $x$ . On veut ainsi exprimer l'idée que les espèces représentées par  $y$  et  $z$  sont plus proches entre elles, que de celle représentée par  $x$ . L'ensemble de triplets  $\mathcal{T}$  est *compatible avec un réseau phylogénétique* si tous ses triplets le sont. Par exemple, dans la Figure 2(a), l'ensemble de triplets  $\{b|cd, g|hi, h|gi, i|gh\}$  est compatible avec  $N$ .

Le problème de reconstruction d'un réseau phylogénétique à partir d'un ensemble de triplets  $\mathcal{T}$  consiste donc à trouver un réseau phylogénétique explicite qui soit compatible avec  $\mathcal{T}$ , et soit le plus simple possible. L'ensemble de tous les triplets compatibles avec un réseau phylogénétique  $N$  est noté  $\mathcal{T}(N)$ , on dit alors que  $N$  reflète  $\mathcal{T}(N)$ .

En ce qui concerne la reconstruction d'un réseau phylogénétique à partir de clades, deux modèles sont possibles. Le *clade plein*  $C_N(v)$  est l'ensemble des feuilles accessibles depuis le sommet  $v$  dans le réseau  $N$ . On dit qu'un ensemble de clades  $\mathcal{C}$  est *pleinement compatible* avec un réseau phylogénétique  $N$  si tout clade de  $\mathcal{C}$  correspond au clade plein associé à l'un des sommets du réseau, et on note  $\mathcal{C}(N)$  l'ensemble de tous les clades pleins du réseau  $N$ .

Une seconde manière de voir les clades est de considérer les clades de tous les arbres phylogénétiques contenus dans le réseau  $N$  et ayant le même ensemble de feuilles. En effet, cette approche est bien fondée biologiquement, puisque dans le cadre de transfert de matériel génétique,

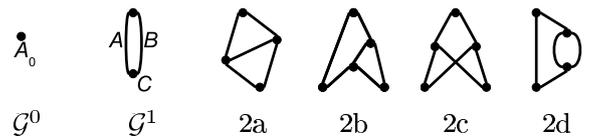


FIGURE 1 : Le générateur  $\mathcal{G}^0$  de niveau 0 (a), le générateur  $\mathcal{G}^1$  de niveau 1 (b), et les générateurs de niveau 2, appelés 2a, 2b, 2c et 2d [5]. Tous les arcs sont dirigés vers le bas (l'orientation n'est pas indiquée pour un souci de lisibilité.)

l'histoire d'un gène donné apparaît comme un arbre inclus à l'intérieur du réseau  $N$ , et ne couvre pas le réseau tout entier. On définit donc un ensemble  $\mathcal{S}_N(v)$  de *clades souples* associés à un sommet  $v$  de  $N$  comme l'ensemble  $\{C_T(v), \text{ pour tout arbre } T \text{ sur l'ensemble de taxons } X, \text{ inclus dans } N\}$ . On peut aussi voir un clade souple  $C \in \mathcal{S}_N(v)$  comme l'ensemble des feuilles sous le sommet  $v$  après avoir supprimé un des deux arcs menant à chaque sommet hybride dans le réseau. On dit qu'un ensemble de clades  $\mathcal{C}$  est *souplement compatible* avec un réseau phylogénétique  $N$  si tout clade de  $\mathcal{C}$  est inclus dans l'ensemble des *clades souples* associé à l'un des sommets du réseau, et on note  $\mathcal{S}(N)$  l'ensemble de tous les clades souples du réseau  $N$ .

Par exemple, dans la Figure 2(a), le clade  $\{c, d, e, f, g, h, i\}$  est un clade souple, mais pas plein, de  $N$  (car c'est l'ensemble des feuilles sous le sommet droit de la racine dans tout arbre inclus dans  $N$  qui contient l'arc gauche menant à  $h_2$ ). En revanche  $\{b, c, d, e, f, g, h, i\}$  est un clade plein (et souple) de  $N$ .

Les résultats de cet article incitent à une grande prudence dans l'approche de reconstruction de réseaux phylogénétiques de niveau  $k$  à partir d'ensembles de triplets ou de clades. En section II., on étudie la structure de ces réseaux en montrant qu'ils peuvent avoir une grande complexité intrinsèque. Puis nous montrons que même en connaissant la totalité des triplets ou des clades souples d'un réseau, il est parfois impossible de le reconstruire sans ambiguïté, en section III.. Enfin, nous considérons un ensemble de réseaux simulés selon le modèle coalescent avec recombinaison pour montrer que dans ce contexte, les réseaux ont un niveau élevé, ce qui réduit l'application pratique des algorithmes de reconstruction existants.

## II. DÉCOMPOSITION DES RÉSEAUX DE NIVEAU $k$

**Définition 1** ([5]). *Un générateur de niveau  $k$  est un réseau phylogénétique biconnexe strictement de niveau  $k$  (voir figure 1).*

Ces générateurs ont été introduits à l'origine dans le contexte d'une sous-classe de réseaux phylogénétiques dits *simples*, contenant une seule composante biconnexe [5]. Nous montrons dans le théorème suivant qu'ils permettent de décomposer tout réseau de niveau  $k$  en un arbre de générateurs.

**Théorème 1** (décomposition des réseaux de niveau  $k$  [6]). *Tout réseau  $N$  de niveau  $k$  peut être décomposé de façon unique en un arbre de générateurs de niveau au plus  $k$ .*

L'arbre de décomposition en générateurs d'un réseau de niveau  $k$  est illustré en figure 2(b). Il correspond globalement à l'arbre de décomposition en composantes biconnexes du graphe, avec un intérêt supplémentaire dans notre cas : pouvoir étiqueter les noeuds de l'arbre de décomposition par un générateur extrait d'un ensemble fini (à niveau fixé).

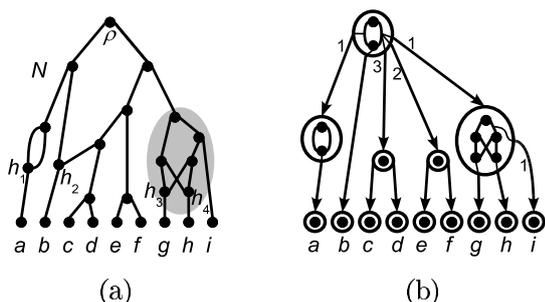


FIGURE 2 : Un réseau phylogénétique de niveau 2 (a) et son arbre de décomposition en générateurs (b) : la numérotation sur les arcs de l'arbre de décomposition indique dans quel ordre les générateurs sont attachés aux arcs du générateur du noeud père.

Ce théorème de décomposition en générateurs demande donc une étude un peu plus précise de la structure des générateurs. Nous fournissons quelques propriétés sur leur taille, leur nombre, ainsi qu'un algorithme pour construire tous les générateurs de niveau  $k$  à partir des générateurs de niveau  $k - 1$ .

**Propriété 1** ([6]). *Pour  $k \geq 1$ , un générateur de niveau  $k$  a au plus  $3k - 1$  sommets et  $4k - 2$  arcs.*

**Propriété 2** ([6]). *Le nombre  $g_k$  de générateurs de niveau  $k$  est compris entre  $2^{k-1}$  et  $k!250^k$ .*

Ces bornes très peu fines servent essentiellement à montrer que le nombre de générateurs est exponentiel en fonction du niveau. Ceci indique que la vision d'un réseau phylogénétique comme un arbre de blobs cache derrière l'apparente simplicité de l'arbre une grande complexité de structure à l'intérieur des blobs. Toutefois, elles permettent aussi de noter qu'il semble possible de construire automatiquement l'ensemble des générateurs de niveau 4, alors que jusqu'alors seuls ceux de niveau au plus 3 avaient été construits [7].

**Théorème 2** ([6]). *Un algorithme polynomial permet de construire l'ensemble de tous les générateurs de niveau  $k + 1$  à partir de l'ensemble  $S_k^*$  de tous les générateurs strictement de niveau  $k$  fourni en entrée.*

A la base de cet algorithme, et des deux propositions précédentes, se trouvent deux règles permettant d'attacher un

nouveau sommet hybride à l'intérieur d'un générateur de niveau  $k$ . L'algorithme consiste donc à construire progressivement l'ensemble  $S_{k+1}^*$  en considérant à tour de rôle chaque générateur de l'ensemble  $S_k^*$ , et en appliquant une règle d'insertion d'un nouveau sommet hybride, et en vérifiant si le générateur de niveau  $k + 1$  ainsi créé est isomorphe à un des générateurs déjà ajoutés à  $S_{k+1}^*$ . Il faut noter que bien que la complexité du test d'isomorphisme de graphes soit encore indéterminée, nous pouvons le faire théoriquement en temps polynomial car nous travaillons sur des graphes orientés de degré maximum 3 [8, 9]. En fait, l'algorithme de Luks est peu utilisable en pratique, et nous utilisons un algorithme exact exponentiel dans notre implémentation disponible à l'adresse <http://www.lirmm.fr/~gambette/ProgGenerators.php>.

Cette implémentation a permis de déterminer qu'il existait 1993 générateurs de niveau 4. On a ainsi pu vérifier que la séquence du nombre de générateurs de niveau  $k$ , 1,4,65,1993, n'était pas présente dans l'Encyclopédie en ligne des séquences d'entiers [10], alors que deux séquences de cette base de données contenaient 1,4,65.

### III. TRIPLETS ET CLADES DES RÉSEAUX DE NIVEAU 1

On peut définir sur les réseaux phylogénétiques sur un même ensemble de taxons une relation d'inclusion de la façon suivante :  $N_1$  est inclus dans  $N_2$  si on peut l'obtenir depuis  $N_2$  en supprimant un ensemble d'arcs, puis en contractant l'arc sortant de tous les sommets de degré entrant et sortant 1.

Dans le cadre de la reconstruction phylogénétique, on cherche un réseau qui explique les données en entrée et qui soit minimal pour cette relation d'inclusion. On s'intéresse ci-dessous au cas idéal où toutes les données sont connues, et correctes. On s'attendrait à ce que dans ce cadre, un réseau soit encodé par son ensemble de triplets ou de clades souples, c'est à dire lui corresponde de manière unique. Même dans ce cadre extrêmement contraint, il peut exister plusieurs réseaux minimaux qui reflètent un ensemble de triplets, ou de clades souples, comme ceux montrés en figures 3 et 4.

**Théorème 3** (encodage par triplets [11]). *Soit  $N$  un réseau strictement de niveau 1 avec au moins 3 feuilles. Alors  $N$  est le seul réseau minimal de niveau 1 à refléter  $\mathcal{T}(N)$  si et seulement si toute composante biconnexe de  $N$  contient au moins 5 sommets.*

L'encodage par clades pleins est peu intéressant, puisque le réseau canonique associé à un ensemble de clades pleins correspond simplement au diagramme de Hasse associé à l'inclusion des clades.

**Théorème 4** (encodage par clades souples [11]). *Soit  $N$  un réseau strictement de niveau 1 avec au moins 3 feuilles. Alors  $N$  est le seul réseau minimal de niveau 1 dont l'ensemble de clades souples est  $\mathcal{S}(N)$  si et seulement si toute composante biconnexe de  $N$  contient au moins 5 sommets.*

Ces deux théorèmes montrent que dans le cas du niveau 1, les ambiguïtés, qui apparaissent à cause de la structure de

cycle à moins de 5 sommets montrée en figure 3, peuvent être levées en obtenant plus d'informations sur les parties réticulées (c'est à dire avoir des données sur au moins 4 branches différentes qui "sortent" d'un cycle).

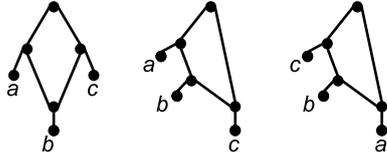


FIGURE 3 : Trois réseaux de niveau 1, minimaux, reflétant un même ensemble de triplets  $\{a|bc, c|ab\}$  et de clades souples  $\{\{a\}, \{b\}, \{c\}, \{ab\}, \{bc\}, \{abc\}\}$ .

Pour le niveau 2, la situation est encore pire, puisque les deux réseaux minimaux de la figure 4 reflètent le même ensemble de triplets et de clades souples. Pourtant ils ont tous deux le même nombre de noeuds hybrides, mais représentent des histoires génétiques tout à fait différentes. Ces résultats incitent à une grande prudence sur les réseaux reconstruits à partir de triplets ou de clades souples.

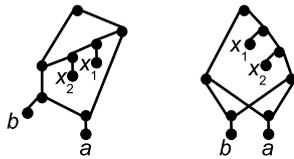


FIGURE 4 : Deux réseaux de niveau 2, minimaux, reflétant un même ensemble de triplets  $\{a|x_1x_2, b|x_1x_2, x_1|bx_2, x_1|ax_2, x_1|ab, a|bx_1, b|x_1a, x_2|ab, a|bx_2, b|x_2a\}$  et de clades souples  $\{\{a\}, \{b\}, \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_1, x_2\}, \{a, b\}, \{x_1, x_2, a\}, \{x_1, x_2, b\}, \{x_1, x_2, a, b\}\}$ .

#### IV. NIVEAU DE RÉSEAUX SIMULÉS

Arenas, Valiente et Posada ont étudié les propriétés de réseaux phylogénétiques simulés selon le modèle coalescent avec recombinaison [12], en mesurant la proportion parmi ces réseaux de ceux appartenant à certaines sous-classes, en particulier les arbres, et les réseaux "galled tree", c'est à dire les réseaux de niveau 0 et 1. Nous avons prolongé leur étude [6], en calculant le niveau de tous les réseaux phylogénétiques générés par leur simulation qui a utilisé le programme Recodon [13]. L'implémentation en Java d'un algorithme basique de décomposition en composantes biconnexes pour calculer le niveau est également disponible à l'adresse <http://www.lirmm.fr/~gambette/ProgGenerators.php>.

Pour de petites valeurs du niveau, les résultats obtenus sont réunis dans la Table 1, et un aperçu pour les niveaux supérieurs est donné en Figure 5.

Nous observons que les réseaux phylogénétiques avec un petit niveau, comme les autres restrictions étudiées dans la référence [12], ne couvrent qu'une portion réduite des réseaux phylogénétiques correspondant au modèle coalescent avec de forts taux de recombinaison. En fait, les réseaux simulés selon

$r$	arbre	niv. 1	niv. 2	niv. 3	niv. 4	niv. 5
0	1000	1000	1000	1000	1000	1000
1	139	440	667	818	906	948
2	27	137	281	440	582	691
4	1	21	53	85	136	201
8	0	1	1	6	7	12
16	0	0	0	0	0	0

TABLE 1 : Nombre de réseaux simulés selon le modèle coalescent avec recombinaison sur 10 feuilles, ayant niveau 0, 1, 2, 3, 4, 5, en fonction du taux de recombinaison  $r = 0, 1, 2, 4, 8, 16$ .

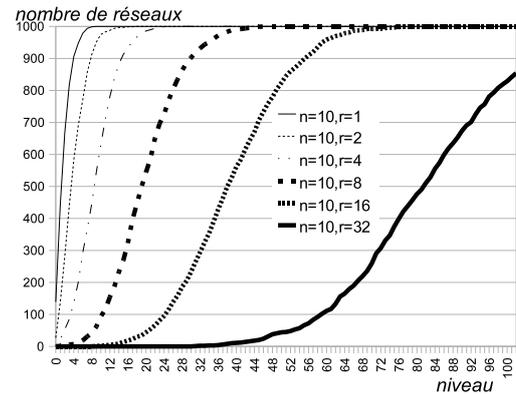


FIGURE 5 : Nombre de réseaux simulés de niveau  $k$  sur 10 feuilles, en fonction de  $k$ , à différents taux de recombinaison  $r = 1, 2, 4, 8, 16, 32$ .

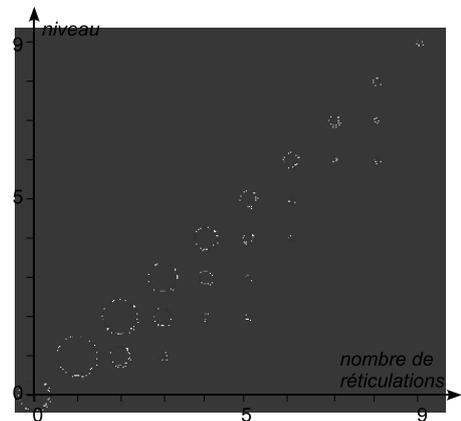


FIGURE 6 : Nombre de sommets hybrides et niveau des réseaux simulés sur 10 feuilles pour un taux de recombinaison  $r = 1$  (b) : la taille d'un point de coordonnées  $(x, y)$  représente le nombre de réseaux strictement de niveau  $x$  contenant exactement  $y$  sommets hybrides.

ce modèle n'ont pas vraiment la structure arborée exprimée dans le Théorème 1, mais sont le plus souvent constitués d'une grosse composante biconnexe qui contient tous les sommets hybrides. Ce phénomène apparaît même pour de faibles taux de recombinaison, comme montré en Figure 6.

Ainsi, dans ce contexte, de nouvelles structures et techniques algorithmiques doivent être étudiées. Mentionnons toutefois que ce modèle ne convient pas pour décrire tous les cas d'évolution réticulée, et que d'autres peuvent être plus appropriés, comme celui qui insère des transferts horizontaux selon une loi de Poisson [14], ou ceux utilisés pour la simulation de réseaux phylogénétiques dans NetGen [15].

## V. CONCLUSION

Devant l'engouement récent pour les réseaux de niveau  $k$ , qui permettent d'obtenir des algorithmes efficaces pour la reconstruction phylogénétique de réseaux à partir de triplets, nous avons présenté des résultats qui permettent de mieux comprendre ces objets : simples par la structure arborée qui apparaît, complexes à l'intérieur des parties réticulées. Ceux-ci incitent à une grande prudence pour leur utilisation : à la fois sur l'hypothèse préalable que le réseau à reconstruire aura un faible niveau, et sur la confiance à accorder au résultat obtenu.

La validation des méthodes de reconstruction de réseaux de niveau  $k$  sur des données biologiques est en cours, et il est intéressant de voir si les nuances théoriques que nous apportons à propos de leur utilisation seront confirmées en pratique. Ces résultats relancent aussi l'intérêt pour d'autres paramètres sur les réseaux qui permettraient d'obtenir des algorithmes rapides, et quelques pistes semblent déjà prometteuses dans cette optique.

## RÉFÉRENCES

- [1] W.F. DOOLITTLE : Phylogenetic classification and the universal tree. *Science*, 284:2124–2128, 1999.
- [2] C.L. HUBBS : Hybridization between fish species in nature. *Systematic Zoology*, 4:1–20, 1955.
- [3] J. JANSSON et W.-K. SUNG : Inferring a level-1 phylogenetic network from a dense set of rooted triplets. In *COCOON'04*, volume 3106 de *LNCS*, pages 462–471. Springer Verlag, 2004.
- [4] P. GAMBETTE : Who is who in phylogenetic networks : articles, authors and programs. <http://www.lirmm.fr/~gambette/PhylogeneticNetworks>.
- [5] L. van IERSEL, J. KEIJSPER, S. KELK, L. STOUGIE, F. HAGEN et T. BOEKHOUT : Constructing level-2 phylogenetic networks from triplets. In *RECOMB'08*, volume 4955 de *LNCS*, pages 450–462. Springer Verlag, 2008.
- [6] P. GAMBETTE, V. BERRY et C. PAUL : The structure of level-k phylogenetic networks, 2009. Soumis.
- [7] S. KELK : <http://homepages.cwi.nl/~kelk/lev3gen/>.
- [8] E.M. LUKS : Isomorphism of graphs of bounded valence can be tested in polynomial time. *Journal of Computer and System Sciences*, 25(1):42–65, 1982.
- [9] G.L. MILLER : Graph isomorphism, general remarks. In *STOC'77*, pages 143–150, 1977.
- [10] N.J.A. SLOANE : The on-line encyclopedia of integer sequences, 2008. Published electronically at <http://www.research.att.com/~njas/sequences/>.
- [11] P. GAMBETTE et K.T. HUBER : Triplet and cluster encodings of level-1 networks, 2009. En préparation.
- [12] M. ARENAS, G. VALIENTE et D. POSADA : Characterization of reticulate networks based on the coalescent. *Molecular Biology and Evolution*, 25:2517–2520, 2008.
- [13] M. ARENAS et D. POSADA : Recodon : coalescent simulation of coding DNA sequences with recombination, migration and demography. *BMC Bioinformatics*, 8:458, 2007.
- [14] N. GALTIER : A model of horizontal gene transfer and the bacterial phylogeny problem. *Systematic Biology*, 56:633–642, 2007.
- [15] M.M. MORIN et B.M.E. MORET : NETGEN : generating phylogenetic networks with diploid hybrids. *Bioinformatics*, 22(15):1921–1923, 2006.

DOCTISS 2009

# Aide la décision pour les domaines environnementaux, mise en place de chaînes de traitements pour la tracabilité et le diagnostic

Yuan LIN <sup>1</sup> (Doctorant 1ère année)  
Thérèse LIBOUREL <sup>2</sup>, Isabelle MOUGENOT <sup>3</sup> (Directrices de thèse)

LIRMM  
UMR 5506 - CC 447  
161 Rue Ada  
34392 Montpellier Cedex 5 - France

<sup>1</sup>Yuan.LIN@lirmm.fr, <sup>2</sup>Therese.LIBOUREL@lirmm.fr, <sup>3</sup>Isabelle.MOUGENOT@lirmm.fr

## Résumé –

Dans le domaine des sciences du vivant, de l'environnement, de la santé, l'apport des outils d'aide à la décision est primordial. Comment concevoir des environnements logiciels, dans ce contexte, est la préoccupation essentielle du sujet de thèse présenté. L'idée initiale réside dans le fait que les chercheurs de ces divers domaines ont besoin de capitaliser, diffuser et valider les expérimentations plus ou moins complexes qu'ils réalisent. Ces chaînes expérimentales sont à la base de constructions d'indicateurs clés de l'aide à la décision. Pour répondre à cette demande, le concept de workflow scientifique s'est rapidement imposé.

L'article analysera, les étapes de la conception d'un composant de chaînes de traitements et son intégration dans une plate-forme de mutualisation, partage d'informations. Après une brève analyse des travaux existants, il présentera les premières avancées de la réflexion, c'est-à-dire, la proposition d'un méta-modèle et d'un langage dédiés à la définition de modèles de chaînes de traitements. La proposition sera illustrée par un exemple simple issu du domaine spatial. L'article conclura sur les futures étapes et perspectives du travail.

**Mots-clés – (Méta) modèle, workflow scientifique, plateforme, composant, réutilisation, aide à la décision, environnement.**

## I. INTRODUCTION

Dans les domaines des sciences de l'environnement comme dans ceux du vivant et de la santé, l'aide à la décision est devenue prépondérante. Celle-ci nécessite la compréhension des phénomènes naturels ou anthropiques sous-jacents et l'interprétation des indicateurs construits par les experts des domaines. Pour mener à bien ces objectifs, les scientifiques doivent expérimenter, modéliser, confronter le résultat de

leurs expériences aux hypothèses de modélisation. Ils doivent de plus capitaliser et valider leurs expertises. Si les dispositifs expérimentaux sont sophistiqués, la pérennisation des expériences reste encore sous forme embryonnaire.

Les processus d'analyse expérimentaux se construisent par itérations successives. Disposer d'un outil facilitant la définition et la sauvegarde de chaînes de traitements, est donc devenu une demande quasi-générale. La validation d'un *diagnostic territorial*, par exemple, tient à la reproductibilité de l'expérimentation (la réexécution d'une chaîne de traitements sur des mêmes jeux de données). L'histoire d'une donnée construite (par exemple en biologie) peut être retrouvée par la chaîne de traitements qui lui a donné naissance (*tracabilité*).

À partir de ces premiers constats, l'objectif principal de ce travail est de concevoir un environnement intégrant le cycle complet, depuis la définition jusqu'à l'exécution, de chaînes de traitement expérimentales. Nous appelons cet environnement workflow scientifique ou workflow pour les sciences expérimentales. Dans cet article, nous présenterons donc très rapidement les solutions existantes actuellement, et les grandes lignes de notre approche.

## II. DÉFINITION ET BREF ÉTAT DE L'ART

Le **workflow**, ou encore chaîne de traitements est l'automatisation d'un processus (partiel ou complet), au cours duquel des documents, des informations et des tâches transitent d'un participant à un autre, au sein d'un groupe de travail, en conformité avec un ensemble de règles prédéfinies. Un système de workflow définit, crée et gère l'exécution de tels processus.

Le workflow est bien implanté dans des organisations traditionnelles (de gestion d'entreprise ou financière), mais dans le contexte scientifique, et dans celui des infrastructures distribuées, gérant des ressources hétérogènes, définir, assembler, contrôler, exécuter différentes tâches pour réaliser un traitement complexe constitue encore un des challenges actuels.

L'objectif étant fixé, un premier état de l'art a été effectué autour des diverses propositions en terme d'architecture, langages et produits workflows existants (UML-Diagramme d'activité [OMG01], SPEM [OMG05], XPDL [Coa05], BPDM-BPMN [OMG82a, OMG82b], KEPLER [ALKV06], WDO-It! [dSSQ], CIMFlow [ZF02], Taverna [HWS<sup>+</sup>06], BioGuideSRS [BBDF07], BioSide [Bcs]). Nous nous sommes intéressés aux propositions présentant :

- Un niveau méta-modèle pour la description et la réalisation de chaîne de traitements. En effet, l'aspect généricité conféré par la méta modélisation est essentiel, à nos yeux.
- La prise en compte de l'aspect expérimental. Les données et traitements scientifiques ont des particularités qui doivent transparaître au niveau du formalisme.

Cette étude a permis d'étayer la réflexion et de détailler les problèmes essentiels de la thèse.

### III. RÉFLEXION ET PROBLÉMATIQUE

Les communautés scientifiques concernées disposent ou mettent en place des infrastructures de partage et mutualisation de ressources et de connaissances. A titre d'exemple, au sein de projets tel Padoue ou Syscolag ([DLCG07, MLB05]), nous avons conçu, avec nos partenaires, un environnement basé sur les métadonnées pour l'accès aux données et traitements mutualisés par les uns et les autres. L'approche adoptée, pour la conception de ces infrastructures, est celle à base de composants dont l'avantage essentiel réside dans la modularité et l'extensibilité. Chaque composant a une spécificité et l'assemblage des composants permet d'enrichir les fonctionnalités de l'infrastructure. Le composant workflow doit donc être pensé comme un maillon intégrable au sein de cette infrastructure.

#### III.1. Les caractéristiques du composant workflow

Une première réflexion autour des fonctionnalités envisagées pour le composant workflow découpe celles-ci en définition abstraite de chaînes de traitement, définition plus spécifique après identification des diverses éléments de la chaîne, exécution personnalisée complétées par sauvegardes diverses. Cela nous a amené, à proposer la vision architecturale suivante (cf fig.1) :

1. l'aspect **statique** concerne la phase de conception. Il s'agit de construire des modèles de traitement métier (abstrait) à partir d'un langage simple défini par un niveau méta.
2. l'aspect **intermédiaire** traduit une phase d'instanciation et de pré-contrôle. À partir du modèle du traitement métier, l'utilisateur construira la chaîne de traitements réelle en déterminant et localisant les traitements et les

données les plus adéquates à l'expérimentation visée. Nous proposons d'intégrer à cette phase un pré-contrôle qui garantira l'exécutabilité de cette chaîne de traitements. Plus concrètement, avant de passer à la phase d'exécution, les utilisateurs doivent affiner et personnaliser leur expérimentation en choisissant les sources de données, les programmes ou services adéquats. Le pré-contrôle, a pour but de garantir la validité de cette instance à partir de règles de conformité formelles.

3. l'aspect **dynamique** concerne la phase d'exécution proprement dite. Celle-ci peut alors se dérouler à partir de différentes stratégies définies à la fois par l'expérimentateur et par le contexte opérationnel.

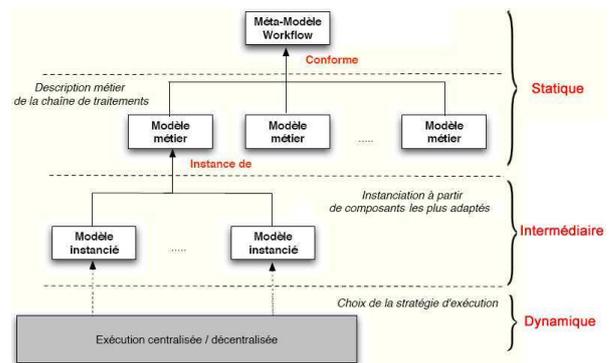


FIGURE 1 : Un environnement de workflow

#### III.2. Les problèmes et verrous soulevés

Derrière chaque volet du composant workflow, nous pouvons relever différents problèmes et verrous :

1. l'aspect **statique** : Concevoir une chaîne de traitements nécessite un langage tout à la fois simple et complet, c'est-à-dire le minimum d'éléments nécessaires et suffisants pour illustrer le maximum de situations possibles [F02]. Un éditeur à base de symboles graphiques constituera notre point d'interaction avec les experts.
2. l'aspect **intermédiaire** : La phase d'instanciation du modèle métier demande une localisation des ressources (données et traitements) qui nécessite une réflexion sur la description des ressources au travers de modèles ontologiques et de méta-données [BLM05]. Une fois, les ressources localisées, il faut les assembler et l'assemblage ne sera effectif qu'après pré-contrôle de la compatibilité des ressources de la chaîne. Nous retrouvons ici les recherches autour de signature de ressources et de conformité de signatures.
3. l'aspect **dynamique** : Le modèle instancié conforme, doit être exécuté et plusieurs politiques sont rendues possibles selon la configuration matérielle sous-jacente (réseaux, clusters, P2P) .

### IV. AVANCÉE ACTUELLE

C'est l'aspect statique sur lequel nous avons effectué la première proposition. Guidée par l'ingénierie des composants

et des modèles [TA05, OMG03], celle-ci inspirée des architectures proposées par l'OMG, définit un langage décrit au travers d'un méta-modèle.

#### IV.1. Méta-modèle et langage associé

Le méta-modèle (cf fig.2) est présentée sous forme de diagramme de classes au formalisme UML. L'idée générale est simple, un système de workflow est vu, au niveau le plus abstrait, comme une composition d'éléments et de liens entre éléments. La connexion entre élément et liens est assurée par le concept de port.

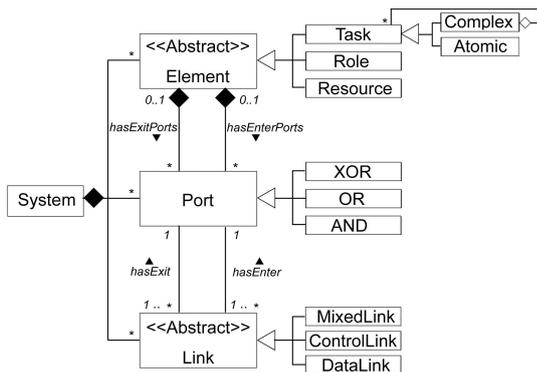


FIGURE 2 : Notre méta-modèle

Les éléments se diversifient en :

- Tâches (task) pré-définies à utiliser ou réutiliser,
- Rôles existants (qui interviendront durant la phase d'exécution),
- Ressources données disponibles à mobiliser.

La notion de tâche (task) correspond aux notions d'Activité, Processus (etc.) généralement présentes dans les autres méta-modèles de workflow. Nous déclinons cette notion avec le patron composite : une tâche peut être complexe ou atomique, avec la possibilité de réutiliser une tâche complexe agrégée comme tâche atomique.

Les éléments sont reliés par des liens unidirectionnels. Nous distinguons :

- Les liens entre les tâches qui nous permettront de représenter l'ordonnancement des tâches dans un processus.
- Les liens entre tâche et rôle. Ils permettent de préciser quel rôle peut intervenir sur la tâche.
- Les liens entre tâche et ressource précisent si la ressource est utilisée ou produite par la tâche.

Remarque : il n'y a pas de lien direct entre rôle et ressource, ils sont déductibles des liens rôle-tâche et tâche-ressource.

Les liens relient les éléments par l'intermédiaire des ports qui leur sont rattachés.

Chaque élément a des ports d'entrées / sorties (le type E/S est lié au sens du lien correspondant). Les ports entrées / sorties peuvent être spécialisés en ports XOR, OR et AND qui préciseront le type d'exécution nécessaire (parallèle, optionnelle, etc.).

Dans un environnement distribué, l'exécution de processus

fera appel à des ressources et tâches dispersées sur des plateformes différentes.

#### IV.2. Les spécificités

##### IV.2.1. Points de vue sur les éléments

Tout élément peut être interprété selon deux points de vue : boîte noire et boîte blanche.

1. Point de vue **boîte noire** : L'utilisateur choisit un élément défini initialement en ignorant sa réalisation, mais après avoir choisi fonctionnalité et paramètres (Ex : une tâche est choisie pour son nom et ses entrées / sorties). L'utilisateur compose les boîtes noires par l'intermédiaire de leurs ports et des liens de composition.

Le point de vue boîte noire peut être étendu. Il autorise ainsi l'encapsulation d'une chaîne de traitements complexe réifiée en tant que tâche simple boîte noire.

2. Point de vue **boîte blanche** : La description des éléments est plus fine et détaille la réalisation de l'élément.

Une chaîne de traitements peut être considérée comme la boîte blanche d'une tâche boîte noire encapsulée.

##### IV.2.2. Les boucles

La boucle joue un rôle indispensable dans la programmation, une boucle peut aussi être considérée comme l'exécution multiple d'une même tâche. Dans notre modèle, il n'y a pas d'élément spécifique pour représenter cette notion, mais par contre, une propriété "isBoucle" est ajoutée sur l'élément Task. Si cette propriété est égale à "Vrai", la tâche va être exécutée plusieurs fois, sinon, elle n'est exécutée qu'une fois.

La tâche boucle par rapport à une tâche normale autorise en entrée / sortie des collections de données. Donc c'est la taille de collection qui détermine le nombre d'itérations.

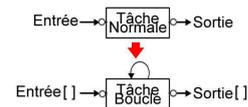


FIGURE 3 : Tâche boucle

Suite à la construction du méta-modèle, la projection du langage formel, issu du méta-modèle, en langage graphique permet, comme montré la figure 4, de disposer de différents symboles représentatifs de chacun des éléments du méta-modèle.

<b>Task</b>	Atomic Task	Complex Task	Loop
<b>Resource</b>	Resource	Role	Role
<b>Port</b>	Normal : ○	AND : ⋈	OR : ∨, XOR : ⊗
<b>Link</b>	Data : →	Mixed : → condition	Control : → condition →

FIGURE 4 : Un langage graphique associé

### IV.3. Exemple illustratif

Pour illustrer notre travail, nous réalisons l'analyse simplifiée d'un exemple réel. En cas de risque naturel comme la rupture d'une digue sur la commune de Mauguio, nous souhaitons reconnaître les bâtiments vulnérables sur une carte de la zone.

Le scientifique, connaît :

- les données dont il dispose et qui vont constituer les entrées de sa chaîne de traitements et connaît le type d'information qu'il souhaite en terme de résultat.

1. Entrée : Une couche de données relatives au bâti de la zone concernée.
2. Entrée : Une couche de données relatives aux digues (linéaire) de la zone.
3. Résultat : une carte où figurent les bâtiments vulnérables dans la zone d'inondation suite à une rupture de digue (celle-ci sera indiquée par un expert sur le terrain).

- les méthodes et traitements appropriés :

1. Superposer des couches de données. Cette méthode prend un ensemble de lots de données en entrée (en vérifiant qu'ils obéissent à des contraintes de géolocalisation et codage). Comme sortie, elle rend un ensemble de données cohérent résultat de l'intégration de toutes les données initiales.
2. Positionner les coordonnées sur une couche. Diverses techniques peuvent être utilisées relevant du géocodage.
3. Construire une zone tampon (buffer) à partir d'une géolocalisation.
4. Illustrer une couche de données. Cette méthode ajoute une légende circonstanciée à la couche de données sous-jacente.

L'analyse précédente aboutit à la représentation de la figure 5.

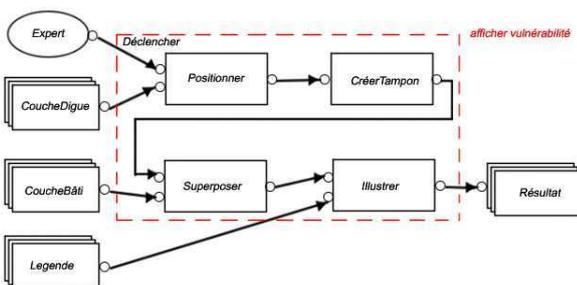


FIGURE 5 : Description du modèle métier exemple

Remarque : Le trait pointillé sur la figure 5 peut servir à encapsuler la chaîne de traitements sous-jacente pour définir une tâche réutilisable boîte noire : *afficher vulnérabilité*.

### IV.4. Prototypage

Un prototype d'éditeur a été implémenté, nous présentons la chaîne de traitements précédente, ainsi que l'option de sauvegarde de celle-ci dans la figure 6.

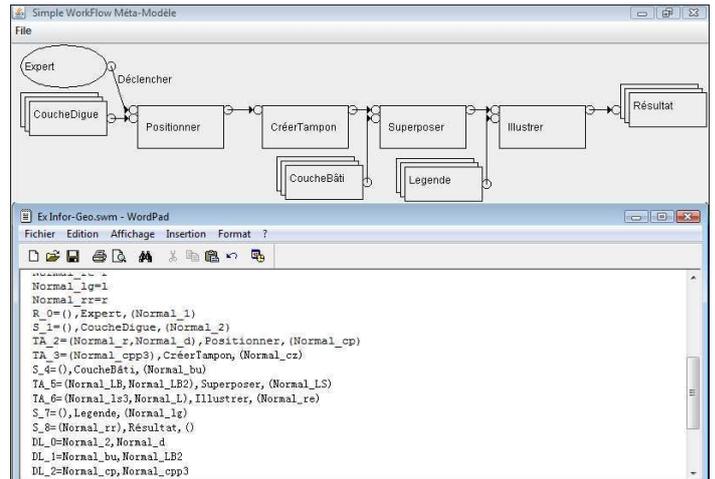


FIGURE 6 : Une capture d'écran de l'interface et un fichier enregistré

## V. PERSPECTIVES ET CONCLUSION

Le travail présenté n'est qu'une première étape dans cette thèse. À court terme, nous poursuivons l'analyse des travaux existants, afin d'étoffer l'état de l'art, et d'affermir notre proposition. L'aspect intermédiaire constitue, à moyen terme, notre prochain objectif. Il faut donc définir la notion de compatibilité et de contrôle de celle-ci en phase d'instanciation du modèle abstrait. Les pistes passent par la définition de signatures associées aux liens, ports et tâches. Ces signatures abstraites déduites du méta-modèle, seront ensuite régies par des règles de conformité mises en œuvre au moment de l'instanciation et de l'assemblage. L'instanciation s'appuie sur le mécanisme de localisation et de choix des éléments réels de la chaîne de traitements. Celui-ci repose sur les définitions de méta-données descriptives de ces éléments et ces méta-données vont aussi intervenir dans le contrôle et la validation des règles de conformité.

La dernière étape consistera à intégrer le composant dans la plate-forme de mutualisation et à décliner diverses stratégies d'exécution dépendantes des choix opérationnels. La démarche que nous comptons suivre s'inspire de l'ingénierie des modèles et de la transformation de modèles (transformation du modèle intermédiaire en modèle dynamique). La phase aide à la décision ne pourra être envisagée que lors que le moteur de workflow sera opérationnel.

## RÉFÉRENCES

[ALKV06] Ilkay Altintas, Bertram Ludäscher, Scott Klasky, and Mladen A. Vouk. S04 - introduction to scientific workflow management and the kepler system. In *SC*, page 205, 2006.

[BBDF07] Sarah Cohen Boulakia, Olivier Biton, Susan B. Davidson, and Christine Froidevaux. Bioguiders : querying multiple sources with a user-centric perspective. *Bioinformatics*, 23(10) :1301–1303, 2007.

- [Bcs] <http://www.bioside.org/> BioSide community site. *Bioside user guide. v1.0.beta.*
- [BLM05] J. Barde, T. Libourel, and P. Maurel. A metadata service for integrated management of knowledges related to coastal areas. *Multimedia Tools and Applications*, 2005.
- [Coa05] Workflow Management Coalition. *Process definition interface, XML process definition language*. Workflow Standard, October 3, 2005.
- [DLCG07] Jean-Christophe Desconnets, Thérèse Libourel, Stéphane Clerc, and Bruno Granouillac. Cataloguing for distribution of environmental resources. *AGILE'07 : 10th International Conference on Geographic Information Science*, 11/05/2007.
- [dSSQ] Paulo Pinheiro da Silva, Leonardo Salayandia, and Ann Q.Gates. *WDO It A Tool for Building Scientific Workflows from Ontologies*.
- [FÖ2] Frédéric Fürst. L'ingénierie ontologique. Technical report, IRIN, Université de Nantes, Octobre 2002.
- [HWS<sup>+</sup>06] Duncan Hull, Katy Wolstencroft, Robert Stevens, Carole A. Goble, Matthew R. Pocock, Peter Li, and Tom Oinn. Taverna : a tool for building and running workflows of services. *Nucleic Acids Research*, 34(Web-Server-Issue) :729–732, 2006.
- [MLB05] P. Maurel, T. Libourel, and J. Barde. Building spatial data infrastructures based on spatial cognition : an example for integrated coastal zone management. *Environment and Planning B*, 2005.
- [OMG82a] OMG. *Business process definition metamodel, beta 1*. 2008.2.
- [OMG82b] OMG. *Business process modeling notation, v 1.2 (beta 3)*. 2008.2.
- [OMG01] OMG. *Uml 2.0 superstructure specification*. 2001.
- [OMG03] OMG. *Mda guide version 1.0.1*. 2003.
- [OMG05] OMG. *Software process engineering metamodel specification version 1.1*. January 2005.
- [TA05] Dalila Tamzalit and Philippe Aniorté. Ingénierie des composants et systèmes d'information. *RSTI - Série L'Objet (RSTI-Objet), vol 13/4, Hermès - Lavoisier*, 2005.
- [ZF02] Zhijun Zhang and Yushun Fan. *Implementation of wpdL conforming workflow model*. 2002.

# Suivi du coeur battant pour la chirurgie cardiaque robotisée

Rogério RICHÀ<sup>1</sup>Philippe POIGNET<sup>2</sup>,

Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier  
 Université Montpellier 2  
 34090 MONTPELLIER cedex 5, France

<sup>1</sup>richa@lirmm.fr<sup>2</sup>poignet@lirmm.fr

**Résumé**— La chirurgie cardiaque mini-invasive est une modalité de chirurgie qui offre des bénéfices importants aux patients. L'assistance robotisée est donc proposée pour surmonter certaines difficultés liées à cette modalité de chirurgie. Dans ce contexte, la vision par ordinateur peut être appliquée pour l'estimation du mouvement cardiaque pour la stabilisation active du coeur. Dans cet article, la méthode efficace pour la reconstruction 3D de la surface du coeur avec un modèle déformable basée sur les Splines de Plaques-Minces proposée par Richa et al. [3] est décrite. L'efficacité de la méthode est démontré par des expérimentations sur des images *in vivo* acquises par la plateforme chirurgicale daVinci<sup>TM</sup>.

**Mots-clés**— robotique : vision par ordinateur, chirurgie robotisée, compensation des mouvements physiologiques

## I. INTRODUCTION

En chirurgie cardiaque, le mouvement cardiaque et respiratoire consistent en des importantes sources de perturbation pour l'exécution du geste chirurgical. L'assistance robotisée est donc proposée pour surmonter certaines difficultés liées à cette modalité de chirurgie. Cet assistance consiste à déplacer les outils chirurgicaux en synchronie avec le mouvement du coeur, permettant un gain considérable en précision et répétabilité des gestes chirurgicaux. Pour ce faire, le mouvement du coeur est estimé à travers le retour visuel fourni par le laparoscope. En pratique, le suivi visuel de la surface du coeur représente un défis, étant données les caractéristiques de la surface du coeur, son mouvement complexe et les conditions d'illumination en chirurgie mini-invasive.

Des nombreuses techniques ont déjà été proposées dans la littérature. Notamment, les travaux de Stoyanov [4], Ormaier [2] sur le suivi de points d'intérêt sur la surface du coeur démontrent la faisabilité de l'estimation du mouvement à travers les techniques de vision par ordinateur. Tou-

tefois, les techniques traditionnelles du domaine de la vision par ordinateur sont en sa majorité proposées pour des environnements rigides et artificielles. Alors, son efficacité face à déformations et changements d'apparence est limitée. Dans cet article, la méthode efficace pour la reconstruction 3D de la surface du coeur avec un modèle déformable basée sur la Spline Plaques-Minces proposée par Richa et al. [3] est décrite. L'efficacité de la méthode est démontré par des expérimentations sur des images *in vivo* acquises par la plateforme chirurgicale daVinci<sup>TM</sup>.

## II. MÉTHODES

Pour modéliser la déformation de la surface du coeur, une fonction paramétrique basée sur la spline plaques-minces est utilisée. Une Spline plaques-minces est une fonction d'interpolation  $m$  où l'énergie de courbure est minimisée :

$$E_f = \int \int_{\mathbb{R}^2} (f_{xx}^2 + 2f_{xy}^2 + f_{yy}^2) dx dy \quad (1)$$

La fonction  $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  qui décrit la déformation d'une région d'intérêt sur la surface du coeur est donc écrite de la façon suivante :

$$m(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f^x \\ f^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2^x & r_3^x & r_1^x \\ r_2^y & r_3^y & r_1^y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} w_i^x \\ w_i^y \end{bmatrix} U(\|\mathbf{c}_i - \mathbf{x}\|), \quad (2)$$

où  $\mathbf{x} = (x, y)$  représente les coordonnées d'un pixel,  $U(s) = s^2 \log(s^2)$  est la fonction base de la spline plaques-minces et  $w$  et  $r$  sont les paramètres qui modélisent la déformation. La figure 1 illustre la fonction  $m$ .

## III. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les cameras de l'endoscope stéréo ont été calibrées en utilisant des techniques classiques [5]. La séquence vidéo

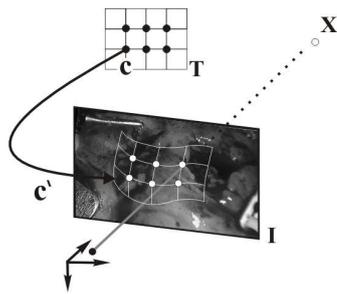


FIG. 1 : La position des points de contrôle de l'image de référence sur l'image courante définit la déformation de la région d'intérêt.

consiste en 1600 images de 320x288 pixels acquises à 50 Hz. La méthode proposée est appliquée pour suivre une région de 80x80 pixel sur la surface du coeur. 6 points de contrôle ont été utilisés pour modéliser la déformation de la région d'intérêt. Les résultats sont illustrés dans la figure 2.

#### IV. DISCUSSION

La conception d'une plateforme robotisée impose plusieurs défis. Ginhoux [1] a noté qu'un système d'acquisition rapide ( $> 50$  Hz) est nécessaire pour capturer la vraie dynamique du coeur. A présent, la méthode n'est pas encore robuste aux changements d'apparence et des ombres.

Ce travail est le premier pas pour la compensation active du mouvement physiologique pour les interventions à coeur battant. La puissance des récents GPUs peut être exploitée pour l'implémentation en temps réel de la méthode présentée.

#### RÉFÉRENCES

- [1] R. Ginhoux, J. Gangloff, M. de Mathelin, L. Soler, M. A. Sanchez, and J. Marescaux. Active filtering of physiological motion in robotized surgery using predictive control. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(1) :67–79, February 2003.
- [2] T. Ortmaier, M. Groger, D. H. Boehm, V. Falk, and G. Hirzinger. Motion estimation in beating heart surgery. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52(10) :1729–1740, 2005.
- [3] R. Richa, P. Pognet, and C. Liu. Efficient 3d tracking for motion compensation in beating heart surgery. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI '08)*, pages 684–691, New York, USA, 2008.
- [4] D. Stoyanov, G. P. Mylonas, F. Deligianni, A. Darzi, and G. Z. Yang. Soft-tissue motion tracking and structure estimation for robotic assisted mis procedures. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI '05)*, volume 3750, pages 139–146, Palm Springs, USA, 2005.
- [5] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, 22(11) :1330–1334, 2000.

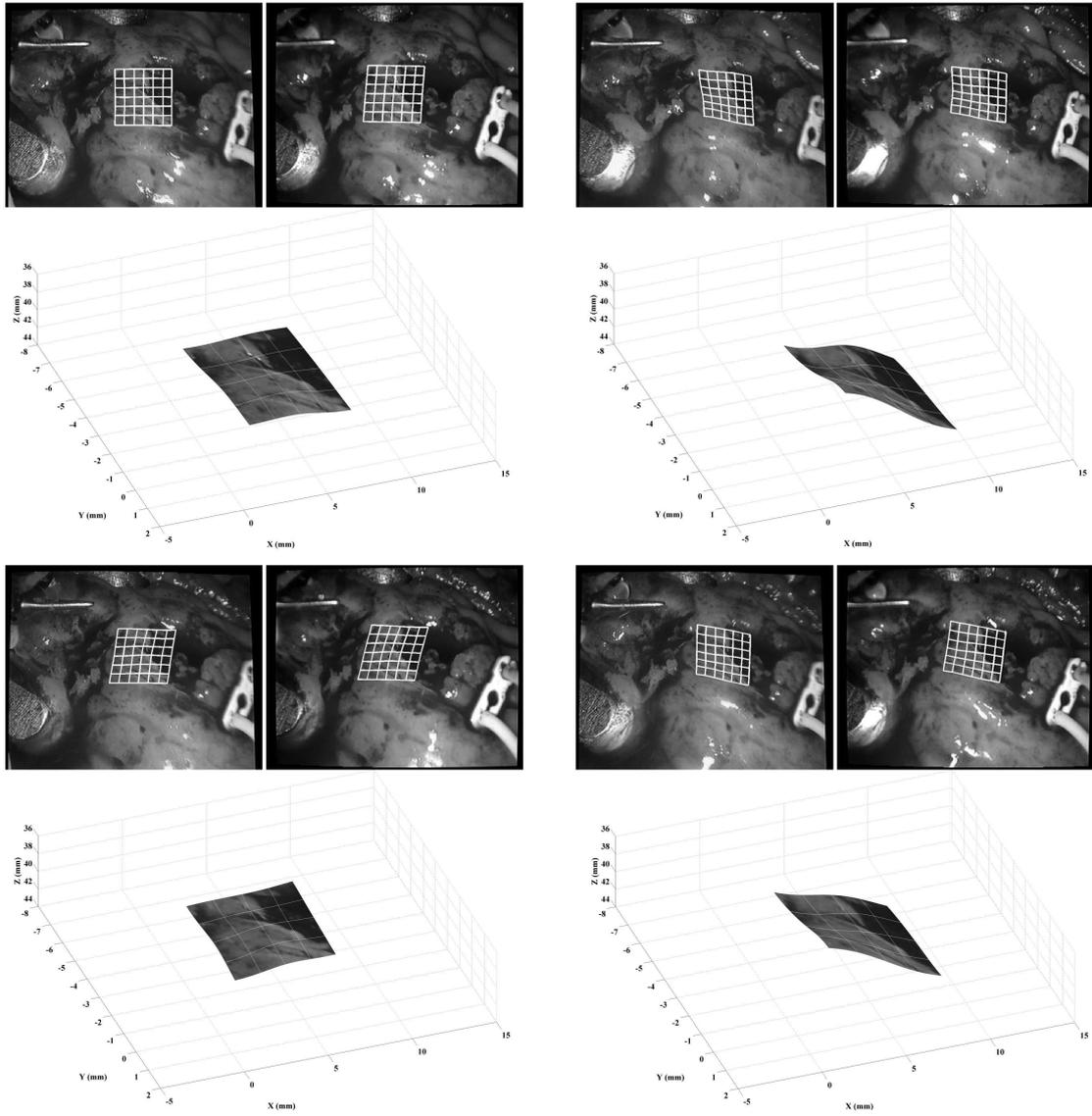


FIG. 2 : Pour des différents instants du cycle cardiaque, la région suivi sur les images droite et gauche est illustrée. Le modèle TPS proposée est une bonne approximation de la surface du coeur.

# Capteur acoustique résonant pour estimer les propriétés d'élasticité du tissu musculaire

Hugues Blasco<sup>1</sup>, (Doctorante 2<sup>e</sup> année)  
 Gilles Despau<sup>2</sup>, (Directeur de thèse)  
 Jean-Yves Ferrandis<sup>3</sup> (Ingénieur de recherche CNRS)

Equipe MIRA de l'Institut d'Electronique du Sud  
 Université Montpellier II  
 34095 MONTPELLIER, France

<sup>1</sup>hugues.blasco@univ-montp2.fr

<sup>2</sup>gilles.despau@ies.univ-montp2.fr, <sup>3</sup>jean-yves.ferrandis@univ-montp2.fr

**Résumé** – Les dystrophies musculaires sont caractérisées par une atrophie et une faiblesse musculaire. L'une des conséquences majeure des dystrophies est une perte progressive de la force musculaire. Nous avons développé une nouvelle méthode pour estimer la dureté des tissus musculaires en utilisant un capteur acoustique résonant. En l'occurrence, le tissu musculaire, en contact avec la pointe du capteur constitue une charge mécanique qui modifie l'état de résonance du capteur. L'interaction entre la pointe et le milieu résulte d'une compression et d'un cisaillement se propageant dans le muscle à une fréquence autour de 25 kHz. Une petite déformation est appliquée au milieu pour rester dans le domaine élastique. La méthode a été validée sur des échantillons de référence et des matériaux biologiques ; nous avons montré que le capteur acoustique résonant est sensible à des différences de propriétés du muscle chez la souris.

Mots clés – Elasticité, capteur acoustique résonant, dystrophie musculaire de Duchenne, diaphragme, gélatine.

## I. INTRODUCTION

La dystrophie musculaire de Duchenne (DMD) touche 1 cas sur 3500 chez les nouveaux nés mâles et se caractérise cliniquement par une faiblesse musculaire progressive des muscles squelettiques, lisses et cardiaques [1]. La pathologie est provoquée par l'absence d'une protéine, la dystrophine, normalement présente dans tous les types de muscle. Généralement, la pathologie est détectée à l'âge de 5 ans chez le jeune patient : la démarche de Gower en est le premier signe comportemental clinique [2]. A l'approche des 10 ans, la faiblesse musculaire est si importante que le patient est incapable de marcher sans assistance. Le patient décède au delà d'une vingtaine d'années à cause d'une insuffisance cardiaque ou respiratoire.

La pathologie est caractérisée histologiquement par une fibrose et une infiltration des tissus adipeux, ce qui modifie considérablement les propriétés mécaniques du tissu musculaire. Ainsi, l'estimation des propriétés élastiques des tissus mous est d'un grand intérêt parce que la dureté de ces tissus peut être liée à un état pathologique. La palpation et la biopsie restent deux outils de diagnostic clinique le plus

couramment utilisés, pour le suivi des dystrophies musculaires telles que la DMD.

Depuis les années 1980, le domaine de l'élastographie est apparu pour des applications qui quantifient la dureté des tissus pour venir en aide au diagnostic médical [3] [4] [5]. L'élastographie est basée sur l'utilisation d'une sollicitation mécanique (compression ou cisaillement) à basse fréquence (0 kHz à 2 kHz) associée à un appareil d'imagerie. La sollicitation mécanique induit des ondes élastiques dont les vitesses de propagation dépendent de la dureté du milieu sollicité. Des dispositifs d'imagerie (échographie, IRM, scanner, etc..) sont utilisés pour mesurer les propriétés de ces ondes élastiques, notamment leur vitesse, au cours de leur propagation. Mais ces techniques ne sont pas facilement adaptables à l'investigation sur des petits muscles.

Le diaphragme de souris mdx est le plus représentatif de la perte de l'intégrité de la fibre musculaire dans le muscle de patients DMD. Le groupe INSERM ERI 25 "Muscle et pathologies" a besoin de méthodes d'estimation de l'élasticité des tissus musculaires sur le petit animal, afin de corréler l'état pathologique à l'état physique musculaire. Le laboratoire IES développe depuis quelques années une technique de résonance acoustique pour quantifier les propriétés viscoélastiques des matériaux [6] [7] [8].

Le travail de thèse présenté s'inscrit dans la poursuite d'une collaboration entre nos deux laboratoires. Lors de premiers travaux, l'atténuation acoustique [9] a été utilisée pour différencier un muscle sain d'un muscle DMD. Cette étude a permis de relier l'atténuation au taux de graisse croissant dans le muscle DMD.

Dans ce papier, une technique innovante est appliquée pour estimer l'élasticité des tissus musculaires. Cela consiste à étudier les modifications de la courbe de résonance d'une sonde acoustique dont la pointe est en contact avec le muscle. La première étape consiste à étudier la sensibilité de la sonde sur des échantillons de référence d'agar gélatine [10]. Ces matériaux modèles sont couramment utilisés dans le domaine de l'élastographie comme matériaux de référence [11] [12] [13]. Nous avons ensuite montré que cette technique acoustique résonante permet de détecter une modification de la dureté des tissus musculaires de souris saines et de souris mdx.

## II. GENERALITES

Les sons sont émis par des corps animés d'un mouvement vibratoire et se propagent sous forme d'ondes mécaniques. La propagation des sons ne peut se faire que dans la matière. Les molécules du milieu traversé subissent des phénomènes de compression et de relaxation successifs et transmettent ces modifications aux molécules voisines.

Les ultrasons sont des vibrations dont la fréquence est supérieure à 20 000 Hz; ils sont inaudibles pour l'oreille humaine. Les fréquences les plus employées en échographie médicale sont entre 2,5 MHz et 10 MHz.

Il existe plusieurs types d'onde ultrasonores dont les ondes longitudinales qui sont dites de compression et les ondes transversales dites de cisaillement.

## III. MATERIEL ET METHODE

### III.1. Matériel

La gélatine utilisée est d'origine animale. Nous pouvons modifier les propriétés de viscosité de la gélatine en y ajoutant une petite quantité de xanthane. Nous utilisons deux échantillons dont les propriétés physiques sont légèrement différentes en viscosité. Le premier échantillon est composé exclusivement de 95% d'eau et de 5% de gélatine. Le deuxième échantillon est composé de 94.9% d'eau, 0.1% de xanthane et de 5% de gélatine. Les valeurs trouvées dans la littérature, pour l'échantillon de gélatine, sont de 2.2 kPa pour l'élasticité en cisaillement et de  $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$  pour la viscosité. Pour l'échantillon composé de gélatine et de xanthane, l'élasticité est de 2.2kPa en cisaillement et la viscosité est de  $0.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$  [14]. Ainsi nous disposons de deux échantillons de référence dont la viscosité est différente.

Le muscle de souris étudié est le diaphragme de souris. Nous travaillons avec un lot de souris saines et un lot de souris mdx. Le diaphragme de souris est la zone musculaire la plus touchée par la dystrophie.

### III.2. Méthode

Nous utilisons les modifications de résonance du capteur acoustique résonant pour déterminer les propriétés du milieu sur lequel sa pointe est mise au contact. Un élément piézo-électrique sert à la fois d'émission et de réception des ondes acoustiques. Le signal d'entrée est un signal sinusoïdal (autour de 25 kHz) qui excite des ondes d'extension acoustiques se propageant dans la sonde.

Le capteur est composé de pièces en acier inoxydable collées par époxy à un élément piézoélectrique, et d'un embout en plexiglas collé sur l'un des deux cylindres métalliques (Figure 1).

La réponse du capteur acoustique est son d'impédance. Deux caractéristiques sont détectées par un balayage en fréquence : le décalage de la fréquence de résonance  $f'$  et la demi-largeur à la résonance  $f'$  (Figure 2).

Le capteur est conçu pour être en contact avec le milieu testé. La force de la sonde sur l'échantillon est contrôlée. Cette force de 0.01N est utilisée pour conserver la même action quelque soit les propriétés viscoélastiques du milieu.

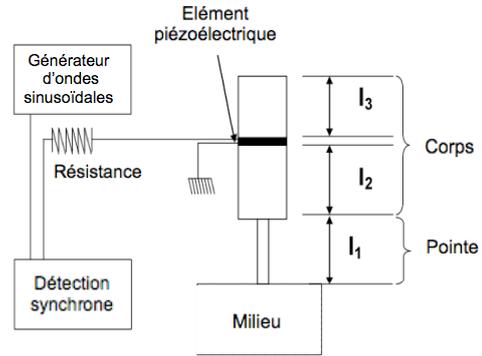


Figure 1 : Le capteur acoustique : le corps de la sonde est renforcé par un élément piézo-électrique pris en étau entre deux bouts de cylindre métalliques. Un cylindre en plexiglas, la pointe ( $l_1$  : 20 mm), a été associé au corps de la sonde ( $l_2$  : 35 mm,  $l_3$  : 45 mm). Le circuit électrique contient un générateur d'ondes sinusoïdales et une détection synchrone (EGG modèle 7220). La résistance  $R$  a été choisie pour être beaucoup plus élevée que l'impédance capacitive de l'élément piézo-électrique.

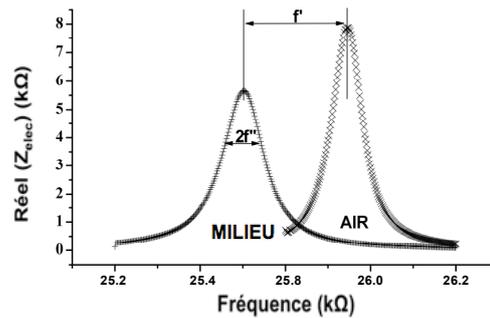


Figure 2 : Deux paramètres mesurés par l'application d'une fréquence aux bornes de l'élément piézoélectrique : le décalage en fréquence de résonance  $f'$  et la demi-largeur à la résonance  $f'$ .

## IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Pour vérifier la sensibilité du capteur acoustique développé, nous avons d'abord testé la méthode avec un échantillon de gélatine et un échantillon constitué par un mélange de gélatine et de xanthane (Figure 3). Ensuite, nous avons testé sa sensibilité sur un diaphragme de souris saine et sur un diaphragme de souris mdx (figure 4).

Pour la première expérience, nous avons appliqué le capteur en sept points différents. La force a été maintenue à  $0.01\text{N} \pm 0,001$  et la température était à  $24,7^\circ \text{C} \pm 0,5$ . Entre chaque mesure, nous avons pris la résonance de la sonde à vide. Pour chaque point, nous avons fait un balayage de fréquence de 23,5 kHz à 27 kHz.

Les résultats présentés dans la figure 3 et le tableau 1 sont la moyenne des sept mesures faites avec le référentiel de l'air, et les échantillons de gélatine et de xanthane. La résonance libre de la sonde (dans l'air) a l'amplitude de résonance la plus élevée. La résonance de la sonde en contact avec les deux échantillons est atténuée et il y a un décalage en fréquence.

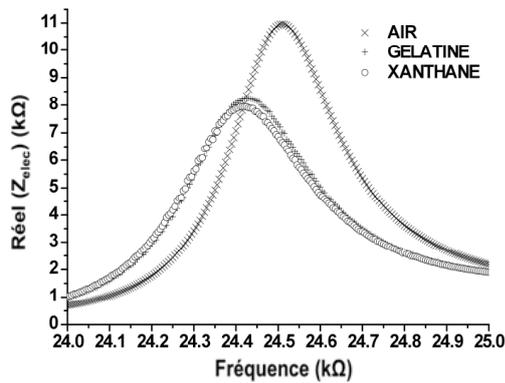


Figure 3 : Mesures de la sonde à vide et en contact avec la gélatine et le mélange de gélatine-xanthane.

Le décalage en fréquence est de 80 Hz pour la gélatine et de 100 Hz pour le mélange gélatine-xanthane. L'augmentation de 30 Hz pour le paramètre  $f''$  indique une dissipation de l'énergie acoustique dans les échantillons.

Milieu	$f'$ (Hz)	$f''$ (Hz)
Air	0	165
Gélatine	80±4	194±1
Xanthane	100±6	196±1

Tableau 1 : Paramètres mesurés par le capteur résonant acoustique : le décalage en fréquence  $f'$  et la demi-largeur à la résonance  $f''$ .

Ces résultats montrent principalement que l'on peut séparer la résonance entre les deux échantillons.

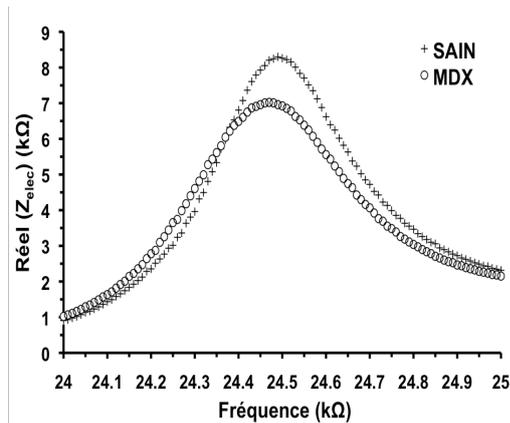


Figure 4 : La résonance de la sonde avec la pointe en contact avec la membrane musculaire de souris : la santé et mdx.

Nous avons ensuite effectué des mesures acoustiques sur des diaphragmes de souris. Nous avons testé un lot de sept souris saines et un lot de sept souris mdx. Les souris sont âgées de 3 mois. Nous effectuons 6 mesures par diaphragme. La force est réglée à  $0.01N \pm 0,003$  et la température est à  $24,1 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5$ . Les résultats présentés dans la figure 4 et le tableau 2

sont la moyenne des mesures obtenues avec les deux lots de souris.

Milieu	$f'$ (Hz)	$f''$ (Hz)
Diaphragme sain	31±30	219±35
Diaphragme mdx	53±38	313±40

Tableau 2 : Paramètres mesurés par le capteur acoustique résonant appliqué sur des diaphragmes de souris.

Le décalage en fréquence est de 30Hz pour les souris saines et il est de 50 Hz pour les souris mdx.

Les résultats montrent que le changement de la fréquence entre le diaphragme de souris mdx et le diaphragme de souris saines n'est pas significatif. Les écart-types importants proviennent de la dispersion des propriétés du diaphragme. La différence du paramètre  $f''$  indique que la dissipation d'énergie est clairement différente. Cela montre que la sonde est sensible à la variation de viscosité ou d'élasticité entre le diaphragme sain et le diaphragme mdx.

## V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour caractériser le changement des propriétés mécaniques de tissus musculaires de souris, nous avons développé une méthode acoustique résonante. La sonde que nous avons conçue a été dimensionnée pour être sensible à des matériaux avec des propriétés mécaniques de l'ordre de celle des muscles. La technique a été validée pour détecter des variations de propriétés sur des matériaux viscoélastiques de référence. Nous avons aussi montré que le capteur est capable de détecter les variations de propriétés musculaires entre souris saines et pathologiques, par des mesures sur les diaphragmes de souris. Actuellement nous développons un modèle numérique pour relier les paramètres de mesures (décalage en fréquence et demi-largeur de la résonance) aux propriétés mécaniques du milieu d'étude.

## VI. REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les membres de l'équipe muscle et pathologie pour leur collaboration. Je tiens à citer Mr Mornet Dominique, désormais retraité, pour la fourniture des animaux. J'adresse également mes remerciements à Mr Laux Didier, pour son aide concernant l'atténuation acoustique. Enfin je remercie Mr Gérard Levêque, pour son soutien sur la partie théorie et simulation.

## VII. REFERENCES

- [1] D.J. Blake, A. Weir, S.E. Newey, K.E. Davies, «Function and Genetics of Dystrophin and Dystrophin-Related Proteins in Muscle», *Physiol Review*, vol. 82, pp 291--329, 2002.
- [2] K.L. Tyler, MD, «Origins and early descriptions of "Duchenne muscular dystrophy" », *Muscle Nerve*, vol 28, pp 402--422, 2003.
- [3] J. Ophir, I. Cespedes, H. Ponnekanti, Y. Yazdi, and X. Li, «Elastography: a quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues», *Ultrasonic Imaging*, vol 13, pp 111--134, 1991.

- [4] M. Tanter, J. Bercoff, R. Sinkus, T. Deffieux, J.L. Gennisson, M. Fink, «Elastography using ultrasound or magnetic resonance: New imaging tools for cancer diagnosis», *Medecine. Nucleaire*, vol 31, pp 132--141, 2007.
- [5] J.F. Greenleaf, M. Fatemi, and M. Insana, «Selected method for Imaging elastic properties of biological tissues», *Annual Rev. Biomed. Eng.*, vol 5, pp 57--78, 2003.
- [6] C. Prugne, J. Van Est, B. Cros, G. Leveque, J. Attal, «Measurements of the viscosity of liquids by near-field acoustics», *Meas.Sci.Technol.*, vol 9, pp 1894--1998, 1998.
- [7] B. Cros, M. Pauthe, M. Rguiti, JY. Ferrandis, «On-line characterization of silica gels by acoustic near field», *Sensors and Actuators B*, vol 76, pp 115--123, 2001.
- [8] M. Valente, JY. Ferrandis, «Evaluation of textural properties of mango tissue by a near-field acoustic method», *Postharvest Biology and Technology*, vol 29, pp 219--228, 2003.
- [9] A. Leydier, «Conception d'un instrument ultrasonore haute fréquence pour la caractérisation des tissus biologiques sains et pathologiques», *PhD thesis*, Université de Montpellier II, France, 2008.
- [10] C. Chene, «La gélatine», *J. Adrianor*, vol 24, pp 1--8, 2000.
- [11] L. Sandrin, C. Fournier, V. Miette, S. Yon, J.M. Hasquenoph, «Fibroscan: a non-invasive device that measures liver stiffness by transient elastography», *ITBM-RBM*, vol 27, pp 25--31, 2005.
- [12] S.M. Atay, C.D. Kroenke, S. Sabet, and P.V. Bayly, «Measurement of the Dynamic shear modulus of mouse brain tissue in vivo by Magnetic Resonance Elastography», *J. Biomech. Eng.*, vol 2, pp130--134, 2008.
- [13] J.L. Gennisson, S. Catheline, S. Chaffai, and M. Fink, «Transient elastography in anisotropic medium: Application to the measurement of slow and fast shear wave speeds in muscles», *J.Acoust. Soc. Of. Am.*, vol 114, pp 536--541, 2003.
- [14] J. Bercoff, «L'imagerie échographique ultrarapide et son application à l'étude de la viscoélasticité du corps humain», *Phd thesis*, p 193, 2004.

# Détermination de la teneur en eau du miel grâce aux ondes acoustiques

Vivian CERESER CAMARA<sup>1</sup> (Doctorante 2e année)  
Didier LAUX<sup>2</sup>, Gilles DESPAUX<sup>3</sup> (Directeurs de thèse)

Institut d'Electronique du Sud  
Université Montpellier 2  
34095 MONTPELLIER cedex 5, France

<sup>1</sup>cereser@lain.univ-montp2.fr  
<sup>2</sup>laux@lain.univ-montp2.fr, <sup>3</sup>despau@lain.univ-montp2.fr

**Résumé – Une méthode ultrasonore basée sur la mesure du coefficient de réflexion complexe à une interface matériau élastique / matériau viscoélastique a été mise au point pour des ondes transverses à une fréquence de 10 MHz. Nous montrons qu'elle peut être appliquée dans le cadre du contrôle qualité des produits agroalimentaires. Une application est proposée sur du miel : mesure de la teneur en eau.**

**Mots-clés – ultrasons; ondes transverses; modules viscoélastiques; pourcentage d'eau; miel.**

## I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, les produits alimentaires doivent satisfaire à de nombreux critères de qualité et de certification avant la commercialisation, en particulier dans les pays industrialisés, où il est nécessaire de disposer de produits alimentaires de haute qualité avec des caractéristiques bien définies. Le miel ne fait pas exception et en Europe, sa composition est réglementée par la directive 74/409/CEE depuis le 22 Juillet 1974.

Le miel est un matériau sucré et visqueux élaboré par les abeilles à partir du nectar des fleurs. Cela est une définition simpliste de ce matériau, qui exclut le miel, fait à partir du miellat. Bien que le miel soit essentiellement une solution saturée de sucres et d'eau, les autres ingrédients qui le composent, associés aux caractéristiques des fleurs à partir desquelles il a été fabriqué, lui donnent un haut degré de complexité.

La composition moyenne du miel peut se résumer en trois composantes principales: les sucres, l'eau et les divers (arômes en particulier). Derrière cette apparente simplicité se cache un des plus complexes produits biologiques [1] [2].

Le miel est un produit alimentaire ayant une haute valeur nutritionnelle. Il est une source facilement accessible de sucres, acides organiques, aminoacides et de macro et micro substances biologiquement actives.

La teneur en eau du miel est une des caractéristiques les plus importantes qui influencera directement sa viscosité, sa densité, sa tendance à cristalliser, son goût et sa conservation.

L'eau présente dans le miel est responsable d'une forte interaction entre les molécules de sucre (liaison hydrogène), ce qui laisse peu de molécules d'eau disponibles pour les micro-organismes. La teneur en eau du miel peut varier de 15 % à 21

%. Bien que la législation européenne autorise un maximum de 20 %, les valeurs au-dessus de 18 % peuvent compromettre la qualité finale du produit. En particulier en cas de forte humidité, le miel peut fermenter sous l'action de levures présentes également dans sa composition.

Les propriétés physiques ou rhéologiques du miel (densité, viscosité, modules élastiques) sont extrêmement dépendantes de la teneur en eau et c'est pourquoi sa détermination précise est fondamentale [3] [4]. Traditionnellement, celle-ci est faite à partir de la mesure de l'indice de réfraction de la lumière : réfractométrie optique. On trouve dans la littérature une loi d'étalonnage résultant de la moyenne de nombreuses mesures faites par divers auteurs et reliant l'indice optique à la teneur en eau [5].

Nous proposons dans ce travail une méthode alternative et très sensible pour mesurer la teneur en eau. Elle est basée sur des ondes ultrasonores transverses autour de 10 MHz.

## II. GENERALITES

Les ondes ultrasonores sont des ondes mécaniques dont la fréquence est supérieure à 20 kHz. Il existe plusieurs types d'ondes qui peuvent se propager dans les matériaux. Dans cette étude, nous avons travaillé avec des ondes transverses. Une onde ultrasonore est dite transversale ou de cisaillement lorsque la direction de vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Un schéma pour illustrer ce type d'onde est donné par la figure 1 [6].

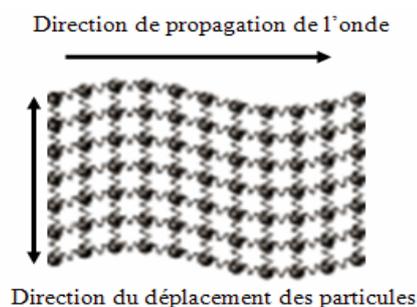


Figure 1 : Schéma représentative d'une onde transverse

### III. TECHNIQUE : METHODE ULTRASONORE A REFLEXIONS MULTIPLES

Lorsqu'une onde ultrasonore transverse est réfléchiée à une interface solide élastique/matériau viscoélastique, le coefficient de réflexion est complexe.

En pratique, ceci signifie que l'onde réfléchiée aura une amplitude inférieure à l'onde incidente mais aussi subira un retard de phase à cause de la viscosité. Ce retard de phase n'existerait pas pour une interface solide élastique / solide élastique.

Le transducteur ultrasonore utilisé est constitué d'un élément piézoélectrique qui assure à la fois la génération des ultrasons mais aussi leur réception. Ce piézoélectrique est de faible épaisseur (environ 200  $\mu\text{m}$ ) et collé sur un barreau de silice. Le barreau de silice est nommé ligne à retard (LAR). En pratique, après excitation électrique de l'élément piézoélectrique, le signal ultrasonore émis se propage dans la LAR, se réfléchi en bout de LAR, se propage à nouveau dans la LAR puis est reconverti en signal électrique par effet piézoélectrique. Ce signal, visualisé sûr un oscilloscope s'appelle un écho. On peut bien sûr utiliser des réflexions multiples dans la LAR. Dans ce cas, on observera n échos ayant effectué plusieurs allers-retours.

Pour notre étude nous allons nous intéresser au coefficient de réflexion complexe à l'interface ligne à retard / matériau viscoélastique. Pour déterminer ce coefficient de réflexion, les essais s'effectuent en deux étapes.

L'amplitude et la position de n aller-retour est enregistrée lorsque la LAR est en contact avec l'air. Ce signal est une référence. Ensuite la même chose est faite lorsque le matériau viscoélastique à étudier est déposé sur la LAR.

Grâce au rapport des amplitudes et du déphasage entre les échos de référence, correspondant à l'interface LAR/Air et les échos correspondant à la réflexion à l'interface LAR/Matériau, le coefficient de réflexion  $R^* = r_0 e^{i\Phi}$  est déterminé par les relations suivantes où f est la fréquence (cf. fig. 2):

$$r_0 = \left( \frac{B_n}{A_n} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\Phi = -2\pi f \left( \frac{\Delta t_n}{n} \right)$$

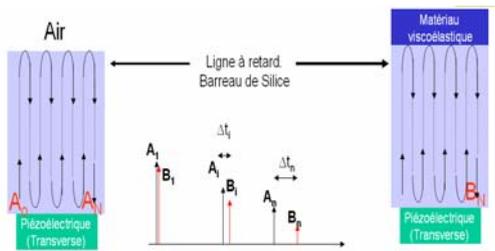


Figure 2 : Principe de la méthode MUR [7] (Multiple ultrasonic reflection method)

Grâce à  $R^*$ , le module élastique complexe  $G^* = G' + i G''$  est déterminé par les relations citées ci-après où  $\rho$  est la masse volumique du matériau analysé,  $\rho_{LAR}$  la masse volumique de la LAR et  $V_{LAR}$  la vitesse ultrasonore dans la LAR.

Tous ces paramètres sont des grandeurs mesurables par ailleurs et donc connues.

$$G' = (\rho_{LAR} V_{LAR})^2 \frac{(r_0^2 - 1)^2 - 4r_0^2 \sin^2 \Phi}{\rho(2r_0 \cos \Phi + 1 + r_0^2)^2}$$

$$G'' = -4(\rho_{LAR} V_{LAR})^2 \frac{(r_0^2 - 1)4r_0 \sin \Phi}{\rho(2r_0 \cos \Phi + 1 + r_0^2)^2}$$

La connaissance de  $G^*$  permet de caractériser complètement le comportement mécanique du matériau et est donc une grandeur rhéologique fondamentale. Globalement,  $G'$  représente l'élasticité du matériau et  $G''$  son comportement visqueux. On a pour habitude d'introduire le rapport  $G''/G'$  que l'on nomme  $\tan(\delta)$ .  $\delta$  s'appelle l'angle de perte. Si  $\tan(\delta)$  est  $\gg 1$  le matériau « est plus visqueux qu'élastique ». Inversement, si  $\tan(\delta)$  est  $\ll 1$ , le matériau « est plus élastique que visqueux ». Pour un matériau donné, on peut passer de  $\tan(\delta) < 1$ , à  $\tan(\delta) > 1$  en faisant varier la température.

En fait, la température où  $\tan(\delta)=1$  caractérise ce que l'on nomme (aux fréquences considérées) le début du plateau vitreux. Le début de ce plateau est fortement lié aux mouvements des macromolécules du matériau viscoélastique étudié. La forte ou faible proportion d'eau ayant un effet sur les mouvements des molécules, on peut s'attendre à ce que l'effet soit aussi important sur la température à laquelle  $\tan(\delta)=1$ . Il est important de remarquer que grâce à l'utilisation du paramètre  $\tan(\delta)$ , la masse volumique du matériau analysé n'est pas à connaître au préalable.

### IV. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les ondes de cisaillement sont générées et reçues par un capteur piézoélectrique fonctionnant à 10 MHz excité par un générateur Panametrics Sofranel 5800 PR. Les échos sont affichés par un oscilloscope Tektronix TDS 3032 et l'enregistrement des données sur PC se fait par l'intermédiaire d'un port IEEE GPIB. Toutes les mesures ont été faites dans un incubateur réfrigéré (BINDER KB 53) avec une précision de  $\pm 0,1$  °C.

Ce point est fondamental car les propriétés viscoélastiques sont extrêmement sensibles à la température. Enfin, les données sont traitées par un programme réalisé avec LabView©.

### V. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous avons travaillé sur des miels achetés dans le commerce conduisant à des teneurs en eau variant de 15 à 18%. Pour atteindre des % d'eau supérieures nous avons aussi dilué un des miels. Les teneurs en eau sont reportées dans le tableau 1.

Type de Miel	% d'eau
Miel de Montagne. Apiculteur André Malaise	15,5 ± 0,2
Forêt et Sapin. Lune de miel ©	15,9 ± 0,2
Forêt et Sapin dilué	16,1 ± 0,2
Miel de Thym. Miellerie Rayon D'or	16,3 ± 0,2
Miel de Châtaigne. Miellerie Rayon D'or	16,4 ± 0,2
Tartimiel. Lune de miel ©	17,2 ± 0,2
Miel d'Acacia. St Germain	17,3 ± 0,2
Forêt et Sapin dilué	17,4 ± 0,2
Auslese Honig. Alnatura ©	17,5 ± 0,2
Miel de Lavande. Miel du Languedoc	17,6 ± 0,2
Miel Toutes Fleurs Casino ©	17,8 ± 0,2
Forêt et Sapin dilué	17,8 ± 0,2
Miel de Romarin. Coté Miel	18,4 ± 0,2
Forêt et Sapin dilué	18,6 ± 0,2
Forêt et Sapin dilué	19,4 ± 0,2
Forêt et Sapin dilué	20,8 ± 0,2

Tableau 1 : Teneur en eau des miels mesurées avec un réfractomètre à miel (Atago pocket refractometer).

Pour chaque miel nous avons fait varier la température et relevé celle pour laquelle  $\tan(\delta)=1$ . Les valeurs obtenues sont reportées dans le tableau 2.

% d'eau	Température °C
15,5 ± 0,2	23,5 ± 0,5
15,9 ± 0,2	22,9 ± 0,5
16,1 ± 0,2	23,0 ± 0,5
16,3 ± 0,2	20,5 ± 0,5
16,4 ± 0,2	20,0 ± 0,5
17,2 ± 0,2	18,0 ± 0,5
17,3 ± 0,2	17,3 ± 0,5
17,4 ± 0,2	16,0 ± 0,5
17,5 ± 0,2	16,0 ± 0,5
17,6 ± 0,2	15,8 ± 0,5
17,8 ± 0,2	15,3 ± 0,5
17,8 ± 0,2	15,0 ± 0,5
18,4 ± 0,2	12,8 ± 0,5
18,6 ± 0,2	12,4 ± 0,5
19,4 ± 0,2	9,3 ± 0,5
20,8 ± 0,2	3,1 ± 0,5

Tableau 2 : Températures pour lesquelles  $G''=G'$  en fonction de la teneur en eau.

En utilisant ces données, nous avons reportés la teneur en eau des miels en fonction de la température sur la figure 3. Sur la base d'une simple régression linéaire, avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) égal à 0,99, la relation suivante a été obtenue :

$$T^{\circ}\text{C} = 84,89 - 3,86.x$$

où x représente la teneur en eau (%).

En utilisant la relation précédente,  $\Delta x (\%)=0,26\Delta T$ . Sachant que pour notre expérience  $\Delta T=0,5^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta x (\%)=0,13$ .

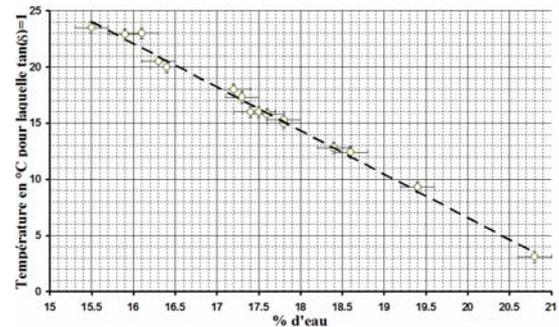


Figure 3 : Températures obtenues en fonction de la teneur en eau des différents échantillons de miel.

## VI. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En utilisant une méthode acoustique, la teneur en eau d'échantillons de miel a été reliée à la température d'apparition du plateau vitreux pour une fréquence ultrasonore constante valant 10 MHz.

Cette méthode acoustique s'avère extrêmement sensible puisqu'il est possible de séparer deux miels dont la teneur en eau varie de moins de 0,2 %.

Comme perspective de ce travail, nous pensons qu'à terme, cette technique pourrait être employée directement sur les pots de miel, sans même avoir à les ouvrir, ce qui est impossible avec les approches par réfractométrie optique.

Dans le cadre d'un contrôle qualité, nous pouvons d'ores et déjà fixer un critère de conformité : à  $5^{\circ}\text{C}$ , si  $\tan(\delta)>1$ , le miel contient plus de 20 % d'eau et ne répond plus à la norme européenne. Par ailleurs si  $\tan(\delta)=1$  aux alentours de  $14^{\circ}\text{C}$ , la teneur en eau est inférieure à 18 % ce qui garantit un miel moins susceptible d'évoluer dans le temps à cause de la fermentation.

## VII. REFERENCES

- [1] E. Crane. Honey: a comprehensive Survey, In Eva Crane (Ed.), ville, pays, 1975.
- [2] J. W. White, Jr. Honey. Advances in food research, vol 24 pp. 287-364, 1978.
- [3] S. Yanniotis, S. Skaltsi and S. Karaburnioti., Effect of moisture content on the viscosity of honey at different temperatures, Journal of Food Engineering, vol. 72(4), pp. 372-377, 2006.
- [4] Jorge Chirife, María Clara Zamora and Aldo Motto. The correlation between water activity and % moisture in honey: Fundamental aspects and application to Argentine honeys, Journal of Food Engineering, vol. 72(3), pp. 287-292, 2006.
- [5] E. B. Wedmore, The accurate determination of the water content of honeys. Part I. Introduction and results, Bee World, vol. 36(11), pp. 197-206, 1955.
- [6] [www.projettockham.org](http://www.projettockham.org)
- [7] J. Gasparoux, D. Laux, J.Y. Ferrandis, J. Attal and Philippe Tordjeman. Large frequency bands viscoelastic properties of honey, Journal of Non Newtonian fluid mechanics, vol. 153(1), pp. 46-52, 2008.

# DOCTISS 2009

## Influence de la Technologie du composant sur les performances laser

Alban GASSENQ<sup>1</sup> (Doctorant 2e année)  
Laurent CERUTTI, Alexei BARANOV, Eric TOURNIE<sup>2</sup> (Directeur de Thèse)

Institut Electronique du Sud – UMR5214 du CNRS  
Université Montpellier 2, Case courrier 067, 34095 Montpellier Cedex 5. France

<sup>1</sup>gasseng@ies.univ-mont2.fr  
<sup>2</sup>eric.tournie@univ-montp2.fr

**Résumé**—Le groupe « Nanomir » de l'IES travaille sur la conception et la fabrication de nouveaux systèmes photoniques moyen infrarouge (MIR). Le MIR comprend la gamme de longueurs d'onde allant de 2 à 5  $\mu\text{m}$  qui est une fenêtre très bien adaptée à la détection de polluants gazeux par spectroscopie à diodes lasers. Pour réaliser un laser à semi-conducteur, on crée tout d'abord le monocristal de base par croissance cristalline pour ensuite mettre en forme le laser par diverses étapes technologiques. Cet article traite de l'influence des divers paramètres de la technologie test (dimensions du laser, méthode de gravure...) sur les performances des composants, et d'améliorations qui peuvent lui être apportées (métallisation arrière, réseau DFB), en vue d'un fonctionnement laser monomode, à haute température et en régime d'alimentation continu.

**Mots clés** - Laser à semi-conducteur; composant optoélectronique; technologie du composant.

### I. INTRODUCTION.

#### 1.1. Contexte et application

La protection de l'environnement et la lutte contre la pollution sont des thèmes majeurs du XXI<sup>ème</sup> siècle qui nécessitent des efforts particulièrement appuyés. La spectroscopie optique est le moyen le plus précis et le plus sensible pour détecter et analyser les gaz. Le MIR présente un grand intérêt pour ce type d'application, car il existe dans cette gamme de longueur d'onde de nombreuses raies d'absorption de gaz polluants ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{NH}_3$ ...). Les systèmes d'analyses photoniques nécessitent l'emploi de composants lasers opérant à température ambiante en courant continu. Ce type de composant n'existe qu'entre 2 et 3  $\mu\text{m}$ , or l'absorption fondamentale de nombreuses molécules importantes (alcane, alkène,  $\text{HCl}$ ...) se situe au-delà de 3  $\mu\text{m}$ . La mise au point de nouveaux lasers émettant à plus grande longueur d'onde permettra d'augmenter la sensibilité de détection. Ainsi, nous cherchons à réaliser un laser à 3.3  $\mu\text{m}$ .

#### 1.2. Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs (s.c) sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants. La plupart des composés et alliages semi-conducteurs basés sur les colonnes III et V du tableau de Mendeleïev cristallisent sous la forme d'une structure

« Blende de Zinc ». Comme montré sur la Figure 1- a, l'arrête de ce cube « 2a » définira le paramètre de maille.

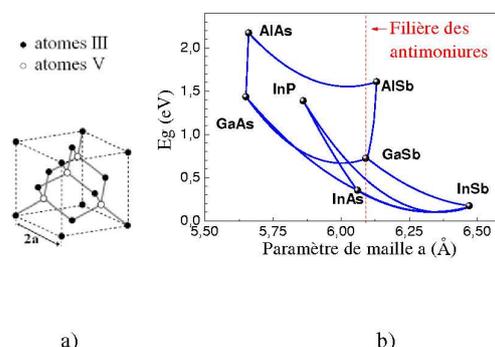


Figure 1: (a) Structure cristalline blende de zinc ; (b) Energie « gap » en fonction du paramètre de maille

Les technologies III-V sont utilisées en optoélectronique car certains de ces matériaux peuvent émettre de la lumière, contrairement au Si utilisé en micro-électronique. Le Gap est l'énergie d'émission minimum du semi-conducteur à température ambiante. Chaque semi-conducteur est caractérisé par son paramètre de maille et son gap (Figure 1- b). La longueur d'onde d'émission est reliée à  $E_g$  par la relation (1).

$$\lambda(\mu\text{m}) \approx \frac{1.24}{E_g(\text{eV})} \quad (1)$$

Un laser à semi-conducteur sera réalisé à partir d'un empilement de couche de différents alliages de matériaux III-V ayant des paramètres de maille proches.

#### 1.3. Les lasers à semi-conducteurs

Un laser est constitué d'un milieu à gain (auquel on apporte de l'énergie de façon optique ou électrique) émettant des photons sur une certaine gamme de longueurs d'onde, placé dans une cavité résonnante constituée de deux miroirs (Figure 2). Les photons émis font des allers-retours dans la cavité. Lorsque la puissance d'entrée est suffisamment importante le rayonnement est amplifié jusqu'à atteindre l'effet laser (lumière monochromatique et directive). Ainsi on définit le seuil de l'effet laser comme l'énergie minimum nécessaire à l'obtention d'un rayonnement laser.

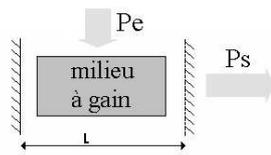


Figure 2: Principe du laser

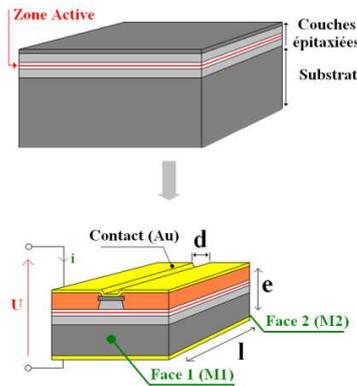


Figure 3: Laser à s.c : de la plaquette épitaxiée au composant final

Dans un laser à semi-conducteur (Figure 3), les miroirs sont les facettes du cristal clivé (M1 et M2), le milieu à gain est la zone active (c'est là où sont émis les photons) et le système de pompage est l'injection électrique (l'énergie d'entrée est l'énergie électrique). La Figure 3 montre la transformation que subit le cristal semi-conducteur pour passer du matériau au composant final. Un des avantages des lasers à s.c est leur taille réduite. En effet, ils ne font que quelques millimètres de long (l), sur des largeurs de l'ordre de la dizaine de micromètres (d) et une épaisseur de la centaine de  $\mu\text{m}$  (e). La « zone active » qui émet les photons ne fait que quelques nm à quelques dizaines de nm d'épaisseur.

#### 1.4. Fabrication

La conception d'un laser comprend quatre étapes. Premièrement, la simulation du composant à fabriquer permet de choisir la filière de semi-conducteur à utiliser et de se faire une idée des performances accessibles. Ensuite la structure est réalisée par épitaxie par jet moléculaire. Cette méthode permet de contrôler avec précision des croissances cristallines allant de la monocouche atomique ( $\sim 0.1\text{nm}$ ) jusqu'au micromètre. Troisièmement, plusieurs étapes technologiques permettent, à partir de la plaquette épitaxiée, de fabriquer le laser lui-même. Enfin, les études du composant indiquent les éventuels paramètres à modifier qui sont réinjectés dans de nouvelles modélisations afin de repartir pour un nouveau cycle. Cet article traite de l'influence de la troisième étape sur les performances des lasers à super réseau émettant à  $3.3\mu\text{m}$  [1].

## II. TECHNOLOGIE DU COMPOSANT

La technologie du composant se déroule au minimum en six étapes. La première étape est la lithographie : celle-ci permet un dépôt de résine en polymère pour protéger un « ruban » de l'attaque chimique. Après gravure, le ruban jouera le rôle de guide d'onde pour la lumière. Une deuxième lithographie permet ensuite l'isolation pour déposer le contact en or seulement sur le ruban. Pour finir, l'amincissement, réalisé avec de la poudre d'Alumine suivi d'un polissage optique avec la même solution que pour la gravure, diminue la

résistance électrique de contact. Le laser peut alors être monté sur l'embase en cuivre, structure épitaxiée en haut (Up), ou en bas (Down comme sur la Figure 4). Ce dernier montage favorise l'évacuation de la chaleur issue de la zone active. La Figure 4 résume toutes ces étapes.

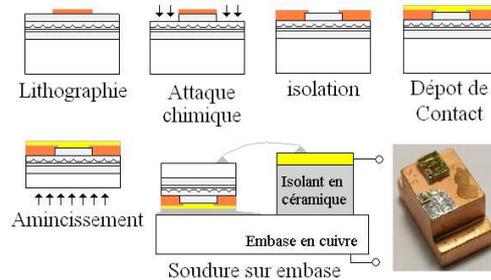


Figure 4: Différentes étapes technologiques pour la réalisation d'un laser à s.c à partir d'une plaquette épitaxiée

## III. INFLUENCE DE LA TECHNOLOGIE DU COMPOSANT SUR LES PERFORMANCES LASERS

### III.1. Influence de l'attaque chimique

La gravure est une étape primordiale de la technologie. Il est possible d'utiliser différentes méthodes (gravures sèches ou humides). De plus, une profondeur de gravure non optimisée peut considérablement détériorer les performances lasers.

#### III.1.1 Méthode de gravure

Nous avons pu comparer deux méthodes de gravure sur la même plaquette laser : les gravures humides ont été réalisées au sein du groupe Nanomir et les gravures RIE (*Reactive Ion Etching*) ont été réalisées par l'entreprise Thales (Figure 5- a). La méthode de gravure RIE permet plus de flexibilité en terme de géométrie accessible et elle est utilisée à l'échelle industrielle. La Figure 5- b montre les seuils laser en fonction de la température. Ils sont comparables pour les deux types de gravure ce qui montre que la gravure humide du laboratoire n'est pas une limitation par rapport au procédé industriel.

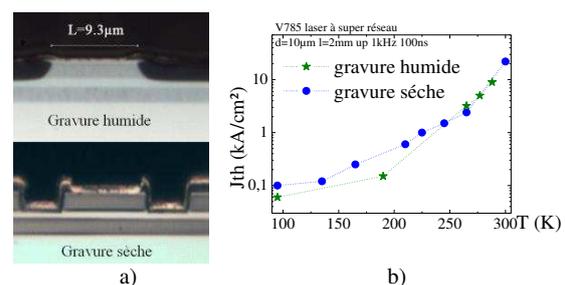


Figure 5: Influence de la méthode de gravure ; a) vue en coupe de la facette du laser ; b) influence sur le seuil de l'effet laser

### III.1.2 Profondeur de gravure

La Figure 6 montre les vues en coupe de trois échantillons identiques à l'exception du temps de gravure humide. Les seuils de l'effet laser en fonction de la température sont reportés sur la Figure 7. Ainsi les seuils les plus faibles sont pour une gravure de 7 secondes. Pour 4 secondes la gravure n'est pas assez importante et les lignes de courant ne passent pas directement par la zone active. Quand à l'échantillon gravé en 12 secondes, on peut constater qu'une gravure trop

longue diminue la largeur du canal ce qui détériore les performances lasers (voir § III.2).

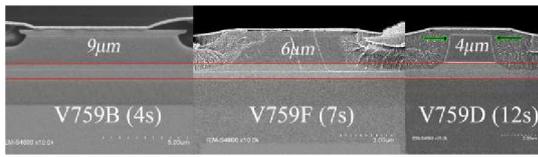


Figure 6: Vues en coupe de la facette de lasers avec différentes profondeurs de gravures

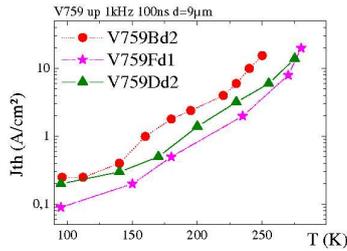


Figure 7: Influence de la profondeur de gravure sur le seuil de l'effet laser

### III.2. Influence de la largeur de la diode laser

Pour l'expérience suivante, les diodes sont de même longueur, il est donc possible de comparer rigoureusement l'influence de la largeur du canal ( $d$  sur Figure 3). Sur la Figure 8 on peut voir que plus la largeur du canal augmente, plus les densités de courant seuil diminuent. C'est seulement à partir de  $d=10\mu\text{m}$  que les densités de courant seuil restent les mêmes. En effet, l'onde optique est absorbée par l'isolation pour des largeurs de canaux de l'ordre de la longueur d'onde. Ainsi une diminution de la largeur du ruban ne permet pas d'améliorer les densités de courant seuil mais seulement les courants puisque en diminuant la largeur du ruban, on diminue la surface d'injection.

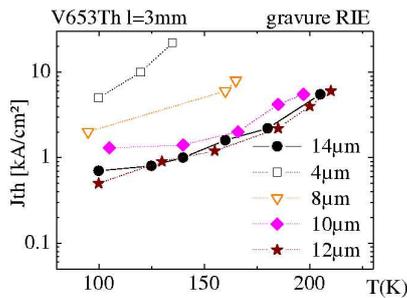


Figure 8: Influence de la largeur de la diode sur le seuil de l'effet laser

### III.3. Influence de la longueur de la diode laser

#### III.3.1 Effet sur le spectre d'émission laser

Dans une diode laser à semi conducteur classique il existe plusieurs modes longitudinaux dans la cavité. L'écart entre les modes est inversement proportionnel à la longueur ( $l$  sur Figure 3) de la diode selon la formule (2) :

$$\Delta E = \frac{hc}{2nl} \quad (2)$$

L'indice du guide d'onde est  $n$ ,  $h$  et  $c$  étant la constante de Planck et la vitesse de la lumière dans le vide, respectivement,  $l$  est le seul paramètre sur lequel on puisse jouer pour obtenir une émission monomode. Ainsi avec  $n=3.5$  on trouve un écart entre les modes de  $0.35\text{meV}$  pour une longueur de  $0.5\text{mm}$  et de  $0.09\text{meV}$  pour  $2\text{mm}$ . La Figure 9 montre les spectres d'émission d'un même échantillon pour une diode de  $0.5$  et de  $2\text{mm}$ . Les valeurs théoriques sont bien retrouvées et l'émission est monomode longitudinale à faible injection seulement pour la diode courte. Ceci est dû à la nature du gain dans un semi-conducteur.

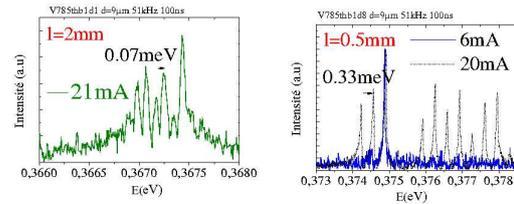


Figure 9: Spectres d'émission de laser pour deux longueurs de diodes différentes

#### III.3.2 Effet sur le seuil de l'effet laser

La longueur d'une diode joue sur le seuil de l'effet laser, les diodes longues sont plus performantes en terme de densité de seuil, que les courtes qui manquent de gain.

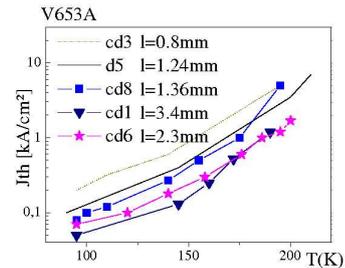


Figure 10: Influence de la longueur de la diode sur le seuil de l'effet laser

## IV. AMELIORATIONS TECHNOLOGIQUES

### IV.1. Influence de la métallisation arrière

La technologie de base présentée en Figure 4 ne possède pas de métallisation arrière. Or, il est possible de déposer un contact sur le GaSb  $n$  pour diminuer la résistance série du laser, ce qui limite l'échauffement. Nous avons premièrement réalisé un comparatif de différents contacts en réalisant des plots de  $300\mu\text{m}$  séparés de  $500\mu\text{m}$ , comme montré sur la Figure 11. Quatre types de métallisation ont été testés :  $300\text{nm}$  d'AgGeNi par bombardement cathodique avec ou sans couche d'accroche en Pt ( $30\text{nm}$ ),  $300\text{nm}$  de PtAu par bombardement cathodique avec couche d'accroche en Ti ( $30\text{nm}$ ),  $200\text{nm}$  d'Al par évaporation avec couche d'accroche en Cr ( $30\text{nm}$ ). De plus, des recuits ont été testés à  $200^\circ\text{C}$  pendant 2 heures.

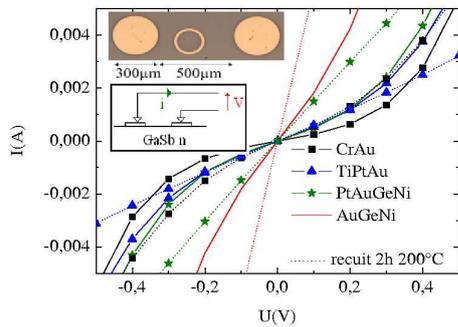


Figure 11: Comparatif des contacts sur GaSb n

La Figure 11 montre que le contact déposé par bombardement cathodique avec une cible en  $\text{Au}_{0,84}\text{Ge}_{0,11}\text{Ni}_{0,04}$  et recuit à  $200^\circ\text{C}$  pendant 2h est le plus ohmique. Ceci se retrouve bien sur les résistances série de deux lasers identiques à l'exception de leurs métallisations arrière (Figure 12).

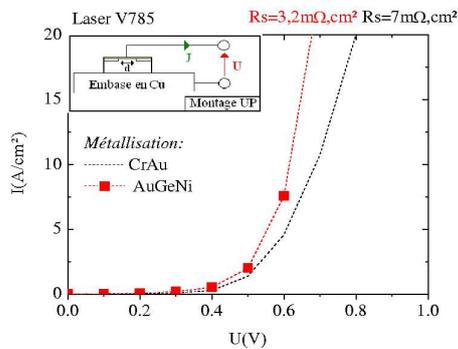


Figure 12: Comparatif des caractéristiques électriques de laser en fonction du contact arrière

#### IV.2. Ajout d'un réseau DFB pour une émission monomode

Comme nous l'avons vu au §III-3-1 il n'est pas possible d'obtenir un fonctionnement monomode longitudinal en forte injection, même avec une diode courte. Pour ce faire, il est possible d'ajouter un réseau DFB (*distributed feedback*), pour filtrer l'émission. La Figure 13 montre une photo MEB (*Microscopie électronique à balayage*) d'un tel réseau et son positionnement sur le laser. Le réseau situé sur le guide d'onde gravé filtre la partie évanescente de l'onde.

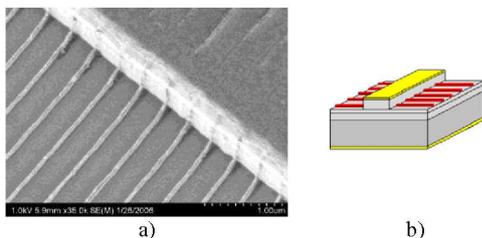


Figure 13: a) image TEM d'un réseau DFB ; b) positionnement du réseau DFB par rapport au laser

Avec un tel système, on peut supprimer les modes secondaires même à forte injection. La Figure 14 montre bien des modes secondaires écrasés même à 180mA. Cette

technologie a déjà montré son intérêt sur des lasers optimisés à  $2.6\mu\text{m}$  [2]. Cependant, elle n'a pas encore été transposée aux lasers à  $3.3\mu\text{m}$ .

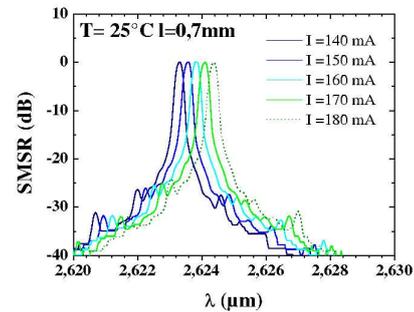


Figure 14 : Spectre d'émission d'un laser DFB à  $2.6\mu\text{m}$

#### V. CONCLUSION.

Les études présentées ici démontrent que la technologie du composant joue un grand rôle sur les performances du laser. Le procédé technologique sera adapté pour atteindre les spécificités imposées par l'application. A l'exception des réseaux DFB, ces études ont été réalisées sur des lasers à super réseau, elles ont largement contribué à obtenir une émission à température ambiante à  $3.3\mu\text{m}$ , jamais démontrée sur ce type de système [3].

#### VI. REMERCIEMENTS.

Travaux supportés en partie par la Commission Européenne (projet FP6-017383 DOMINO)

#### REFERENCES.

- [1] N.Deguffroy, et al. «InAs/GaSb short-period superlattice injection lasers operating in  $2.5\mu\text{m} - 3.5\mu\text{m}$ », 2007 *Electronics Letters*, 90:2, 1281-1282
- [2] D.Barat, et al. «Antimonide-based DFB laser emitting above  $2.6\mu\text{m}$ », 2007, *Electronics Letters* 43:23, 1285-1287
- [3] A.Gassenq, et al. «InAs/GaSb/InSb short-period superlattice diode lasers emitting near  $3.3\mu\text{m}$  at room-temperature. », 2009 *Electronics Letters*, 45:3, 165-167

# Electronique de puissance : multi échelle, multi usage, multi domaine, et enfin, plus spécifiquement à l'IES GEM : multicellulaire.

Bertrand GELIS<sup>1</sup> (Doctorant 2<sup>ème</sup> année)  
François FOREST<sup>2</sup>, Jean-Jacques HUSELSTEIN<sup>3</sup> (Directeurs de thèse)

Institut d'Electronique du Sud (IES)  
Groupe Energie et Matériaux (GEM)  
Université Montpellier 2  
34095 MONTPELLIER cedex, France

<sup>1</sup> bertrand.gelis@ies.univ-montp2.fr  
<sup>2</sup> forest@univ-montp2.fr, <sup>3</sup> huselstein@univ-montp2.fr

**Résumé – L'électronique de puissance est partout ! Nous allons montrer dans un premier temps que les alimentations à découpage sont présentes à toutes les échelles de puissance et pour une multitude d'usages. Nous présenterons ensuite les structures multicellulaires qui sont le thème de nos recherches. Nos travaux sur une structure Flyback pour une conversion DC/DC 28V/300V 12kW seront présentés dans le but de montrer les domaines techniques présents dans la conception d'une telle alimentation.**

**Mots-clés – Electronique de puissance, Flyback, multicellulaire, couplage magnétique.**

## I. INTRODUCTION.

L'électronique de puissance a permis des progrès considérables dans la conversion d'énergie électrique [1]. Nous pouvons donner 2 exemples extrêmes : les appareils portables qui contiennent tous des convertisseurs d'énergie toujours plus petits et plus légers, ou le TGV, dans lequel une électronique de puissance alimente les moteurs de traction. Dans les 2 cas, une interface de puissance est nécessaire entre la source électrique (la prise de courant ou la caténaire ...) et les récepteurs que sont l'électronique embarquée ou les moteurs. Au cœur de ces systèmes se trouvent des composants à semi-conducteur, quasiment identiques à ceux utilisés en électronique hormis leurs dimensions (transistor d'un micro processeur qqµm, transistor d'un TGV qqcm). Ils sont utilisés comme des interrupteurs ultra-rapides (commutation ou découpage) qui permettent la modulation d'énergie à pertes minimales. Nous aborderons dans une première partie les aspects multi échelle et multi usage de l'électronique de puissance après avoir présenté la notion de découpage.

Pour des types de conversions spécifiques, notamment lorsque les calibres extrêmes des composants interrupteurs sont atteints, une solution est d'utiliser des systèmes multicellulaires. On associe plusieurs modules identiques en parallèle (courant) ou en série (tension) afin de mieux répondre au cahier des charges. Notre équipe travaille sur des convertisseurs multicellulaires parallèles dans un contexte particulier puisque nous nous intéressons à des applications

de type embarquées avec des contraintes de puissance volumique et de puissance massique assez draconiennes. Nous étudions une technique de couplage de chaque cellule via des coupleurs magnétiques qui mélangent avantageusement les courants de chaque cellule. Nous présenterons en deuxième partie la démarche d'intégration et la structure Flyback multicellulaire étudiée à l'IES GEM.

Outre l'utilisation des composants à semi-conducteur, la conception des convertisseurs nécessite d'associer des composants passifs, inductances et condensateurs, indispensables à la réalisation de fonctions de filtrage et de stockage. Tous les composants étant le siège de pertes, une problématique de gestion thermique s'ajoute à la réalisation et à la mise en œuvre de ces composants

La troisième partie traitera des notions multi physiques mises en jeu dans la conception du Flyback multicellulaire du laboratoire.

## II. MULTI ECHELLE ET MULTI USAGE.

Un chargeur de batterie, voici un appareil d'électronique de puissance que nous utilisons assez souvent avec nos téléphones ou PC portables. Mais nous pourrions établir une liste bien plus longue d'appareils domestiques s'inscrivant dans cette discipline : alimentation d'appareil électrique en tout genre : PC, imprimante, télévision, mais aussi gradateur de lumière, ampoule basse consommation... Vous l'avez compris, l'électronique de puissance est partout ! En effet, c'est le moyen le plus économique, simple et performant pour changer la forme du signal électrique ; c'est-à-dire abaisser ou élever la tension, changer la fréquence, moduler et limiter la puissance transmise.

Pour illustrer la notion de découpage, prenons l'exemple devenu classique de par sa simplicité, le hacheur abaisseur présenté Figure 1 dont le fonctionnement est illustré Figure 2. La tension continue  $V_e$  représente la source de tension continue d'entrée du montage. Les interrupteurs  $T_1$  et  $T_2$  sont supposés parfaits mais en réalité il s'agit d'interrupteurs de puissance de type transistor commandés en « bloqué/saturé ». Ils sont successivement ouverts et fermés de façon périodique (de période  $T$ ) et complémentaire. Les éléments  $L$  et  $C$  sont

des éléments de filtrage non dissipatifs. Leur fonction est la réalisation d'un filtre destiné à l'élimination des ondulations de la tension de sortie  $V_s$ .

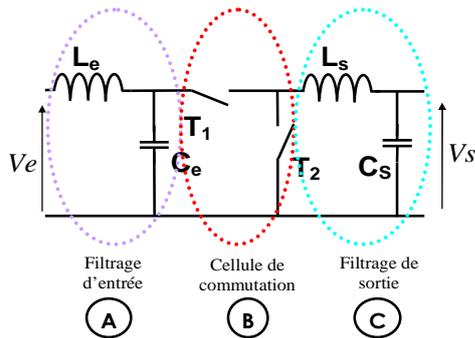


Figure 1 : Schéma d'un hacheur abaisseur de tension

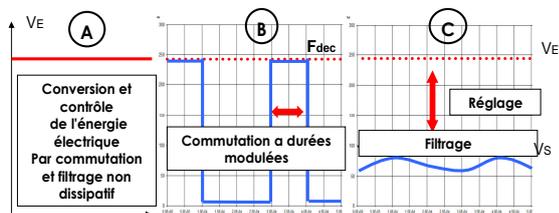


Figure 2 : Principe de fonctionnement de l'abaisseur de tension

Nous voyons se dessiner le principal intérêt des alimentations à découpage : pas de pertes de puissance soit un rendement de 100%. En effet aucune dissipation d'énergie n'est utilisée pour changer la forme de l'énergie d'entrée. Malheureusement, nous avons considéré des éléments parfaits, en réalité :

- Les composants interrupteurs ne présentent pas une chute de tension nulle en état fermé et dissipent par conséquent de l'énergie. On appelle cela des pertes par conduction. De même, leurs commutations ne se font pas instantanément et des pertes « par commutation » apparaissent.
- Les composants électromagnétiques (inductance et transformateur) présentent aussi des pertes dans les conducteurs qui les constituent (appelées pertes cuivre) et dans les circuits magnétiques (appelées pertes fer).
- Néanmoins les rendements sont compris entre 80% et 98%.



Figure 3 : Convertisseur à résonance pour tube fluo compact



A pont de diode redresseur ; B condensateur du filtre d'entrée ; C transformateur d'isolement ; D inductance du filtre de sortie ; E condensateur du filtre de sortie

Figure 4 : Alimentation de PC

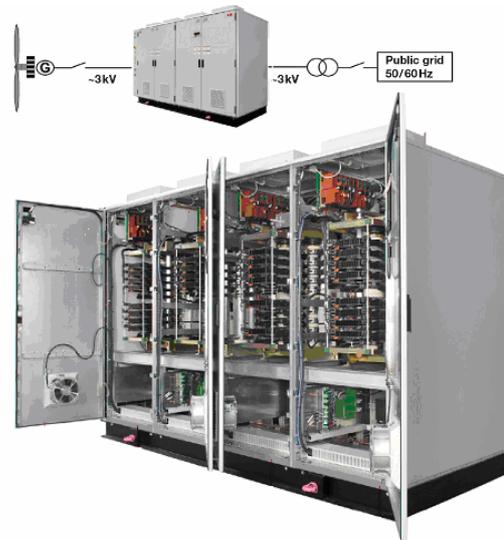


Figure 5 : Onduleur de tension de forte puissance pour éolienne.

Il existe donc une multitude de conversions possibles et heureusement, car sans l'avancée des alimentations, les systèmes électroniques n'auraient pas connu l'évolution fulgurante de ces dernières décennies. Ce sont ces aspects de rendement et de tout type de conversion possible qui ont permis aux alimentations à découpage de s'imposer devant les montages linéaires ou électromécaniques. Balayons plusieurs exemples de convertisseurs pour démontrer l'aspect multi-échelle de l'électronique de puissance.

- Les lampes basse consommation. La Figure 3 nous montre le convertisseur qui est placé dans le culot de l'ampoule. Nous voici dans l'échelle du petit, soit la dizaine de watts.
- Une alimentation de PC. La Figure 4 détaille les constituants principaux, l'échelle est de l'ordre de quelques centaines de watts.
- Un convertisseur permettant aux éoliennes de fonctionner à vitesse variable et d'être raccordée à un réseau à fréquence fixe (Figure 5). La gamme de puissance est de l'ordre de quelques Méga watts.

### III. MULTI CELLULAIRE.

Avant d'aborder les alimentations multicellulaires, nous présenterons la dynamique d'intégration de puissance. Il s'agit de l'objectif de nos recherches.

#### III.1. « L'intégration de puissance ».

L'intégration est une tendance générale des systèmes électroniques généralisée en électronique analogique de signal et en électronique numérique. Les convertisseurs statiques d'énergie utilisant l'électronique de puissance restent actuellement en marge de cette démarche d'intégration car les problèmes posés dans ce cas sont beaucoup plus complexes. Un dispositif classique d'électronique de puissance est constitué d'un agencement de composants tridimensionnels, en comparaison de l'électronique de signal qui est plutôt planaire. L'assemblage de ces différents éléments se fait par une succession d'opérations thermomécaniques, ce qui rend difficile la compaction des dispositifs et l'automatisation de la production.

La philosophie de l'intégration de puissance consiste à remplacer l'essentiel de cet agencement par un ensemble d'opérations réalisant simultanément l'élaboration du plus grand nombre de composants et de leur assemblage. Il existe deux orientations distinctes, mais complémentaires :

- Une intégration monolithique (« on chip ») dans laquelle l'ensemble des composants est réalisé et interconnecté par des techniques de dépôt et de gravure, avec une technologie de base pour l'instant "silicium". Elle conduit à la notion de circuit intégré de puissance mais ne peut concerner que des dispositifs de faible puissance (quelques watts)
- Une intégration hybride ou hétérogène (« on package »), aux exigences technologiques moindres sur le plan dimensionnel et fonctionnel, dans laquelle ce sont essentiellement les interconnexions, le drainage thermique et la conception des passifs qui sont réalisés par gravure et empilement de couches successives. Ces composants passifs peuvent être associés par exemple à des composants actifs monolithiques

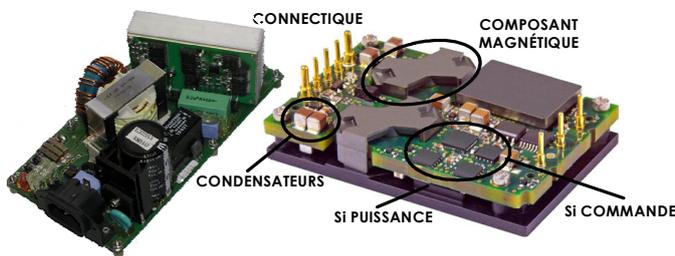


Figure 6 : deux alimentations : une à composant discret classique et l'autre à composant approprié à l'intégration.

### III.2. Les alimentations multicellulaires et multicellulaires couplées.

L'IES GEM participe activement à la dynamique de recherche axée sur l'intégration de puissance, notamment en explorant la piste des convertisseurs multicellulaires. Il s'agit en fait de faire fonctionner plusieurs convertisseurs en parallèle afin de fragmenter la puissance et d'obtenir une qualité de conversion améliorée. Ces structures sont bien adaptées à l'intégration qui permettra de gérer la multiplication de sous-ensembles. La Figure 7 présente un hacheur abaisseur à deux cellules entrelacées. La création d'une fréquence apparente double de la fréquence de chaque cellule permet de réduire le niveau de filtrage sans augmenter les pertes par commutation. Cela signifie que le condensateur en sortie pourra être nettement plus petit dans la structure multicellulaire. D'une façon générale, la fréquence apparente d'un ensemble à  $q$  cellules est  $q$  fois plus grande que la fréquence de découpage d'une cellule. On montre que le condensateur de sortie est  $q^2$  fois plus petit qu'avec un seul étage et que la capacité de régulation de la structure (contrôle de la tension) est bien meilleure.

L'autre avantage des structures parallèles est le partage de la puissance, qui permet d'utiliser des composants actifs de calibre plus petit et pouvant par conséquent fonctionner à plus haute fréquence. Pour l'ensemble des composants, cette réduction de la puissance unitaire donne accès à des technologies plus standards et plus performantes et facilite la gestion thermique.

Il est possible de réaliser sur les inductances du convertisseur entrelacé un couplage magnétique. Les principaux avantages de cette interconnexion magnétique sont :

- Une amélioration des comportements dynamiques, l'inductance apparente est plus faible que dans le cas des inductances non couplées.
- La réduction des pertes par conduction, et de l'ondulation de courant dans chaque phase.
- La diminution du volume global de composants magnétiques.

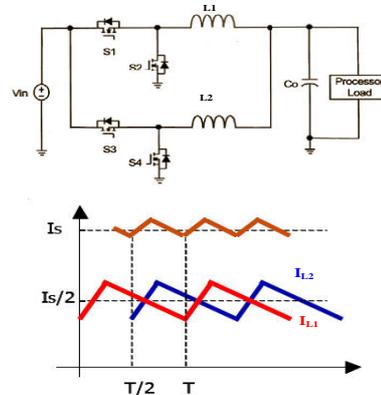


Figure 7 : Hacheur abaisseur bi-cellulaire, illustration de l'intérêt.

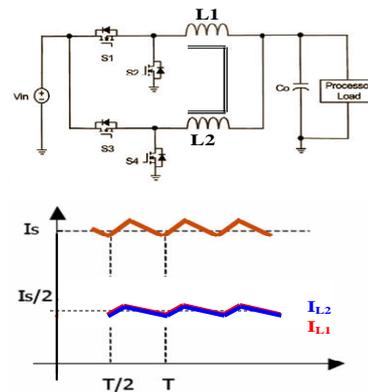


Figure 8 : Hacheur abaisseur bi-cellulaire à couplage magnétique, illustration de l'intérêt

### III.3. Structure ICT FLYBACK.

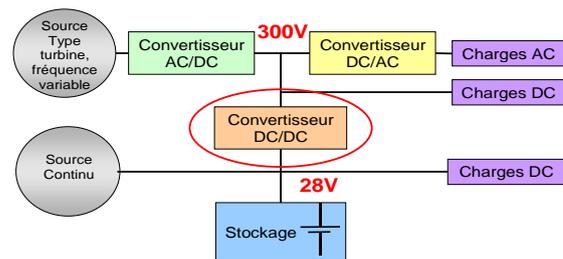


Figure 9 : Schéma de principe d'un réseau de bord futur

Notre équipe s'intéresse plus particulièrement à un convertisseur Continu-continu à fort gain en tension. Ces alimentations DC-DC à découpage sont souvent destinées aux applications présentant plusieurs sources d'énergie dont une basse tension (28V), éventuellement des batteries de stockage, le tout connecté sur un Bus continu 300V. Citons par exemple les applications embarquées pouvant inclure des systèmes photovoltaïques ou des piles à combustible. La Figure 9 présente une architecture générique de réseau de bord avec différentes charges et sources d'énergies électriques. Nous voyons apparaître un besoin de conversion continu/continu bidirectionnelle moyenne puissance avec un fort gain en

tension. Le convertisseur que nous étudions plus en détail est une structure de type flyback à coupleur magnétique [3]. Il utilise le principe de couplage présenté précédemment. Il est susceptible de répondre à des cahiers des charges concernant des convertisseurs intégrés dans des systèmes embarqués, Le démonstrateur visé est un Flyback 28V-300V 12kW-50kHz à 8 cellules utilisant un coupleur à transformateurs séparés. Le schéma de principe est donné Figure 10. Ce type de coupleur séparé couple cycliquement chaque voie avec les deux voies qui l'entourent. Nous utilisons des ICT (pour InterCell Transformers) qui sont en fait des transformateurs à deux primaires et deux secondaires.

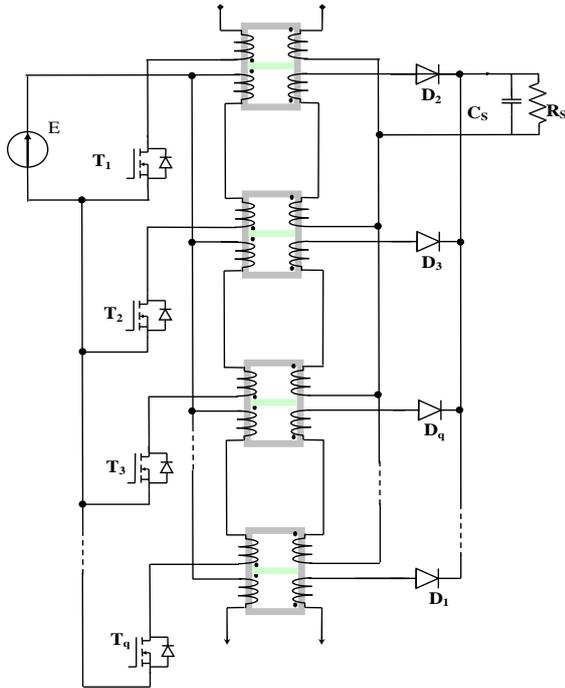


Figure 10 : Alimentation Flyback à q cellules

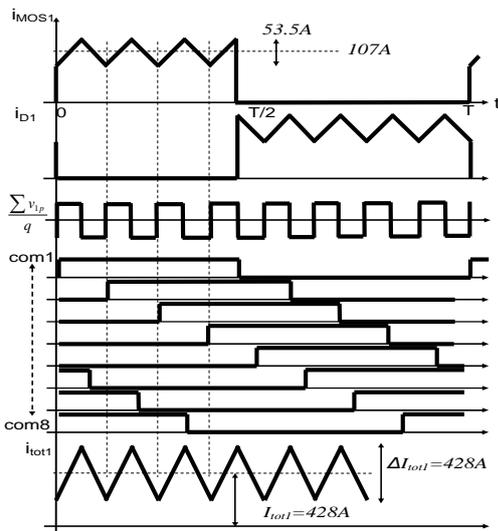


Figure 11 : Formes d'ondes de l'alimentation Flyback

Les formes d'ondes des signaux présents dans cette structure à 8 cellules sont présentées Figure 11. Nous voyons que les ordres de commandes sont décalés d'un huitième de période. La fréquence de l'ondulation du courant de sortie est 8 fois plus grande que la fréquence de découpage.

#### IV. CONCEPTION DE L'ICTFLYBACK, MULTIDOMAINES.

##### IV.1. Conception des composants magnétiques ICT.

Le dimensionnement de ce type de composant magnétique est un peu particulier puisqu'il s'agit d'un transformateur dont l'inductance de fuite doit être maîtrisée pour limiter les ondulations de courant [4] [5]. Une routine de dimensionnement a été développée et nous a permis de dimensionner un prototype d'ICT. Cette routine s'appuie sur une formulation analytique du produit des aires. Il s'agit d'une technique classique de dimensionnement de composants magnétiques utilisant le produit de l'aire de la section du circuit magnétique et de l'aire de la fenêtre de bobinage. La première étant liée au champ maximum admissible par le matériau magnétique et la seconde aux densités de courant admissibles par les conducteurs. Des grandeurs géométriques normalisées ont été utilisées afin de proposer des solutions homothétiques de noyaux existant dans le commerce.

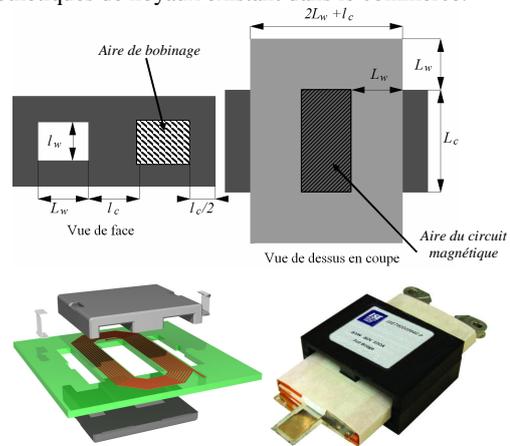


Figure 12 : Présentation des grandeurs pour le dimensionnement

Ces formulations nous permettront ensuite d'envisager une optimisation du volume de ces composants. La prise en compte des paramètres thermiques implique l'évaluation des pertes fer dans le circuit magnétique et des pertes cuivre dans les conducteurs en veillant à considérer les pertes supplémentaires liées aux effets de peau. En effet ces dernières sont déterminantes aux vues des fréquences de fonctionnement de la structure. L'effet de peau est la conséquence d'un phénomène électromagnétique qui tend, en haute fréquence, à répartir les courants en surface des conducteurs. La résistance électrique équivalente du conducteur paraît plus élevée puisque tout le conducteur n'est pas utilisé. La détermination des pertes fer nous permet d'exprimer l'ondulation d'induction  $\Delta B$  en fonction du produit des aires. De même, la détermination des pertes cuivre nous permet d'exprimer la densité de courant  $J$  en fonction du produit des aires.  $J$  et  $\Delta B$  sont les deux variables qui limitent et définissent le dimensionnement en intervenant directement sur les pertes. Les autres grandeurs sont imposées par le cahier de charges ou par des considérations technologiques. L'expression du produit des aires en vu d'une optimisation est alors :

$$A_w A_c = P \frac{\left[ K_{P1} \frac{K_{b1}}{J_{1RMS} (A_w A_c)} + K_{P2} \frac{K_{b2}}{J_{2RMS} (A_w A_c)} \right]}{\Delta B_m (A_w A_c) F}$$

- $K_{b1}$ ,  $K_{b2}$ , coefficient de bobinage, rapport entre fenêtre de bobinage et cuivre effectif
- $K_{P1}$ ,  $K_{P2}$ , coefficient dépendant du type d'alimentation et des formes d'ondes des grandeurs électriques.

- $P$ , puissance du transformateur
- $A_w$ , aire de bobinage,  $A_c$  aire du circuit magnétique

En complément du développement de méthodes de conception prenant en compte les différents aspects physiques (électromagnétique, thermique) nous avons validé les résultats théoriques à l'aide d'un banc de mesure calorimétrique associé à un générateur spécifique permettant de recréer la forme très particulière des courants que l'on retrouvera dans la structure complète. Le banc de test est présenté Figure 13.

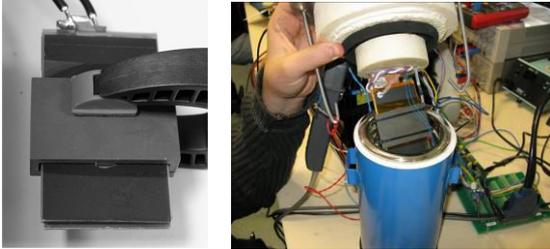


Figure 13 : Prototype d'ICT planar et banc de test calorimétrique

#### IV.2. Conception de circuits d'assistance à la commutation, simulation du circuit complet.

Le problème inhérent aux structures flyback est la surtension lors du blocage aux bornes de l'interrupteur due à l'inductance parasite de la maille de commutation. Cette inductance composée de l'inductance de fuite des ICT et de l'inductance du câblage est assez faible (70nH) mais les courants qui sont commutés engendrent une surtension conséquente. Plusieurs solutions permettent de minimiser les pertes au blocage. Nous avons exploré plusieurs pistes mais celle qui a retenu notre attention est celle des Circuits d'Aide à La Commutation (CALC). Nous avons réalisé un démonstrateur monocellulaire afin de tester la commutation, c'est-à-dire valider le choix de l'interrupteur MOSFET, du CALC et de ses constituants. Nous pouvons voir sur la Figure 14 que l'interrupteur coupe une centaine d'ampères avec une surtension d'une trentaine de volts à ses bornes. Sans CALC, la surtension ferait passer le MOSFET en avalanche, synonyme de pertes accrues et de risques de destruction. L'extension à la structure multicellulaire a été validée par simulation sur le logiciel PSIM.

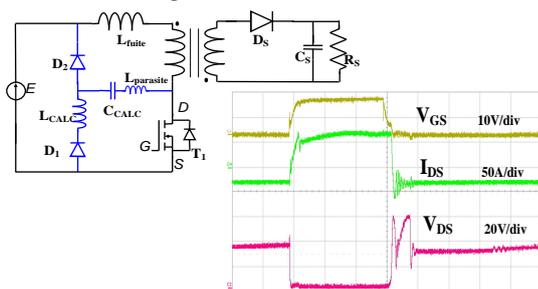


Figure 14 : test de la validité de la cellule de commutation

#### IV.3. Conception 3D de l'assemblage.

La conception assistée par ordinateur (Figure 15) a permis d'agencer au mieux les constituants de ce convertisseur. Cette démarche d'assemblage 3D est un passage obligé pour concevoir un agencement complexe de composants.

#### IV.4. Conception du circuit de refroidissement.

Une réflexion a dû être menée sur la réalisation du circuit de refroidissement du convertisseur. En effet le support central

sert aussi de plaque froide. En supposant un rendement de 90%, cela représente des pertes de 1200W qu'il faut évacuer.

Quelques relations de mécanique des fluides ont dû être exploitées afin de dessiner les canaux de refroidissement. Un prototype (Figure 16) a été réalisé et évalué.

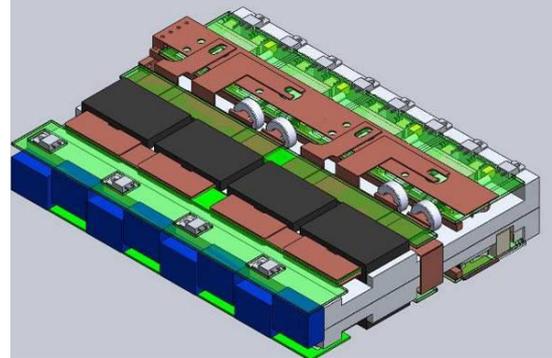


Figure 15 : Assemblage virtuel de l'ICT Flyback

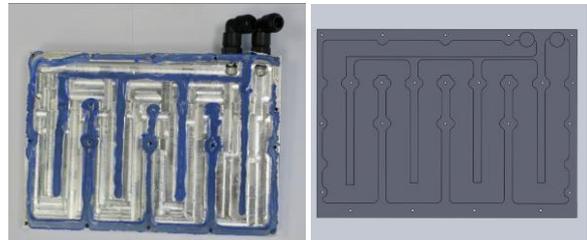


Figure 16 : Prototype du radiateur de l'ICT Flyback avec son joint et version CAO

## V. CONCLUSION.

Nous avons présenté sommairement le vaste domaine scientifique et technique qu'est l'électronique de puissance ainsi que les perspectives actuelles dans ce domaine. Après une présentation des structures multicellulaires parallèles, bien adaptées aux fortes intensités, nous avons abordé les travaux de conception d'un Flyback multicellulaires. Ce convertisseur devrait voir le jour très prochainement avec des densités de puissance de l'ordre de 4kW/litre. Ces performances sont difficilement comparables avec des convertisseurs existants puisque la conversion à fort gain en tension dans cette gamme de puissance est encore marginale. Mais la densité de puissance est déjà honorable devant des alimentations ayant un cahier des charges moins contraignant.

## VI. REFERENCES.

- [1] B Allard « L'électronique de puissance, Bases, perspectives, guide de lecture ». Technique de l'ingénieur d3060
- [2] www.abb.fr
- [3] F. Forest, T. Meynard, E. Labouré, V. Costan, J.-J. Huselstein : "A Multi-Cell Interleaved Flyback Using Intercell Transformers", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, N°5, pp. 1662-1671, september I. M.
- [4] B. Gélis, F. Forest, J.-J. Huselstein, T. Meynard, E. Labouré, P Cussac « Dimensionnement de transformateurs intercellulaires pour un convertisseur Flyback multicellulaire de forte puissance », Accepté pour parution dans la RIGE.
- [5] F. Forest, E. Labouré, B. Gélis, V Smet, T. Meynard, J.-J. Huselstein "Design of Intercell Transformers for High-Power Multicell Interleaved Flyback Converter" Accepté pour parution dans IEEE Transactions on Power Electronics

# Prédiction par la Méthode des Débits Commutés de la dégradation des paramètres électriques de composants électroniques en technologie bipolaires soumis à un environnement radiatif.

Yago GONZALEZ VELO<sup>1</sup> (Doctorant 2<sup>e</sup> année)

Nicolas J-H ROCHE (Doctorant 2<sup>e</sup> année), Stéphanie PEREZ (Doctorante 1<sup>e</sup> année)

Jérôme BOCH<sup>2</sup> (Directeur de thèse)

Institut d'Electronique du Sud  
Université Montpellier 2  
34095 MONTPELLIER cedex 05, France

<sup>1</sup>yago.gonzalez@ies.univ-montp2.fr

<sup>2</sup>jerome.boch@ies.unv-montp2.fr

**Résumé** – Les effets d'irradiations sur des circuits intégrés bipolaires polarisés pendant des expériences de commutation de débit de dose sont examinés. La dégradation des paramètres électriques est dépendante de la polarisation et les effets sont dépendants du débit de dose.

**Mots-clés** – électronique, fiabilité, dose, débit de dose.

## I. INTRODUCTION

Dans le cadre des applications spatiales de l'électronique, le challenge le plus important associé aux composants de technologie bipolaire est leur sensibilité accrue aux faibles débits de dose (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, ELDRS) [1]. Cette sensibilité a été observée sur de nombreux dispositifs et circuits intégrés (CI). Pour ces circuits, après une irradiation menée à faible débit de dose (Low Dose Rate, LDR) à un niveau de dose donné, la dégradation induite sur le circuit est plus importante que la dégradation observée sur un même composant irradié au même niveau de dose mais dans des conditions de fort débit de dose (High Dose Rate HDR). Les dégradations consistent en des variations des paramètres électriques des composants après avoir été soumis à un rayonnement.

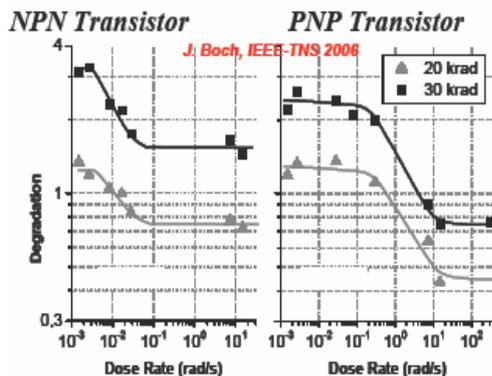


Figure 1.a : Allure des dégradations sur des transistors bipolaires NPN et PNP pour différentes doses totales en fonction du débit de dose

Cela a pour conséquence une modification du fonctionnement du composant, voir du système dans lequel ce composant est utilisé. Ceci est représenté sur la Figure 1.a. La caractéristique typique de la dégradation de composants bipolaires en fonction du débit de dose  $y$  est représentée. On observe sur cette courbe que l'on a bien une dégradation qui augmente avec la dose absorbée (30krad > 20krad).

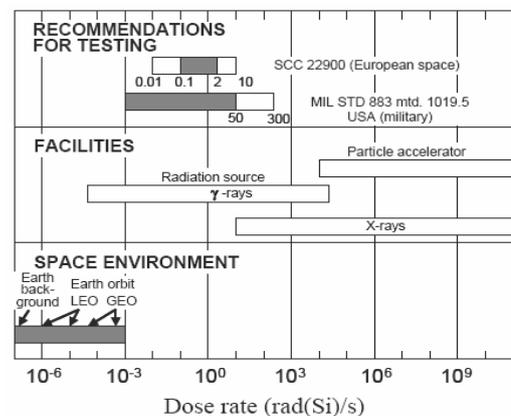


Figure 1.b : Représentation en fonction du débit de dose des recommandations de débit des normes, des moyens d'irradiations disponibles et des débits effectivement rencontrés sur des missions spatiales

On remarque aussi que pour une dose donnée, la dégradation augmente lorsque le débit utilisé diminue. Ceci révèle que la dégradation d'un composant bipolaire sera fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. Sur la figure 1.b sont représentées en fonction du débit de dose, les recommandations faites dans les normes de test de composants, les débits que l'on peut obtenir avec des moyens de test au niveau du sol et les débits rencontrés sur diverses orbites. On remarque que les débits que l'on utilise au niveau du sol sont ceux préconisés par les recommandations, mais que cela est fait pour des débits largement supérieurs à ceux rencontrés sur les différentes orbites.

Pour cette raison, il est difficile de prédire la dégradation d'un composant dans un environnement radiatif typique des applications spatiales car les débits rencontrés dans les applications spatiales sont de très faibles débits de dose, et cela implique de réaliser des tests excessivement longs au niveau du sol, solution qui n'est pas envisageable dans un contexte industriel. C'est la raison pour laquelle des techniques d'accélération des tests ont été proposées.

Dans le but de gagner du temps et de reproduire les mécanismes physiques mis en jeu lors d'une irradiation à un faible débit de dose, une approche a été proposée dans de précédents travaux [2] basée sur des expériences de commutations de débit de dose : La méthode des débits commutés [3]. Il a été proposé de réaliser en premier lieu des irradiations à fort débit de dose, pour 'gagner du temps', suivies d'irradiations à faible débit de dose. Cette méthode a été validée pour des paramètres statiques (tels les courant d'entrée ou les courant de polarisation) sur différents composants et circuits : transistors NPN et PNP, ainsi que sur divers circuits intégrés bipolaires comme des amplificateurs opérationnels, des comparateurs et autres... Cette vérification a été réalisée avec des composants dont tous les 'pins' (les broches) étaient connectés à la masse (GND) [3], [4].

Des travaux réalisés par des membres de la communauté des effets du rayonnement sur les composants électroniques ont montrés que les conditions de polarisation utilisées pendant les tests peuvent avoir un effet sur la réponse en dose et en débit de dose de structures de test [5-7] et de circuits [6], [8]. Bien qu'il soit généralement considéré que les CI irradiés 'toutes pattes à la masse' mènent à une dégradation maximale du composant, il a été montré que ce n'est pas toujours le cas [9-12]. La méthode des débits commutés semble être une technique prometteuse pour accélérer les tests des composants soumis à un faible débit de dose [2-4]. Dans cet 'abstract', des expériences de commutation sont réalisées sur des amplificateurs opérationnels LM124 pour étudier si il est possible de reproduire les mécanismes physiques mis en jeu lors d'irradiations à faible débits de dose sur des composants polarisés pendant l'irradiation. Dans la seconde partie le protocole expérimental ainsi que les différentes configurations sont décrit. Dans la troisième partie, des résultats d'expériences de commutation de débit sont présentés. Par la suite, une discussion est réalisée sur la possibilité d'appliquer la méthode des débits commutés pour prédire la dégradation faible débit de dose.

## II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Les composants utilisés dans ce travail sont des LM124 fabriqués par National Semiconductor ayant tous le même date code : LM124J EH330AB et se trouvant dans des boîtiers céramiques. Le date code est le code de référence inscrit sur le boîtier, ce code permet d'identifier le lot, sa chaîne de production et donc assure la traçabilité du produit. Quatre amplificateurs opérationnels (OpAmps) sont disponibles dans chaque boîtier et sont systématiquement testés.

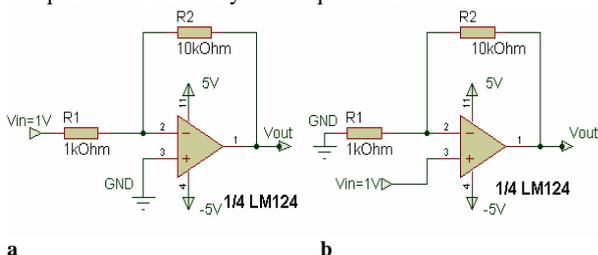
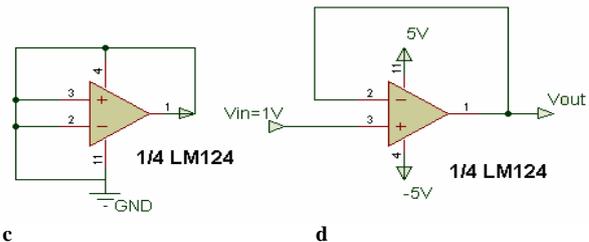


Figure 2 : Polarisations étudiées pour le LM124

- (a) inverter configuration with gain equals to 10, with  $R1 = 1k\Omega$  and  $R2 = 10k\Omega$  (IWG, supply voltage is  $\pm 5V$ ).
- (b) non-inverter configuration with gain equals to 11, with  $R1 = 1k\Omega$  and  $R2 = 10k\Omega$  (NIWG, supply voltage is  $\pm 5V$ ).

Les irradiations ont été réalisées à température ambiante à l'aide d'une source de rayons gamma (Co-60) disponible à l'Université Montpellier 2 (modèle Shepherd 484) pour le faible débit de dose (8mrad/s) et un générateur de rayons X (10keV, modèle ARACOR 4100) pour les irradiations à fort débit de dose (115 rad/s) au sein de la société TRAD (Test et Radiations) basée à Toulouse. Le rad est l'unité que nous utilisons pour quantifier le dépôt d'énergie dans la matière. L'unité SI est le Gray =  $1 J.kg^{-1}$ , et 1 Gray = 100 rad.



- (c) all pins grounded (GND).
- (d) follower configuration with an input voltage equals to 1V (VF, supply voltage is  $\pm 5V$ ).

Quatre configurations ont été étudiées pour le LM124, présentées dans la Figure 2 : (a) inverseur avec un gain de 10 et une tension d'entrée de 1V (IWG), (b) non-inverseur avec un gain de 11 et une tension d'entrée de 1V (NIWG), (c) LM124 toutes pattes à la masse (GND), (d) Suiveur avec une tension d'entrée de 1V (VF). Plusieurs paramètres statiques comme le courant d'entrée et le courant d'alimentation sont extraits à l'aide d'un analyseur de paramètres semiconducteur (HP4145B) contrôlés par un PC. Les fonctions de transfert des composants testés comme des comparateurs sont extraites ainsi que des paramètres dynamiques comme le slew rate (SR) ou le gain en boucle ouverte à une fréquence de 1kHz (OLG) (le slew rate est la pente maximale obtenue lors d'un passage de niveau bas à niveau haut en sortie du composant  $SR = dV/dt$ ). Sur toutes les courbes, les points représentés sont la valeur moyenne des paramètres extraits pour un lot de 3 composants, donc chaque point est la valeur moyenne des résultats obtenus pour douze OpAmps. Les expériences de commutations sont réalisées avec des pas de dose de 10krad. Une fois tous les pas de dose à fort débit de dose (HDR) réalisés, tous les LM124 sont basculés simultanément à une irradiation en LDR. Par conséquent, pour une polarisation donnée, tous les pas de dose à faible débit de dose sont identiques. De plus afin d'évaluer la prédiction donnée par les expériences de commutation, un lot de composants est irradié à faible débit de dose uniquement (8mrad/s) et ce pour chacune des quatre polarisations décrites à la Figure 2.

## III. EXPERIENCES DE COMMUTATION SUR CIRCUITS BIPOLAIRES POLARISES.

Une nouvelle approche pour le test de composants a été proposée par Boch [3] pour prédire la dégradation de composants bipolaires soumis à un faible débit de dose. Des travaux précédents ont montré que cette approche peut être utilisée pour prédire la dégradation des transistors bipolaires NPN et PNP ainsi que pour des circuits intégrés bipolaires irradiés toutes pattes à la masse [2-4].

Il a été montré que les conditions de polarisation peuvent jouer un rôle significatif pendant des irradiations menées à

HDR ou LDR. Par conséquent, dans cette partie nous tentons de découvrir si les expériences de commutations sont toujours valables pour des circuits polarisés, et donc si il est possible de reproduire les mécanismes physiques mis en jeu lors d'irradiations à faible débit de dose dans le cas ou ces circuits sont polarisés. Les expériences de commutations sont réalisées pour quatre polarisations (voir Figure 1). Des paramètres statiques et dynamiques extraits sont représentés sur les Figures 3 pour la configuration GND et Figure 4 pour la configuration VF. Pour chacune de ces deux configurations, deux paramètres sont représentés : (a) le courant d'entrée de l'entrée non-inverseuse de l'amplificateur, (b) le Slew Rate. Les débits de dose utilisés sont 115rad/s avec des Rayons X et 8mrad/sec avec des Rayons Gammas. Les composants sont irradiés à HDR jusqu'à ce qu'ils atteignent la dose de commutation, puis ils sont commutés à LDR. Sur la figure 3, il est montré que tout comme il a déjà été obtenu dans le cas des paramètres statiques de composants irradiés toutes pattes à la masse [2-3], l'allure de la dégradation des paramètres dynamiques après commutation du débit de dose est radicalement différente de celle qui se produit à HDR. La figure 3.b représente le comportement du slew rate, mais des résultats équivalents sont obtenus pour le gain en boucle ouverte.

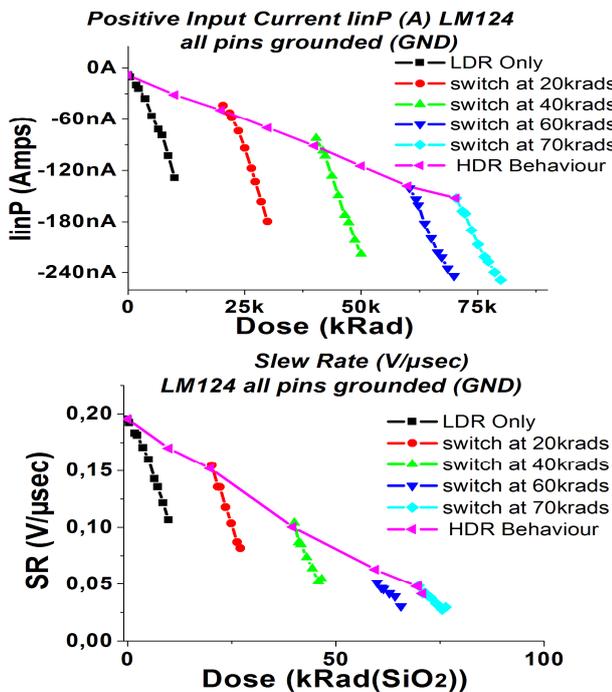


Figure 3.a),b) : Résultats d'Expérience de Commutation réalisée sur des LM124 en GND. Les paramètres représentés sont (a) le courant d'entrée, (b) le Slew Rate. Les débits utilisés sont 115rad/s (X-Rays) and 8 mrad/s (Gamma Rays). Dans tous les cas, une dégradation plus élevée est observée lorsque le circuit est irradié à faible débit de dose

On s'intéresse à présent à la configuration en suiveur dont les dégradations des courants d'entrée et du slew rate sont représentées sur la Figure 4. On représente pour la première fois la dégradation de paramètres statiques et dynamiques pour des composants polarisés étudiés à l'aide de commutations de débit de dose.

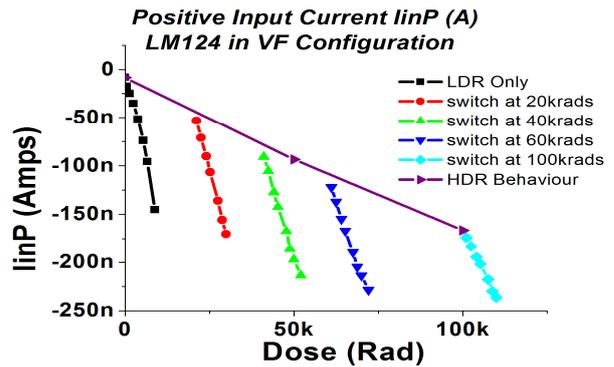


Figure 4.a),b) . Résultats d'Expérience de Commutation réalisée sur des LM124 en VF. Les paramètres représentés sont (a) le courant d'entrée, (b) le Slew Rate. Les débits utilisés sont 115rad/s (X-Rays) and 8 mrad/s (Gamma Rays). Dans tous les cas, une dégradation plus élevée est observée lorsque le circuit est irradié à faible débit de dose

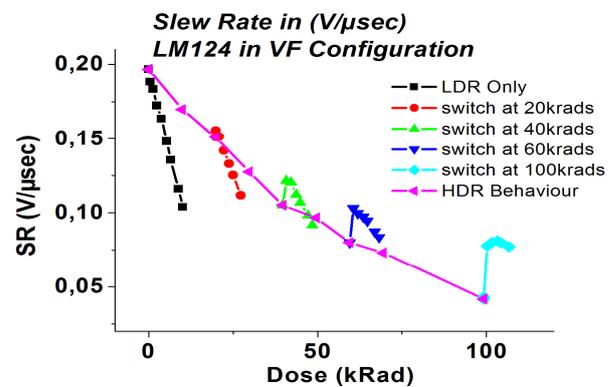


Figure 4.b) : Slew Rate de circuits LM124 en VF

Il est montré que dans le cas de composants polarisés, les paramètres statiques obtenus après commutation de débit de dose suivent la dégradation de composants irradiés uniquement à faible débit de dose.

Cependant, pour le slew rate (Figure 4.b), la dégradation se 'récupère' légèrement pendant le premier pas d'irradiation à faible débit de dose avant de suivre le comportement obtenu pour les composants irradiés en LDR. L'amplitude de cette 'récupération' augmente avec la dose totale à laquelle la commutation est réalisée. Cette récupération peut être provoquée par relaxation thermique associée au fait qu'un équilibre doit être atteint après commutation du HDR (grand nombre de charges créées) au LDR (petit nombre de charges créées) [13]. Cette récupération se produit pour les paramètres dynamiques ainsi que pour des paramètres statiques. De plus pour obtenir une explication plus détaillée de cette récupération, des 'effets circuits' peuvent sans doute être pris en compte, car il a été montré que les dégradations de paramètres peuvent changer en fonction des structures de circuits mises en jeu [8].

Après commutation du HDR au LDR, le comportement des composants en VF change radicalement. On retrouve bien, après commutation du débit de dose, les pentes obtenues dans le cas d'une unique irradiation à LDR. Les expériences de commutation semblent être valides dans le cas de composants en VF, et nous montrons dans la partie suivante que la courbe LDR peut alors être prédite. Dans le cas de composants polarisés en IWG et NIWG, les résultats sont similaires.

#### IV. DISCUSSION

Le but des expériences de commutation est de prédire la dégradation en LDR de circuits électroniques. Les expériences présentées dans ce papier ont été réalisées dans le but d'étudier si on observe bien un comportement LDR après commutation de débit de dose de HDR à LDR.

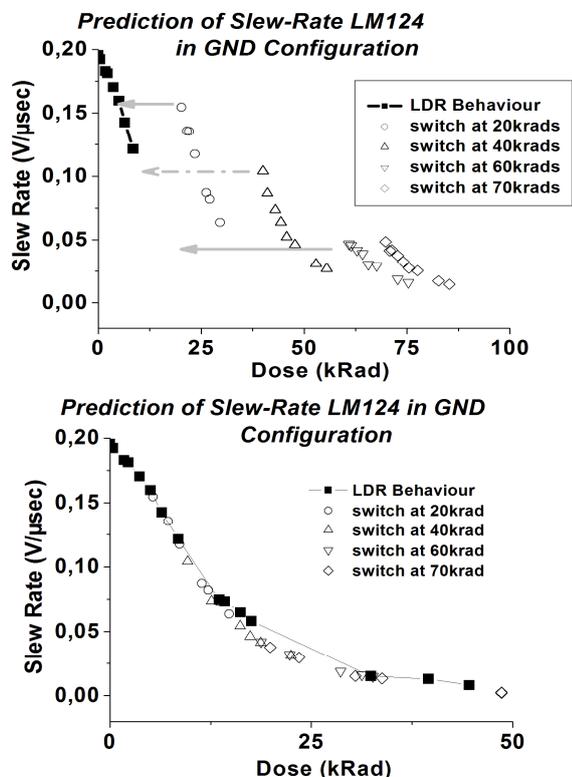


Figure 5. a),b) : Prédiction réalisée à l'aide des résultats des expériences de commutation pour des LM124 en GND. Les paramètres sont a) : le courant d'entrée et b) : le slew-rate. Les débits de dose utilisés sont 115rad/s et 8mrad/s

Il est alors possible d'obtenir une prédiction de la dégradation en LDR par translation des données obtenues grâce aux expériences de commutation [2-3]. En appliquant cette méthode à l'expérience de commutation on obtient les résultats présentés Figure 5 et Figure 6. Une translation horizontale est réalisée sur les données des composants commutés pour compléter la courbe LDR. Sur la Figure 5 le paramètre représenté est le slew rate de composants GND. Comme il a déjà été observé pour les composants GND, la prédiction est en bon accord avec les résultats expérimentaux obtenus à LDR mais ici, cela est montré pour la première fois tant sur des paramètres statiques que sur des paramètres dynamiques. Les paramètres représentés sont le courant d'entrée et le slew rate.

Des résultats similaires sont obtenus pour d'autres paramètres électriques et pour les autres configurations, IWG et NIWG. Dans la figure 6, nous nous intéressons au slew rate de circuits polarisés en VF. Pour prédire le comportement à LDR, la méthode de commutation des débits de dose est utilisée. Les résultats prédits et expérimentaux sont en bon accord.

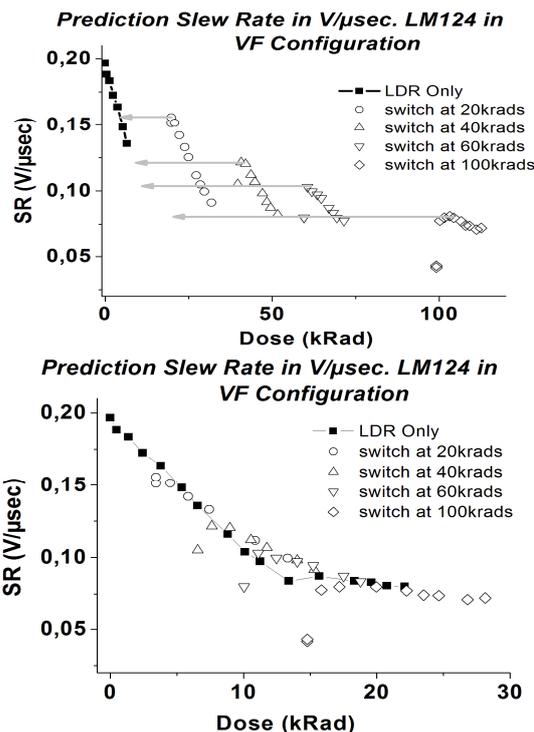


Figure 6.a),b) : Prédiction réalisée à l'aide des résultats des expériences de commutation pour des LM124 en VF. Les paramètres sont a) : le courant d'entrée et b) : le slew-rate. Les débits de dose utilisés sont 115rad/s et 8mrad/s

Les données pour lesquels la 'récupération' a lieu entre le fort débit de dose et le faible débit de dose ne sont pas pris en compte pour effectuer la prédiction. Cette récupération semble être un artéfact qui ne se produit pas pendant une irradiation à faible débit de dose. Pour toutes les configurations on obtient des résultats similaires.

#### V. CONCLUSION.

Dans ce papier, il est montré que les expériences de commutations peuvent être utilisées pour prédire les dégradations LDR des paramètres statiques et dynamiques de composants irradiés en GND. Ces expériences ont aussi été réalisées sur des composants polarisés. Pour les paramètres statiques, la méthode peut être appliquée avec une bonne précision entre résultats expérimentaux et prédiction. En ce qui concerne certains paramètres, tant dynamiques que statiques, un effet que l'on pense relié à une relaxation thermique existe. Cependant, la prédiction peut être réalisée avec une bonne précision.

#### VI. REFERENCES.

- [1] E. W Enlow, R. L. Pease, W. E. Combs, R. D. Schrimpf, and R. N. Nowlin, "Response of Advanced Bipolar Processes to Ionizing Radiation", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 38, pp. 1342-1351, 1991.
- [2] J. Boch, F. Saigné, R.D. Schrimpf, D. M. Fleetwood, S. Ducret, L. Dusseau, J.P. David, J. Fesquet, J. Gasiot, R. Ecoffet "Effect of Switching from High to Low Dose Rate on Linear Bipolar Technology Radiation Response", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, October 2004.
- [3] J. Boch, F. Saigné, R. D. Schrimpf, J-R. Vaillé, L. Dusseau S. Ducret, M. Bernard, E. Lorfevre, C. Chatry "Estimation of Low Dose Rate Degradation on Bipolar Linear Integrated Circuits Using Switching

- Experiments”, accepted for publication in *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 52, pp. 2616-2621, Dec. 2005.
- [4] R.L. Pease, R. D. Schrimpf, D. M. Fleetwood “ELDRS in Bipolar Linear Circuits: a Review” invited paper, Radecs08, Jyväskylä, Finland, 2008.
- [5] V. S. Pershenkov, V. B. Maslov, S. V. Cherepko, I. N. Shvetsov-Shilovsky, V. V. Belyakov, A. V. Sogoyan, V. I. Rusanovsky, V. N. Ulimov, V. V. Emelianov and V. S. Nasibullin, “The Effect of Emitter Junction Bias on the Low Dose-Rate Radiation Response of Bipolar Devices”, *IEEE Trans.Nucl. Sci.*, vol. 44, pp. 1840-1848, 1997.
- [6] Minson, E.; Sanchez, I.; Barnaby, H.J.; Pease, R.L.; Platteter, D.G.; Dunham, G.; “Assessment of gated sweep technique for total dose and dose rate analysis in bipolar oxides”, *IEEE Trans.Nucl. Sci.*, vol 51, Page(s):3723 – 3729, Dec. 2004.
- [7] Pease R.L., Platteter, G.W., Dunham, G.W., Seiler J.E., Barnaby, H.J., Schrimpf, R.D., Shaneyfelt, M.R., Maher, M.C., Nowlin, R.N., “Characterization of Enhanced Low Dose Rate Sensitivity (ELDRS) Effects Using Gated Lateral PNP Transistor Structures”, *IEEE Trans.Nucl. Sci.*, vol 51, Page(s):3773 – 3780, Dec. 2004.
- [8] Dusseau, L.; Bernard, M.; Boch, J.; Gonzalez Velo, Y.; Roche, N.; Lorfèvre, E.; Bezerra, F.; Calvel, P.; Marec, R.; Saigne, F. “Review and Analysis of the Radiation-Induced Degradation Observed for the Input Bias Current of Linear Integrated Circuits”, *IEEE Trans.Nucl. Sci.*, Volume 55, Page(s):3174 – 3181, Dec. 2008.
- [9] N.W. van Vonno, J.S. Gill, “Low Dose Rate Testing of the Intersil IS1009RH Hardened Voltage reference and ISL72991RH Negative Low Dropout Regulator”, *IEEE Radiation Effects Data Workshop*, vol 0, pp. 101-106, 2007
- [10] C.C. Yui, S.S. McClure, B.G. Rax, J.M. Lehman, T.D. Minto, M.D. Wiedeman, “Total Dose Bias Dependency and ELDRS Effects in Bipolar Linear Devices”, *IEEE Radiation Effects Data Workshop*, pp. 131-137, 2002
- [11] McClure, S.S.; Gorelick, J.L.; Yui, C.C.; Rax, B.G.; Wiedeman, M.D.; “Continuing evaluation of bipolar linear devices for total dose dependency and ELDRS effects”, *IEEE Radiation Effects Data Workshop*, Page(s):1 – 5, July 2003
- [12] Kruckmeyer, K.; McGee, L.; Brown, B.; Hughart, D.; “Low Dose Rate Test Results of National Semiconductor’s ELDRS-free Bipolar Amplifier LM124 and Comparators LM139 and LM193”, *IEEE Radiation Effects Data Workshop* Page(s):110 – 117, July 2008.
- [13] Boch, J.; Saigné, F.; Schrimpf, R. D.; Vaillé, J.-R.; Dusseau, L.; Lorfèvre, E.; “Physical Model for the Low-Dose-Rate Effect in Bipolar Devices”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Volume 53, Page(s):3655 – 3660, Dec. 2006.

# Mise au point d'un système innovant de spectroscopie d'absorption multigaz par diodes lasers accordables dans le moyen infrarouge

Mohammad JAHJAH<sup>1</sup> (Doctorant 1<sup>ère</sup> année)  
Aurore VICET<sup>2</sup>, Yves ROUILLARD<sup>3</sup> (Directeurs de thèse)

Institut d'Electronique du Sud  
Université Montpellier II  
34095 MONTPELLIER cedex 5, France

<sup>1</sup>jahjah\_mohammad@hotmail.com  
<sup>2</sup>a.vicet@univ-montp2.fr, <sup>3</sup>yves.rouillard@univ-montp2.fr

**Résumé-** Une nouvelle approche pour détecter un faible signal photoacoustique dans un milieu gazeux est décrite. Au lieu d'utiliser une cavité acoustique résonante remplie de gaz, on détecte la radiation acoustique dans un élément de cristal ayant un grand facteur de qualité. Les développements et les applications de cette technique sont discutés. **Mots clés-** Spectroscopie d'absorption infrarouge ; QEPAS ; Quartz Tuning Fork ; Diodes lasers accordables ; Détection de gaz.

En 2002, une approche innovante a été introduite pour la détection photoacoustique (PA) des traces de gaz, en utilisant un diapason à quartz (ou QTF : Quartz Tuning Fork) comme un transducteur acoustique résonnant.

Les avantages de la technique Quartz-Enhanced PhotoAcoustic Spectroscopy (ou QEPAS) comparée à la spectroscopie PA conventionnelle résonnante sont la conception simple et bon marché du module de détection d'absorption, l'applicabilité sur une large bande de pressions, y compris la pression atmosphérique, et la compacité du système [1].

## I. INTRODUCTION

La mesure des polluants fait l'objet depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle d'une attention toute particulière pour la préservation de la planète. Les normes relatives aux rejets dans l'air sont de plus en plus restrictives et nécessitent des moyens de mesure toujours plus sensibles et sélectifs.

Dans le moyen infrarouge (on se placera ici dans une fenêtre 2-5  $\mu\text{m}$ ), plusieurs espèces gazeuses présentent un intérêt soit parce que ce sont des polluants dont on cherche à minimiser l'émission dans l'air ambiant en extérieur ou dans les locaux (HCl, NO<sub>2</sub>, CH<sub>2</sub>O...), soit parce qu'elles présentent un intérêt dans la maîtrise de l'énergie (pouvoir calorifique du gaz naturel : mesure des hydrocarbures en général et de la teneur en méthane en particulier).

La spectroscopie d'absorption par diodes lasers accordables est apparue il y a une trentaine d'années. Le principe de base est la mesure de l'absorption d'une radiation émise par un laser à travers un mélange gazeux. De cette mesure, on peut déduire la concentration des espèces présentes. Si au départ les mesures étaient faites optiquement en utilisant des photodiodes, d'autres techniques sont apparues notamment des techniques photoacoustiques qui s'affranchissent des mesures optiques.

## II. LE QUARTZ COMME DETECTEUR

La technique QEPAS est une approche alternative pour détecter une excitation PA. L'idée de base de la QEPAS, est d'accumuler l'énergie acoustique dans le QTF et non pas dans une cellule remplie de gaz. Une telle approche supprime les limitations imposées dans la cellule de gaz par les conditions de résonance acoustique. Le transducteur peut être positionné dans la zone acoustique du faisceau d'excitation optique, l'enceinte de gaz est alors optionnelle et sert seulement à séparer l'échantillon de gaz de l'environnement et à contrôler sa pression [2].

Le candidat naturel qui va jouer le rôle du transducteur résonnant dans la technique QEPAS est le cristal de quartz, car c'est un matériau à effet piézoélectrique. De nombreux cristaux de quartz sont disponibles dans le commerce pour des applications en horlogerie notamment. Cependant, la plupart d'eux, possèdent des fréquences de résonance de l'ordre du Mégahertz, et donc ne sont pas appropriés pour la spectroscopie photoacoustique en phase gazeuse, car le transfert d'énergie dans les gaz se produit pendant une longue durée: le signal PAS décroît à des hautes fréquences. Ainsi, il existe des éléments de quartz à basses fréquences, ce sont les QTFs et qui sont utilisés dans les montres électroniques comme des résonateurs standards.

Seule la vibration symétrique du QTF (i.e les 2 fourches du QTF se plient dans des directions opposées) est active piézoélectriquement. Le faisceau d'excitation doit passer à travers l'espace entre les fourches du QTF pour générer une excitation efficace de cette vibration. Acoustiquement, le QTF est un quadripôle, ce qui lui confère une excellente immunité au bruit environnemental [3].

L'objectif est de réaliser une analyse de gaz avec une bonne sensibilité et une bonne sélectivité, il faut donc choisir une diode laser qui possède des propriétés particulières. On travaillera avec des lasers à puits quantiques InGaAs/Sb/AlGaAsSb/GaSb fabriqués par épitaxie par jets moléculaires à l'IES. Ces composants seront caractérisés en vue de l'application particulière visée. Tout d'abord il faut qu'elle fonctionne à température ambiante et qu'elle fournisse une puissance optique de quelques milliwatts. Ensuite, il faut qu'elle n'émette de la lumière qu'à une seule longueur d'onde, donc elle doit être monofréquence. La diode laser doit avoir une accordabilité suffisante afin que l'on puisse par la suite varier sa longueur d'onde émise, en fonction du courant ou de la température. Cette étape permet de caler exactement la radiation émise sur une raie d'absorption du gaz. En réalité, on peut travailler avec une diode multifréquences, mais la puissance émise sera répartie sur toutes les radiations émises, ainsi la puissance qui sera absorbée par le gaz devient faible, et peut être insuffisante pour donner lieu à un signal détectable.

La plupart des travaux sur la QEPAS rapportées jusqu'à maintenant, ont été réalisées en utilisant une approche de modulation de longueur d'onde et une détection 2f, qui supprime le bruit provenant des amortisseurs spectralement non sélectifs (électrodes du QTF, murs du résonateur, éléments de la cellule de gaz). Le faisceau laser est focalisé entre les fourches du QTF, et sa longueur d'onde est modulée à  $(f_m = f_0 / 2)$  (où  $f_0$  est la fréquence de résonance du QTF). Une détection synchrone est utilisée pour démoduler la réponse du QTF à  $f_0$ .

### III. PRINCIPE DE BASE DE LA TECHNIQUE QEPAS ET BANC OPTIQUE MIS EN PLACE

La méthode consiste à exciter un gaz piégé dans une cellule où est placé le diapason à quartz, avec une lumière émise par une diode laser IR. Si le gaz absorbe à la longueur d'onde émise par le laser, on génère un échauffement. Le gaz s'échauffe en absorbant la lumière parce que l'énergie absorbée à partir du rayonnement émis par la diode laser est convertie en énergie interne. La pression du gaz augmente et comme il est modulé, il engendre une onde sonore. Cette onde à son tour, excite les deux fourches du QTF, et ces dernières se mettent en vibration. Comme le QTF est un matériau à effet piézoélectrique, sous l'effet d'une action mécanique, il se polarise électriquement et engendre un courant électrique. Ce courant sera amplifié en utilisant un amplificateur à

transimpédance et ensuite mesuré. Sa mesure permet de mettre en évidence l'absorption du gaz et la nature du gaz en analysant les pics d'absorption.

La figure 1 représente le banc optique mis en place.

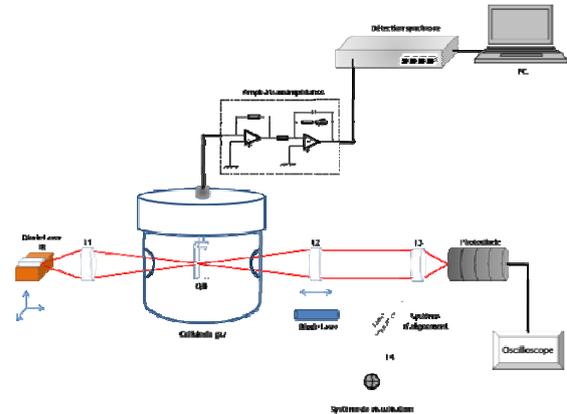


Figure 1 : Banc optique

Le banc optique est constitué d'une diode laser accordable qui émet de la lumière dans l'infrarouge à 2.3  $\mu\text{m}$  ; de 4 lentilles convergentes (L1, L2, L3, L4) qui sont utilisées soit pour focaliser soit pour collimater le faisceau émis par la diode laser ; d'une cellule qui sera remplie de gaz où nous avons placé aussi le QTF ; d'un système d'alignement qui contient une diode laser qui émet dans le rouge et une lame séparatrice transparente ; d'un système de visualisation pour s'assurer que le faisceau émis par la diode laser passe entre les fourches du QTF ; d'une photodiode pour s'assurer l'existence de gaz dans la cellule pendant la phase de réglage (en se basant sur les raies d'absorption). Ensuite, les bornes du QTF sont reliées à l'amplificateur transimpédance pour amplifier le courant électrique généré par le diapason. Nous avons aussi utilisé l'oscillateur interne de la détection synchrone pour moduler la fréquence d'émission de la diode laser à la moitié de celle du QTF et un pc pour faire l'acquisition des données.

La figure 2 montre le banc optique de la technique QEPAS mais en utilisant cette fois-ci la diode laser rouge pour effectuer l'alignement.

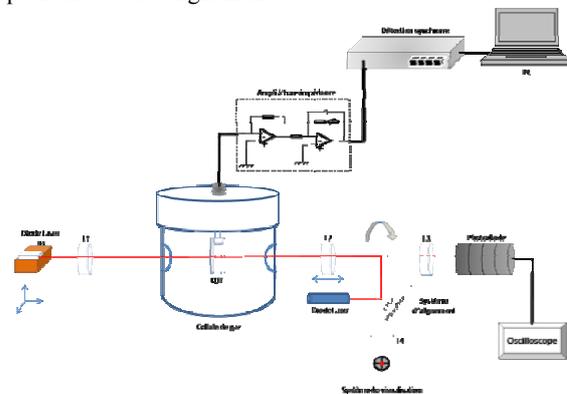


Figure 2 : Banc optique en phase d'alignement

#### IV. AMELIORATIONS A APPORTER

Un résonateur à demi-onde acoustique peut être ajouté, pour augmenter la longueur d'interaction, entre l'onde sonore générée par l'absorption et les fourches du TF. Il consiste en deux tubes rigides, possédant chacun, une longueur et un diamètre intérieur bien définis, alignés perpendiculairement au plan du TF. La distance entre les extrémités libres des tubes, est égale à la moitié de la longueur d'onde du son dans l'air (32.75 KHz), pour satisfaire la condition de résonance. Un micro-résonateur est utilisé pour améliorer la sensibilité de la QEPAS (~ 8 à 10 fois sans tenir compte de la grande distance entre les tubes, où le QTF était localisé). La présence du résonateur ne change pas sensiblement le Q-factor du QTF mesuré. La figure 3 nous montre le résonateur à demi-onde acoustique placé perpendiculairement au plan du TF [1-3].

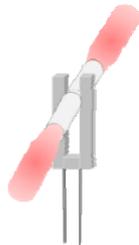


Figure 3 : QTF + résonateur à demi-onde acoustique

La sensibilité de la QEPAS à la concentration de traces de gaz dans un échantillon spécifique, est fonction de la pression de l'échantillon. Cette dépendance est déterminée par les caractéristiques suivantes :

- Le Q-factor du TF diminue à des hautes pressions. Le RSB (Rapport Signal sur Bruit) est proportionnel à Q, pour une  $f_0$  fixée et une force mécanique appliquée.
- Quand l'élargissement collisionnel de la raie d'absorption est inférieure à l'élargissement Doppler, le pic d'absorption optique varie avec la pression, surtout pour des basses pressions (<30 Torr). D'un autre côté, le fusionnement des raies d'absorption étroitement alignées, devrait être pris en considération à des pressions plus élevées.
- Le transfert d'énergie des molécules excitées vibrationnellement est plus rapide à haute pression, générant une excitation acoustique plus efficace.
- Le facteur d'amélioration du résonateur acoustique change en fonction de la pression.

L'amplitude de modulation de la longueur d'onde du laser ( $\Delta\lambda$ ), doit être optimisée à chaque pression. La configuration optique du détecteur de la QEPAS doit être conçue, afin d'éviter l'illumination du QTF ; en particulier au niveau de la surface du micro-résonateur acoustique, en évitant toute lumière diffusée et les réflexions secondaires des éléments optiques [2-5].

#### V. CONCLUSION

Un premier travail de caractérisation d'une diode laser émettant à 2.3  $\mu\text{m}$  a été réalisé. Puis on a caractérisé la réponse fréquentielle du QTF. Le banc optique a ensuite

été mis en place. Les gaz visés dans cette étude sont le méthane, l'acide fluorhydrique, l'éthylène et le monoxyde de carbone. L'optimisation de la mesure passe par de nombreux paramètres et sera réalisée dans les mois à venir.

#### REMERCIEMENTS

Cette thèse est co-financée par la région Languedoc-Roussillon et l'ADEME.

#### VI. REFERENCES

- [1] A. A. Kosterev, F. K. Tittel, D. V. Serebryakov, L. Malinovsky, and I. V. Morozov: "Applications of quartz tuning forks in spectroscopic gas sensing", Rev. of Scien. Instr., 2005, **76**, 043105.
- [2] A. A. Kosterev, Yu. A. Bakhrkin, R. F. Curl, and F. K. Tittel: "Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy", Opt. Lett., Vol. **27**, No. **21**, Nov 2002.
- [3] J.-M. Friedt and É. Carry: "Introduction to the quartz tuning fork", Am. J. Phys., Vol. **75**, No. **5**, May 2007.
- [4] D. Weidmann, A. A. Kosterev, F. K. Tittel, N. Ryan, and D. McDonald: "Application of a widely electrically tunable diode laser to chemical gas sensing with quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy", Opt. Lett., Vol. **29**, No. **16**, Aug 2004.
- [5] R. Lewicki, G. Wysocki, A. A. Kosterev, and F. K. Tittel: "Carbon dioxide and ammonia detection using 2  $\mu\text{m}$  diode laser based quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy", Appl. Phys. B, 2006, 00340-006-2474-9.

DOCTISS 2009

# Une approche expérimentale multi-physiques en soudage à l'arc sous flux gazeux

Julien CHAPUIS <sup>1</sup> (Doctorant 2ème année)  
Gilles FRAS <sup>2</sup> (Directeur de thèse)

Laboratoire de mécanique et génie civil  
UMR5508-UM2-CNRS  
34095 Montpellier Cedex 5, France

<sup>1</sup>chapolis@lmgc.univ-montp2.fr  
<sup>2</sup>fras@iut-nimes.fr

*Résumé*— Les enjeux économiques et concurrentiels dans une production mondialisée poussent les fabricants vers la recherche permanente de gains de productivité et de qualité.

Les méthodes d'optimisation des assemblages soudés passent par l'utilisation de la simulation numérique et l'expérimentation. Les approches numériques relatives au soudage sont consacrées à l'étude d'une problématique bien spécifique comme le procédé, les distorsions etc... Afin d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques et de leurs interactions, nous proposons une approche expérimentale intégrant la prise en compte des couplages multi-physiques, à partir de l'acquisition synchronisée des différentes grandeurs.

*Mots-clés*— soudage, expérimentation, mesures multi-physiques, simulation numérique

## I. INTRODUCTION

Le soudage est une technique pluridisciplinaire faisant intervenir un nombre important de phénomènes complexes [1, 2]. En particulier, l'influence de cycles thermiques extrêmement rapides à hautes températures sur les propriétés physiques, métallurgiques et mécaniques des matériaux soudés exigent toujours plus de connaissances. L'application de ces recherches dans un contexte industriel a pour finalités d'explorer les voies d'optimisation, telles que celles de la productivité, de la qualité des soudures, de l'amélioration de l'environnement de travail, etc... Une voie d'optimisation qui nous intéresse plus particulièrement est celle de la productivité, avec la mise en oeuvre du Soudage Grande Vitesse avec les procédés à arc sous flux gazeux. Dans ce cadre, il est essentiel de comprendre et d'expliquer les interactions multi-physiques en soudage à l'arc, avant de pouvoir apporter une solution d'optimisation applicable industriellement.

La plupart des articles consacrés à l'étude du soudage à l'arc par une approche expérimentale sont consacrés à l'étude d'une problématique bien spécifique telle que la détermination de la géométrie du bain de fusion par acquisition vidéo [5], l'étude des transferts de matière électrode-pièce [6]... Le développement de ces approches expérimentales en intégrant la prise en compte des couplages semble particulièrement intéressant, aussi bien pour améliorer la compréhension des phénomènes physiques mis en oeuvre que pour alimenter et valider les modèles numériques développés depuis quelques années [7]. Dans ce contexte, il semble utile de développer un outil d'acquisition et de traitement de données multi-physiques et multi-procédés. La finalité de ce travail étant d'être capable de mesurer différents types de données (thermique, mécanique, optique...) dans un environnement fortement perturbateur, et de les faire dialoguer de façon cohérente afin de mieux comprendre « le soudage à arc sous flux gazeux » pour les procédés GTAW et GMAW.

Ce document présente tout d'abord le soudage et son contexte. Dans la section suivante, la méthode expérimentale multi-physiques avec l'outil d'expérimentation (dispositif expérimental, contraintes environnementales) et la Bibliothèque d'Analyse de Mesures Expérimentales (BAME). Puis, l'application « procédé-humping » est présentée, avec un objectif, à savoir l'illustration de la méthode de mesures pour l'identification des mécanismes physiques responsables du « humping » en soudage.

## II. LE SOUDAGE

Les procédés de soudage sont utilisés dans le génie civil (la construction de bâtiment, de pont, etc.), dans l'aéronautique,

l'automobile, la pétrochimie et dans le nucléaire. Le soudage est présent dans la majorité des activités industrielles et les matériels propres à ces techniques représentent un grand nombre de fabricants au niveau mondial. Le soudage est perçu par beaucoup comme une science primitive. Rien ne saurait être plus éloigné de la vérité. Les principales avancées scientifiques et technologiques ont pris place entre les années 70 et 90 [3]. Ces années là, le soudage est passé d'un art empirique à une activité technique pluridisciplinaires nécessitant un certains nombres de connaissances dans plusieurs domaines physiques.

Le soudage a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. En dehors du cas idéal où les forces inter-atomiques et la diffusion assurent lentement le soudage des pièces métalliques mises entièrement en contact suivant des surfaces parfaitement compatibles et exemptes de toute pollution, il est nécessaire de faire intervenir une énergie d'activation pour réaliser rapidement la continuité recherchée. L'opération de soudage peut être exécutée avec ou sans métal d'apport. Suivant l'épaisseur des pièces, la soudure peut être constituée d'un ou de plusieurs cordons (multipasses). Les procédés de soudage sont classés suivant la nature de la source de chaleur. Un arc électrique est utilisé en Gas Metal Arc Welding (GMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Plasma Arc Welding (PAW), et Submerged Arc Welding (SAW). En soudage LASER et par faisceau d'électrons, une haute densité d'énergie est utilisée. Dans le cadre de cette étude seul les procédés à arc sous flux gazeux GMAW et GTAW seront considérés [1].

Suivant une coupe transversale d'une soudure, nous distinguons trois zones, la zone fondue (ZF), laquelle subissant une fusion et une solidification ; une zone affectée thermiquement (ZAT), laquelle étant exposée à des variations thermiques pouvant donc subir à l'état solide des transformations, mais pas de fusion ; et la troisième zone, le métal de base (MB), laquelle n'étant pas affectée par le procédé de soudage. L'interaction de la matière avec une source de chaleur, entraîne des phénomènes de chauffage rapide, de fusion et de circulation vigoureuse du métal en fusion gouvernée par la convection naturelle, les tensions de surface, les forces électromagnétiques et la poussée de l'arc (figure 1). Par conséquent le transfert thermique et les mouvements de convection affectent la taille et la forme du bain fondu, la vitesse de refroidissement, la cinétique et l'état des diverses transformations dans la ZF et la ZAT. La géométrie du bain a une influence sur les modifications microstructurales. Les taux d'azote, d'oxygène et d'hydrogène au voisinage du métal fondu ainsi que la vaporisation des éléments d'alliage à la surface du bain ont une grande influence sur la composition, la microstructure résultante et sur les propriétés mécaniques de la soudure [4]. La composition, la structure et les propriétés du métal soudé sont largement affectées par divers processus physiques et pour répondre à l'optimisation de ces processus grâce à une compréhension scientifique, il faudra une approche multi-physiques.

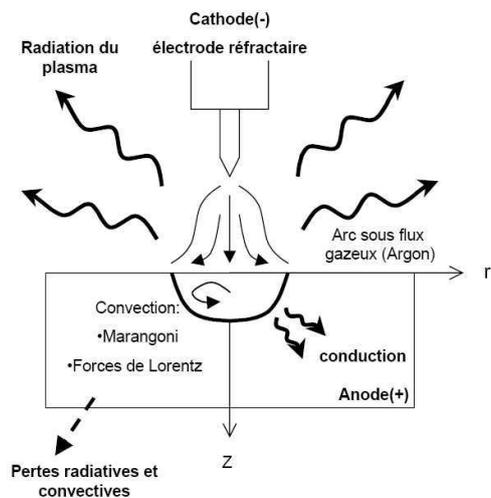


FIGURE 1 : Phénomènes et mécanismes physiques mis en jeu en cours de soudage, Depradeux 2004

### III. UNE MÉTHODE EXPÉRIMENTALE MULTI-PHYSIQUES

La mise au point d'une méthode expérimentale multi-physiques se justifie par le constat que les différentes mesures (températures, déformations, etc.) doivent pouvoir dialoguer afin d'analyser leurs couplages. Suivant les phénomènes mis en jeu (stabilité du bain, distorsions,...), les bases de temps des acquisitions peuvent se présenter sous des ordres de grandeurs très différents.

Les objectifs de cette approche sont de nous aider à identifier et à comprendre des mécanismes physiques responsables des limites des procédés de soudage à arc sous flux gazeux, mais aussi à valider les résultats de simulation numérique (figure 2).

Les difficultés sont d'une part techniques, par la mise au point d'un dialogue cohérent entre les données expérimentales de natures physiques différentes, et d'autre part scientifiques, par la complexité des phénomènes physiques apparaissant en cours de soudage et de leurs interactions (mouvements de convection du bain de fusion, pression de l'arc, etc.).

L'ensemble des données mesurées en cours d'essais recouvre les différents domaines pertinents pour l'étude des phénomènes physiques mis en oeuvre au cours du soudage et de leurs interactions : procédé, thermique, mécanique, optique (figure 3).

La mise au point des chaînes d'acquisition pour effectuer ces mesures dans le cas du soudage à l'arc est assez délicate ; l'objectif étant de s'assurer de la qualité de la mesure et donc de s'affranchir des fréquents problèmes (retour d'arc, bruits, sauts de mesure...) dus à l'environnement fortement perturbateur de l'opération de soudage [8]. L'arc électrique en soudage, extrêmement rayonnant, induit en effet de multiples perturbations, de types électrostatiques, électromagnétiques, thermiques et visuelles. Ces perturbations peuvent altérer la mesure à tous les niveaux de la chaîne d'acquisition, ce qui conditionne les choix technologiques et nécessite la mise en

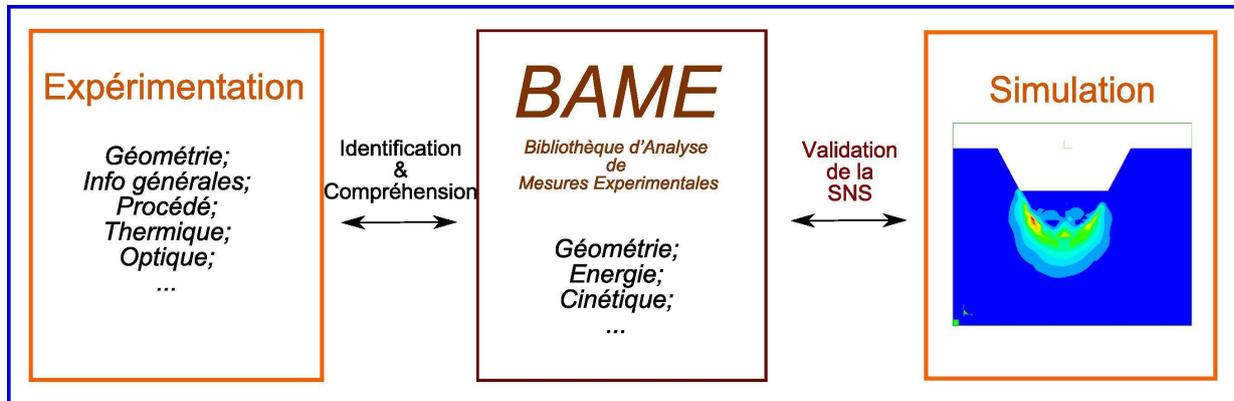
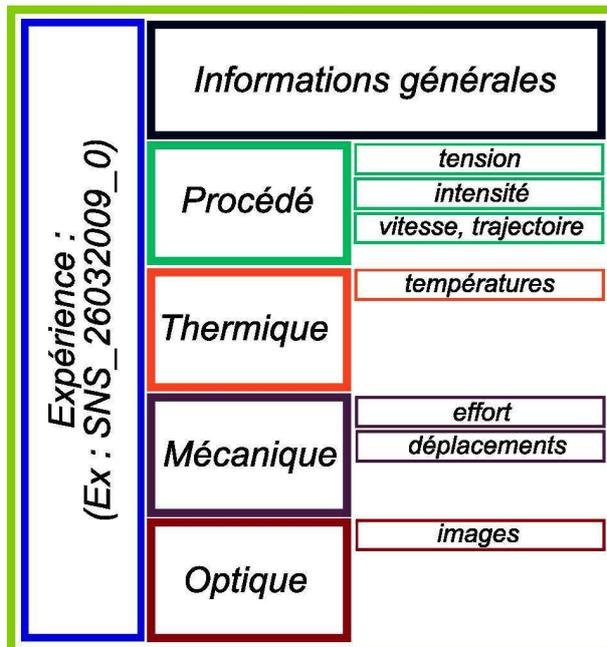


FIGURE 2 : Principe de l'approche expérimentale multi-physiques

### Structuration des données



### Choix techniques

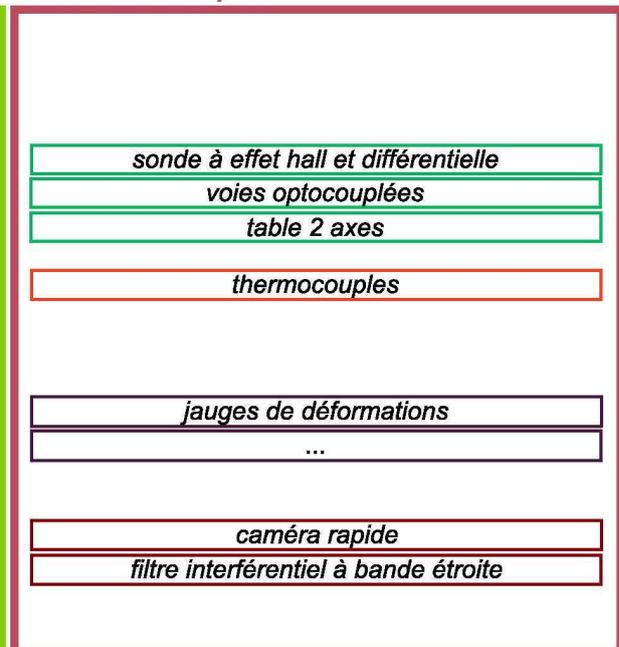


FIGURE 3 : Organisation des mesures et choix techniques associés

oeuvre de dispositifs spécifiques de protection (figure 3).

Ces différentes contraintes ont été intégrées dans la plateforme expérimentale développée au sein du LMGC (figure 4). Cette plateforme, polyvalente dans sa conception, donne accès à différents types d'études expérimentales pour les procédés à arc sous flux gazeux (soudage statique ou dynamique, modulation des paramètres procédés, couplages et synchronisation des différentes mesures...). Le traitement

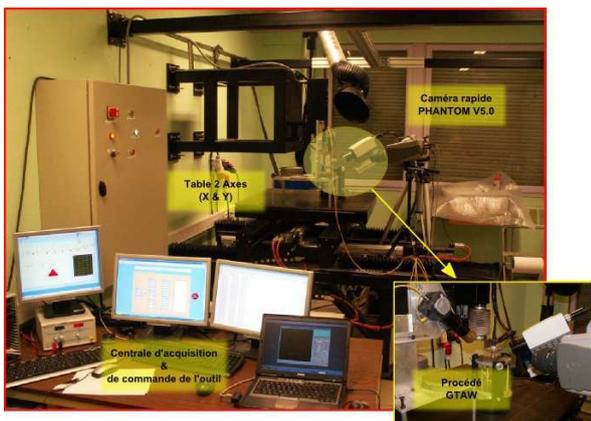


FIGURE 4 : Photo du dispositif expérimental

et l'analyse des flux importants de données générées au cours des essais est facilitée par le développement d'une Bibliothèque d'Analyse de Mesures Expérimentales (BAME). Il s'agit à la fois d'une structuration hiérarchique des données et d'un ensemble de fonctions permettant l'analyse comparée de différents résultats expérimentaux et/ou de simulations numériques.

#### IV. PHÉNOMÈNE DE « HUMPING » : UNE LIMITATION EN SGV

Cette section présente une application procédé, afin d'exprimer l'intérêt d'une approche expérimentale multi-physique, pour valider et alimenter la simulation numérique, mais aussi comprendre les phénomènes limitant les performances.

Au cours d'opérations de soudage à grande vitesse (SGV), apparaît fréquemment un défaut de soudure qui se traduit par la formation d'un cordon bosselé dû au phénomène de « humping » (figure 5). Ce phénomène constitue un verrou à l'optimisation de la productivité en SGV. Les mécanismes physiques expliquant la formation de ces défauts en forme de bosses (« humps ») sont encore mal maîtrisés.

L'utilisation de la plateforme expérimentale (mesures optiques et voies procédés) sur une première série d'essais en GMAW (figure 6) a permis de mettre en évidence les différentes phases d'apparition du « humping » (figure 7), en adéquation avec des résultats récents [9, 10].

En cours du soudage, du fait de la grande vitesse d'avance, il se forme une fine et étroite veine de métal en fusion qui constitue l'arrière du bain fondu (phase 1). Les effets importants de tension superficielle, couplée à une solidification rapide de ce petit volume de métal liquide, engendrent une

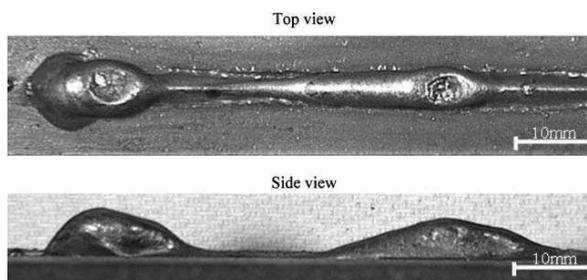


FIGURE 5 : Soudure constituée de « Hump » et de « Valley »

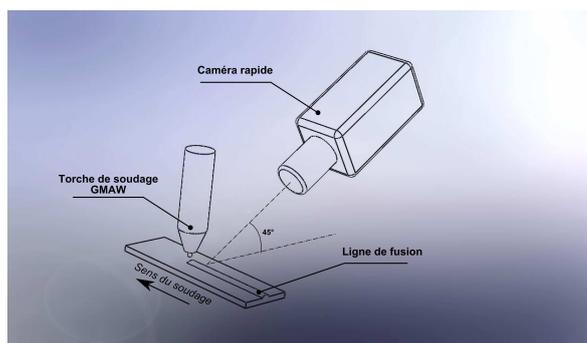


FIGURE 6 : Orientation de la caméra/sens du soudage

réduction de la veine liquide qui freine le métal en fusion alimentant le bain fondu en amont (phase 2). Cette « barrière solide » constitue une bosse (« hump ») qui continue à être alimenté en métal liquide jusqu'à atteindre une forme et un volume provoquant une modification de l'écoulement (instabilité de Rayleigh). Cette modification de l'écoulement conduit à l'apparition d'une nouvelle fine et étroite veine de métal liquide (phase 3) puis à la formation d'un nouveau « hump » (phase 4)...

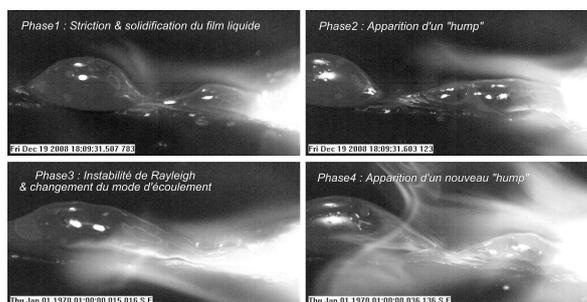


FIGURE 7 : Etapes et mécanismes du « humping », images extraites de l'acquisition vidéo rapide (10000 i/s)

La distribution des températures et les cinétiques d'écoulement du bain fondu au cours du « humping » ont été étudiées par simulation numérique et mesures de températures avec caméra thermique [11]. Dans cette étude, la confrontation des résultats numériques et expérimentaux est encourageante, notamment en ce qui concerne la valida-

tion des résultats de simulation (figure 8).

Les premiers résultats ne permettent cependant pas une identification et une compréhension fine des mécanismes mis en oeuvre au cours du « humping ». En ce sens, la poursuite des études en cours avec la plateforme expérimentale présentée précédemment, devrait nous aider à améliorer la compréhension des mécanismes mis en jeu dans le « humping » et apporter des données d'expériences multi-physiques (procédé, thermique et optique), fournissant ainsi des moyens de validation des simulations numériques.

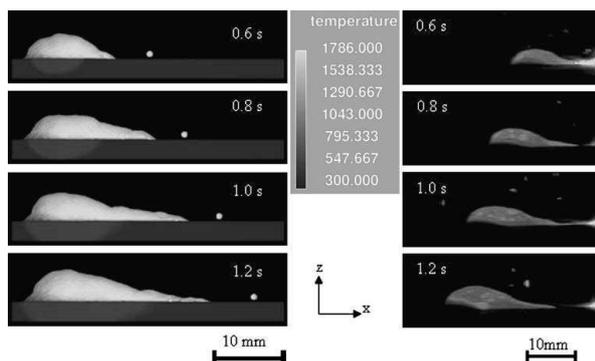


FIGURE 8 : Comparaison de séquences d'images thermiques (températures en degrés K) vue de profil pour la simulation et l'expérimentation d'une soudure avec le phénomène de « humping », Farson 2007

## V. CONCLUSION

La mise en place de ce type d'approche expérimentale de mesures multi-physiques synchronisées en soudage à l'arc permet d'une part une meilleure compréhension des mécanismes physiques mis en oeuvre, et d'autre part de constituer des bases de données de mesures, permettant à la fois l'alimentation et la validation des simulations numériques du soudage. L'exemple du phénomène de humping illustre l'apport de l'expérimentation dans l'analyse des résultats numériques, soulignant la complémentarité de ces deux approches.

Le développement de la plateforme expérimentale et de l'outil de structuration et d'analyse des données (BAME) devrait permettre d'appréhender de façon plus complète les interactions en cours de soudage et ainsi comprendre les limites actuelles du SGV.

## VI. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés avec l'équipe Assemblages Soudés (AS), au sein du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC). Je tiens à remercier Cyril Bordreuil (MCF), Fabien Soulié (MCF) et Yves El Kaim (Ingénieur d'étude CNRS) pour leur grande implication dans cette étude.

## RÉFÉRENCES

[1] T. Debroy, S.A. Davis, « Physical processes in fusion welding » *Reviews of Modern Physics*, vol. 67, pp. 85–112, 1995.

[2] R. Blondeau, *Métallurgie et mécanique du soudage* Hermes Science Publications, 2001.

[3] T.W. Eagar, « Welding and joining : moving from art science » *Welding Journal*, vol. June, pp. 49–55, 1995.

[4] J. Lancaster, « The physics of welding » *Phys. Technol.*, vol. 15, pp. 73–79, 1984.

[5] Y. Zhang, R. Kovacevic & L. Li, « Characterization and real-time measurement of geometrical appearance of the weld pool » *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 1, pp. 162–163, 1995.

[6] Q. Lin, X. Li & S.W. Simpson, « Metal transfert measurements in gas metal arc welding » *Journal of Physics D : Applied Physicst*, vol. 34, pp. 347–353, 2001.

[7] L. Depradeux, « Simulation numérique du soudage Acier 316L » *Thèse de Doctorat INSA Lyon*, 2004.

[8] Société VISHAY, « Noise Control in Strain Gage Measurements » *Rapport Technique*, 2007.

[9] B.J. Bradstreet, « Effect of Surface Tension and Metal Flow on Weld Bead Formation » *Welding Journal*, vol. July, pp. 314–322, 1968.

[10] T.C. Nguyen & al, « The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding » *Science and Technology of Welding and Joining*, vol.10, pp. 447–459, 2005.

[11] M.H. Cho, D.F. Farson, « Understanding Bead Hump Formation in Gas Metal Arc Welding Using a Numerical Simulation » *Metallurgical and Materials Transactions*, vol.38, pp. 305–319, 2007.

## Microfibril angle of cell wall in *Eucalyptus* wood: implication on breeding programs

Paulo Ricardo GHERARDI HEIN<sup>1,4</sup> (PhD candidate - 1<sup>st</sup> year), Gilles CHAIX<sup>2</sup>, Loïc BRANCHERIAU<sup>1</sup>, José Tarcísio LIMA<sup>3</sup> (PhD co-advisors) and Joseph GRIL<sup>4</sup> (PhD advisor)

<sup>1</sup>CIRAD PERSYST - Production and Processing of Tropical Wood  
73 rue Jean-François Breton TA B-40/16  
34398 MONTPELLIER cedex 5, France

<sup>2</sup>CIRAD BIOS - Genetic Diversity and Breeding of Forest Species  
73 rue Jean-François Breton TA A-39/16  
34398 MONTPELLIER cedex 5, France

<sup>3</sup>DCF/UFLA - Ciência e Tecnologia da Madeira  
Universidade Federal de Lavras  
37200-000 LAVRAS, Brazil

<sup>4</sup>LMGC-MAB / CNRS - Laboratoire de Mécanique et Génie Civil  
Université de Montpellier 2  
34095 MONTPELLIER cedex, France

paulo.hein@cirad.fr, gilles.chaix@cirad.fr, loic.brancheriau@cirad.fr,  
jtlima@ufla.br, jgril@lmgc.univ-montp2.fr

**Abstract** – The great challenge of forest breeders for the future is to provide genetic varieties (genotypes) well adapted to several industry needs such as energy, pulp and paper and solid wood. In this context, researches are needed to generate a better understanding about variability, correlations and genetic and environmental control of some wood properties. Genetic studies and selection process requires the development of high throughput phenotyping tools. In this study we are interested on the orientation of the cellulose microfibrils in the S<sub>2</sub> layer of cell wall in *Eucalyptus* wood and its implications on others timber properties. The use of new methods and tools and genetic approaches can make a significant contribution to understand how and why microfibril angle changes in *Eucalyptus* wood.

**Keywords** – Microfibril angle; Wood; *Eucalyptus*.

### I. INTRODUCTION

Due to the growing demand for wood quality, the degradation and devastation of natural forests are rapidly progressing, especially in developing countries such as Brazil. The deforestation of natural forests causes serious economic and environmental problems, not only locally but also globally while sustainable management of forests is an urgent necessity.

The establishment of forest production systems to supply the sawn timber industry with the required quality of the timber market can be seen as a key to the reduction of deforestation of natural forests.

*Eucalyptus* is one of the most widely cultivated hardwood genera in tropical and subtropical regions of the world. This success largely reflects i) the adaptability of this genus to the diversity of climatic and soil conditions, ii) its fast growth usefulness of its wood for industrial applications [1].

Nowadays, for several industries which require huge quantity of wood, such as sawmills, pulp and paper, charcoal, steelmaking, the raw material production is provided by fast-growing and short rotation plantations

Breeding of *Eucalyptus* for commercial traits is a relatively recent development and linked to the increase in the establishment of plantations. After initial studies to determine the suitability of species and provenances for particular environments, progeny trials were established, often on a range of sites, allowing the estimation of genetic parameters and genotype by environment interactions. The early studies on genetics of *Eucalyptus* concentrated on tree growth, survival, stem straightness and branch quality. As breeding programs progressed the range of traits assessed expanded to include wood quality, the most important according to the economic interests [2]. Thus, Brazil like many other countries has developed intensive clonal silviculture to reach high *Eucalyptus* forest productivity (38 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) notably higher than those of Australia (25 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) and Portugal (13 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) [3]. Brazil is an important exporter of wood and production to supply the pulp and paper industry. Nowadays the total *Eucalyptus* plantations area in Brazil covers more than 3.5 million ha [3].

## II. BREEDING PROGRAMS IN *EUCALYPTUS*

Advances in tree breeding and management practices are indeed making significant gains. Most breeding programs of *Eucalyptus* are focusing on important traits to pulp and energy production. At the same time, in recent years the concept of multiple uses of tree logs to increase the yield of the forest enterprise as cellulose and paper and solid wood has been introduced [4]. Although wood from these breeding trees presents an optimal performance to pulp and energy, its performance in the timber industry is usually not satisfactory.

It is widely recognized that most species have at least ten, perhaps twelve, wood quality characteristics which can have adverse impacts on effective and efficient conversion, product processing and product quality [5]. Among these, growth stress expression is probably the most frequently referenced characteristic in an abundant literature detailing often severe problems arising in the course of conversion and processing. In addition, the scarcity of the most fundamental requirement for success - prudent and patient investors - leads to poor silviculture, poor sawlog quality, poor sawmilling, poor lumber quality and, unsurprisingly, poor lumber prices [5].

Hence, wood technologists spend much time developing strategies to overcome deficiencies in timber [6].

There are numerous statements that density is the most important characteristic in determining the properties of wood. It is known that many wood characteristics are age-related and co-vary with one another (density, tracheid length, microfibril angle, lignin content etc.); indeed correlations between and within properties and characteristics can be high. Many studies have shown correlation among density, modulus of elasticity and microfibril angle [7]. For instance, Yang and Evans [8] studied *Eucalyptus* wood and found that microfibril angle and density accounted for 92 percent of the variation in modulus of elasticity and interestingly, microfibril angle alone accounted for 87 percent of the variation in modulus of elasticity, while density alone accounted for 81 percent. Selection of any favorable characteristic has benefits for a number of wood properties, with the overall gain depending on the characteristic sought for improvement and its effect on all wood properties. In the case of some conifers species the intrinsic characteristic whose improvement is likely to yield the greatest economic benefits is the microfibril angle [6].

Relatively few works have been addressed on the evaluation genetic aspects of microfibrils angle orientation in wood. For instance, recently Balturis *et al.* [9] investigated the genetic variation and inheritance of density, microfibril angle and modulus of elasticity in radiata pine breeding population. They reported a high negative, and therefore, favorable genetic correlation (0.92) between MFA and modulus of elasticity. However, they reported that density, MFA and MOE showed unfavorable genetic correlation with diameter growth. Their results suggest that selection for increased density and MOE, and reduced MFA in absence of selection for growth can result in a genetic loss for growth rate.

## III. MICROFIBRIL ANGLE AS A KEY TRAIT IN *EUCALYPTUS* WOOD

Microfibril angle (MFA) is a property of the cell wall of wood fibers, which is made up of millions of strands of cellulose called microfibrils [10]. This characteristic represents the orientation of cellulose in the cell wall along the stem axis [11]. In the secondary cell walls of xylem cells, the cell wall typically has three layers (Figure 1), an outer  $S_1$  with transversely oriented microfibrils, a thick  $S_2$  layer with axially oriented microfibrils, and an inner  $S_3$  layer also with transversely oriented microfibrils [12]. Because  $S_2$  layer is generally much thicker than the other layers is therefore

considered to explain the physical and chemical properties of the cell wall [13].

Since at long time, it has been known that microfibril orientation has major effects on two wood properties: stiffness and longitudinal shrinkage. Recently, Via *et al.* [14] reported a fourfold increase in stiffness of longleaf pine when the microfibril angle dropped from 40 to 5°. In regard to longitudinal shrinkage, the property increases with microfibril angle but in a highly non-linear manner and is responsible for some degrade on drying, especially crook [6]. Microfibril angle correlation are not very clear on with tracheids or fiber length [15-17], lignin content [18,19] and also spiral grain [20].

Wood with large MFA (wood produce by short-rotation) has a low modulus of elasticity and it is therefore not suitable for timber production decreasing the plantation benefits. But, the forest industry development is based on short-rotation cropping of fast-growing species as *Eucalyptus* [21].

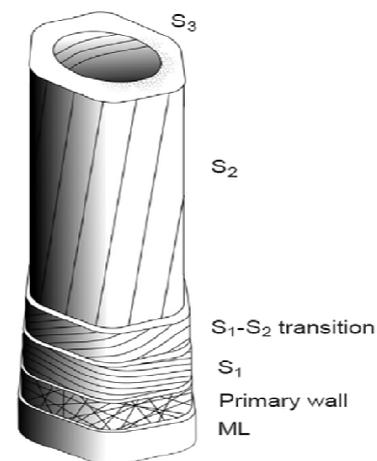


Figure 1 - Microfibrils in the three layers of the cell wall [12].

Early optical measurements of MFA were extremely tedious. Nowadays, a wide range of different methods are available to evaluate MFA in wood and some papers have been addressed to investigate this property. Variation in MFA in softwoods has been extensively characterized in many species, especially in the Pinaceae [12]. Thus, general trends could be reported, for instance, in conifers is well known that MFA decrease with height [22] and varies from pith to bark being large near the pith and declining gradually from pith to cambium [6]. Hence, the commercial importance of MFA, as it relates to wood quality, is well established for softwoods, but is less clear for hardwoods [12]. Specifically in the genus *Eucalyptus*, the effects of microfibril angle on wood properties other than mechanical ones are rarely reported in the literature [23]. Therefore, more well-designed studies relating MFA and its interaction with other wood properties to timber quality are needed. Additionally, the MFA control in response to developmental and environmental influences are poorly understood [12]. The great challenge for the breeder of the forests of the future is to provide genetic varieties (genotypes) well adapted to more diverse industry needs. In this context, it is essential to know the variability, the inheritance, the genetic and environmental control of the orientation of the microfibrils in the  $S_2$  layer of cell wall in *Eucalyptus* wood and its implications with others properties. Hence, the development of new methods and tools, and genetic approaches will contribute to understand how and why MFA variations occur in *Eucalyptus* wood and how it is possible to control these variations.

Thus, the main objective of the proposed PhD thesis will be to generate a better understanding why and how the microfibril angles change in *Eucalyptus* wood. This objective requires: [i] to provide the effect of microfibril angles on *Eucalyptus* timber properties; [ii] to develop indirect methods for assessing microfibril angle in *Eucalyptus* wood and [iii] to quantify the genetic variation of microfibril angle in *Eucalyptus* progeny tests.

#### IV. MATERIAL AND METHODS

##### IV.1. Sampling origin

We will develop the near infrared spectroscopy (NIRS) tool for prediction MFA, density and other properties on a first sampling set harvested last year (Congo samples). Then, we will focus our work on samples collected in progeny trials in Brazil (2010) where genetic and environmental controls could be estimated.

In order to develop preliminary NIR approach, wood disks of 14-years-old *Eucalyptus urophylla*, from a progeny trial (issued from a partial mating design of UR2PI - Republic of Congo) will be used in this study. The disks will be divided in diametrical bands. The diametrical bands will be divided in 15 mm x 20 mm x 20 mm size wood samples for NIR spectra and basic density. To perform microfibril angle measurements 1 mm x 20 mm x 20 mm samples will be cut from original samples before NIR spectra acquisition (Figure 2).

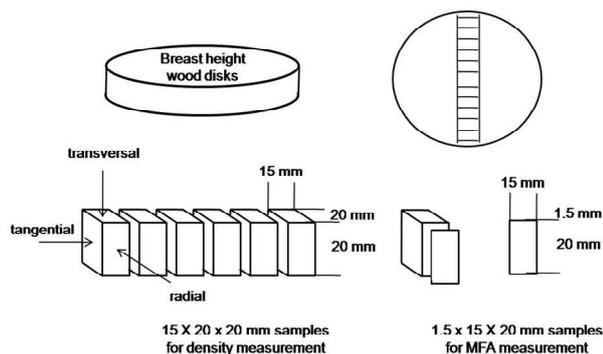


Figure 2 - Sampling

##### IV.2. Wood density and MFA measurement

150 samples will be selected according to NIR (Near InfraRed) spectra variability obtained by the PCA results from the total sample collection. These well-representative samples will be labeled as calibration set. The wood basic density will be determined by ASTM D2395 [24] standard and the mechanical properties will be determined by ASTM D143-94 [25] procedures. The MFA will be determined by X-ray diffraction technique with the 002 diffraction arcs (D-max/3B diffraction meter).

##### IV.3. NIR Spectra measurements

NIR spectra will be measured in the diffuse reflectance mode in a Bruker spectrophotometer (Vector 22/N model). The NIR spectra will be obtained as 8 cm<sup>-1</sup> over the wavenumber range 12.500 to 3.500 cm<sup>-1</sup>. 32 scans will be directly taken and averaged into a single average spectrum. The spectra acquisitions will be carried out on the transversal, radial and tangential face of the wood samples. The NIR spectra information will be acquired in a climatized room with temperature around 20°C and relative humidity around 65%.

##### IV.4. Statistical Analysis

Partial least squares (PLS) regression to describe the relationship between the NIR spectra and wood density and MFA will be developed using the Unscrambler (CAMO AS, Norway) software version 9.2. Descriptive statistical and analysis of variance will be analyzed using R software.

#### V. EXPECTED RESULTS AND PERSPECTIVES

The radial and longitudinal variation of microfibril angles will be evaluated and correlated to stiffness, strength, density and shrinkage. The radial and longitudinal changes in these wood properties will be associated to the tree growth conditions. The effect of microfibril angles on *Eucalyptus* timber properties will be useful to understand the biological reason for the large differences found between juvenile and mature wood. These results could help us to give some hypothesis on the mechanism of cellulose microfibrils arrangement in the S<sub>2</sub> layer of cell wall in wood.

Over the last years, non-destructive sampling techniques and new assessment methods have been developed for high throughput measurement required by genetic study. In this context, core sampling associated to NIR spectroscopy analysis in order to predict wood properties have been used in breeding programs. NIRS approach can be successfully used to predict MFA values [26-29]. Thus, we will try to develop and improve this methodology in order to measure MFA and other properties in large samplings. We will be able to examine the MFA magnitude and the correlation among MFA, wood density and physical traits in *Eucalyptus* wood.

These approaches and tools has enabled the assessment of progeny trials to determine the patterns of variation, degree of genetic control and economic importance of many wood traits, leading to the inclusion of wood properties in many *Eucalypt*-breeding programs.

The predicted values of the microfibril angles of the trees from a progeny test will enable to assess of the level of genetic and environmental control of microfibrils orientation in *Eucalyptus* wood. The degree of genetic control for microfibril angles will be compared to tree growth conditions and a series of issues and challenges for the future will be discussed. Finally, we hope to be able to indicate the well appropriate genotypes for future wood production in *Eucalyptus* Brazilian plantations according to the end-uses.

#### VI. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank: i) CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Brazil) for providing financial support to GDE project (Process 200970/2008-9); ii) CIRAD BIOS and CIRAD PERSYST; iii) UR2PI (Republic of Congo) for providing sampling support and iv) CNRS (LMGC/MAB) to the technical support of the present work.

#### VII. REFERENCES

- [1] Santos, P.E.T.; Geraldi, I.O.; Garcia, N.G. Estimates of genetic parameters of wood traits for sawn timber production in *Eucalyptus grandis*. **Genetics and Molecular Biology**, v.27, n.4, 567-573, 2004.
- [2] Raymond, C.A. Genetics of *Eucalyptus* wood properties. **Annals of Forest Science**, n.59, 525-531, 2002.
- [3] ABRAF Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2007. **Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas**. Brasília, 91p. 2008

- [4] Bibiana, A. and Tamayo, L. Densidad de la madera en clones de *Eucalyptus* por densitometría de rayos X. **Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia**, n.45, p. 87-99, 2008.
- [5] Shield, E.D. Whither eucalypt sawlogs? **IUFRO 'Eucalypts and diversity: balancing productivity and sustainability'**. Durban, South Africa, 2007.
- [6] Walker, J.C.F. and Butterfield, B.G. The importance of microfibril angle for the processing industries. **New Zealand Forestry**, p.35-40 November, 1995.
- [7] Yang, J.L. and Evans, R. Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 61, 449-452, 2003.
- [8] Evans, R. and Ilic, J. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. **Forest Products Journal**, v.51, n.3, 53-57, 2001.
- [9] Balturis, B.S.; Wu, H.X. and Powell, M.B. Inheritance of density, microfibril angle, and modulus of elasticity in juvenile wood of *Pinus radiata* at two locations in Australia. **Canadian Journal of Forest Research**, n.37, 3164-2174, 2007.
- [10] Fang, S.; Yang, W. and Tian, Y. Clonal and within-tree variation in microfibril angle in poplar clones. **New Forests**, n.31, 373-383, 2006.
- [11] Andersson, S.; Serimaa, R.; Torkkeli, M.; Paakkari, T.; Saranpää, P. and Pesonen, E. Microfibril angle of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) compression wood: comparison of measuring techniques. **Journal of Wood Science**, n.46, 343-349, 2000.
- [12] Donaldson, L. Microfibril angle: measurement, variation and relationships – a review. **IAWA Journal**, v.29, n.4, 345-386, 2008.
- [13] Donaldson, D. and Xu, P. Microfibril orientation across the secondary cell wall of *Radiata* pine tracheids. **Trees**, v.19, 644-653, 2005.
- [14] Via, B.K.; So, C.L.; Shupe, T.F.; Groom, L.H. and Wikaira, J. Mechanical response of longleaf pine to variation in microfibril angle, chemistry associated wavelengths, density, and radial position. **Composites: Part A**, n.40 60–66, 2009.
- [15] Hirakawa, Y. and Fujisawa, Y. The relationship between microfibril angles of the S<sub>2</sub> layer and latewood tracheid lengths in elite sugi tree (*Cryptomeria japonica*) clones. **J. Jap. Wood Res. Soc**, n.41, 123-131, 1995.
- [16] Kibblewhite, R.P.; Evans, R.; Grace, J.C. and Riddell, M.J.C. Fibre length, microfibril angle and wood colour variation and interrelationships for two radiata pine trees with mild and severe compression wood. **Appita Journal**, n.58, 316-322, 2005.
- [17] Tsutsumi, J.; Matsumoto, T.; Kitahara, R. and Mio, S. Specific gravity, tracheid length and microfibril angle of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don): Seed grown trees compared with grafts. **Bull. Kyushu Univ. For.** n. 52, 115-120, 1982.
- [18] Hori, R.; Suzuki, H.; Kamiyama, T. and Sugiyama, J. Variation of microfibril angles and chemical composition: Implications for functional properties. **J. Mat. Sci. Lett**, n.22, 963-966, 2003.
- [19] Jungnikl, K.; Koch, G. and Burgert, I. A comprehensive analysis of the relation of cellulose microfibril orientation and lignin content in the S<sub>2</sub> layer of different tissue types of spruce wood (*Picea abies* [L.] Karst.). **Holzforschung**, n.62, 475-480, 2008.
- [20] Cown, D.J.; Ball, R.D. and Riddell, M.J.C.. Wood density and microfibril angle in 10 *Pinus radiata* clones: Distribution and influence on product performance. **New Zealand Journal of Forest Science**, n.34, 293-315, 2004.
- [21] Barnett, J.R. and Bonham, V.A. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. **Biol. Rev.** n.79, 461-472, 2004.
- [22] Megraw, R. A.; Leaf, G. and Bremer, D. Longitudinal shrinkage and microfibril angle in Loblolly pine. In **Microfibril Angle in Wood: Proceedings of the IAWA/IUFRO International Workshop on the Significance of Microfibril Angle to Wood Quality** [ed. B. G. Butterfield], p.27-61. Westport, N.Z. University of Canterbury Press, Canterbury, N.Z. 1998
- [23] Lima, J.T.; Breese, M.C. and Cahalan, C.M. Variation in microfibril angle in *Eucalyptus* clones. **Holzforschung**, n.58, 160-166, 2004.
- [24] American Standards and Testing Methods – ASTM. Annual book of ASTM standards. D2395-02. **Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials**, West Conshohocken, PA, USA (2002).
- [25] American society for testing and materials - ASTM. Annual book of ASTM standards. D 143–94. **Standard methods of testing small, clear specimens of timber**. p. 23-53. Denver, USA (1997)
- [26] Schimleck, G.F. and Evans, R. Estimation of microfibril angle of increment cores by near infrared spectroscopy. **IAWA Journal**, v. 23, n.3, 225-234, 2002.
- [27] Jones, P.D.; Schimleck, L.R.; Peter, G.F.; Daniels, R.F.; Clark III, A. Nondestructive estimation of *Pinus taeda* L. wood properties for samples from a wide range of sites in Georgia. **Canadian Journal of Forest Research**, n.35, 85-92, 2005.
- [28] Schimleck, L.R.; Evans, R.; Jones, P.D.; Daniels, R.F.; Peter, G.F.; Clark III, A. Estimation of microfibril angle and stiffness by near infrared spectroscopy using sample sets having limited wood density variation. **IAWA Journal**, v.26 n.2, 175–187, 2005.
- [29] Via, B.K.; So, C.L.; Grom, L.H.; Shupe, T.F.; Stine, M. and Wikaira, J. Within three variation of lignin, extractives and microfibril angle coupled with the theoretical and near infrared modeling of microfibril angle. **IAWA Journal**, v.28 n.2, 189-209, 2007.

DOCTISS 2009

# Contribution de la mécanique à la conservation du patrimoine culturel

Bertrand MARCON<sup>1</sup> (Doctorant 3e année)  
David DUREISSEIX<sup>2</sup>, Delphine JULLIEN-PIERRE<sup>3</sup> (Directeurs de thèse français)  
Luca UZIELLI<sup>4</sup> (Directeurs de thèse italien)

Laboratoire de mécanique et génie civil (L.M.G.C.)  
Université Montpellier 2  
F-34095 MONTPELLIER cedex 5, France

Dipartimento di scienze e tecnologie ambientali forestali (D.I.S.T.A.F.)  
Università di Firenze  
I-50145 FIRENZE, Italia

<sup>1</sup>marcon@lmgc.univ-montp2.fr  
<sup>2</sup>dureisse@lmgc.univ-montp2.fr, <sup>3</sup>jullien@lmgc.univ-montp2.fr  
<sup>4</sup>luca.uzielli@unifi.it

**Résumé – La thématique de cette recherche est de proposer des études mettant en jeu une expertise de mécanicien afin de répondre aux attentes des conservateurs et des restaurateurs des objets du patrimoine culturel.**

**Mots-clés – bois ; conservation ; mécanique ; éléments finis**

## I. INTRODUCTION

L'objet de la thèse est la mise en place d'une méthode d'analyse mécanique venant en appui à la restauration et la conservation d'objets du patrimoine. On se limitera, pour l'application de la méthode, à un petit nombre d'objets choisis, soit pour leur importance motivant une forte mobilisation de la communauté, soit pour leur représentativité vis-à-vis des problèmes rencontrés.

La question posée, spécifique à chaque objet, pourra par exemple concerner la conception d'un nouveau châssis cadre pour un tableau, ou bien l'incidence d'un changement d'ambiance sur le risque de décollement de la peinture. Ces deux grandes problématiques correspondant aux attentes de la part des restaurateurs de tableaux.

L'approche choisie s'appuiera sur le développement de modèles numériques à la fois du comportement du matériau bois et des structures étudiées. Elle combine le développement d'outils de simulation numérique et l'intégration de données expérimentales, sur originaux et sur maquettes de substitution, destinées à nourrir et valider les modèles.

La modélisation intègre, de manière relativement simplifiée mais suffisamment réaliste, les aspects multiphysiques du comportement hygromécanique du bois. Celle-ci devant prendre en compte les comportements élastique, visco-élastique, thermo- et hygro-dilatant ainsi que le comportement mécanosorptif avec la propriété d'orthotropie radiale du matériau bois. La modélisation doit également intégrer les termes de transport d'humidité et les équilibres hydriques.

## II. ETUDE DE CAS ET CONSERVATION DES OEUVRES

### II.1. Exposition dans un musée : Monna Lisa di Gioconda

#### II.1.1. Descriptif de l'œuvre



A titre d'exemple le tableau de Leonardo da Vinci, la *Monna Lisa di Gioconda*, illustre très bien cette problématique. Il s'agit d'un panneau de peuplier enchâssé entre un châssis-cadre, et un cadre extérieur. Son étude demande donc de prendre en compte l'interaction entre le panneau et les cadres. Ce panneau (peint entre 1503 et 1506) possède une histoire de 400 ans, lors de laquelle les sollicitations auxquelles il a été soumis ne sont pas connues exactement ; l'état actuel de ce panneau doit donc être identifié et non déduit de l'histoire passée.

Notons au passage que l'utilisation de panneaux de bois comme support de peinture s'inscrit entre le 14<sup>e</sup> et le 16<sup>e</sup> siècle. Durant cette période, le tableau a enregistré de nombreuses variations de condition de stockage, tantôt remisé, exposé tel quel et de nos jours mis dans une enceinte régulée en hygrométrie et température.

Il présente également une assez longue fissure sur la partie supérieure qui aujourd'hui semble stable et qui d'ailleurs a fait l'objet d'un acte de conservation à l'aide de « papillons » au revers afin d'éviter l'ouverture de cette dernière. Tous ces points font que le tableau de la Joconde est un sujet d'étude qui balaye un large spectre des spécificités des panneaux peints sur bois du patrimoine.

### II.1.2. Risque de propagation de fissure

Cette analyse est menée conformément à l'approche énergétique de Griffith [5]. Elle repose sur le fait que lorsque l'on exerce des actions mécaniques sur une structure, celle-ci se déforme et emmagasine de l'énergie de déformation  $E_d$ . Une propagation de fissure consommerait une partie de cette énergie  $E_f$  et a pour conséquence la création d'une surface de décohésion  $da$ .

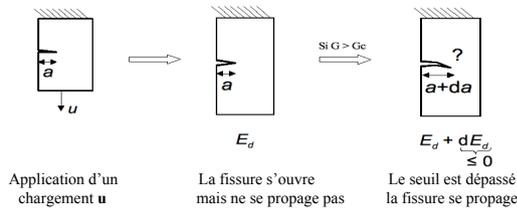


Figure 1 : Principe de la propagation de fissure selon Griffith

Une propagation de fissure de surface  $da$  consomme une énergie proportionnelle à  $da$  :  $E_f = G \cdot da$  où  $G$  est appelé coefficient de restitution d'énergie. Si  $G$  atteint une valeur suffisante  $G_c$ , dite critique, alors le scénario de propagation se produit. La littérature donne pour le peuplier :

$$G_c \approx [0,1, 1,0] \text{ kJ/m}^2$$

Tout le problème réside dans l'obtention de la valeur de  $G$  car de façon générale il est impossible de réaliser des essais mécaniques sur les panneaux peints du patrimoine. C'est pourquoi il est nécessaire de passer par des essais virtuels, sur un modèle numérique, comme la mise à plat du panneau de la Joconde dans son châssis-cadre.

Le calcul du paramètre  $G$  passe d'abord par l'obtention de la valeur de l'énergie de référence  $E_{ref}$  en appliquant le chargement de dépose du panneau dans le châssis-cadre, et soumis à son poids propre. Puis une série de calculs sont réalisés en incrémentant la longueur de la fissure (initialement de 116.9 mm). À chaque incrément de propagation de fissure on obtient l'énergie contenue dans la structure modifiée.

Le coefficient de restitution d'énergie est alors calculé comme suit :

$$G = \frac{\Delta E}{da} = \frac{(E_{ref} - E_f)}{L_f \cdot e}$$

- avec  $E_{ref}$  : énergie de référence  
 $E_f$  : énergie après incrément de propagation  
 $da$  : surface de décohésion  $da = L_f \cdot e$   
 $L_f$  : longueur de l'incrément de propagation  
 $e$  : épaisseur du panneau, hauteur fissure

Les résultats obtenus sur le modèle Joconde 3D ont été comparés à ceux précédemment obtenus sur le modèle Joconde 2D [4].

- modèle 2D :  $E_{ref} = 19.70 \text{ mJ}$   
 $G_{2D} \approx 0,0070 \text{ kJ/m}^2 \ll G_c \approx 0,1 \text{ kJ/m}^2$
- modèle 3D :  $E_{ref} = 22.26 \text{ mJ}$   
 $G_{3D} \approx 0,0045 \text{ kJ/m}^2 \ll G_c \approx 0,1 \text{ kJ/m}^2$

Le résultat 2D correspond au modèle de l'analyse réalisée en 2004 où il avait été déterminé qu'un changement d'ambiance brutal de 10% d'humidité interne ne mettrait pas en danger l'oeuvre dans le sens où cela n'induirait pas de propagation de la fissure [4].

Les nouvelles simulations avec le modèle 3D, plus précises, sont encore plus encourageantes car elles donnent une estimation de  $G$  environ deux fois plus petites que celles

du modèle 2D. Du point de vue de l'oeuvre, la fissure peut être considérée comme « stable » car le risque que celle-ci se propage est faible.

### II.2. Exposition dans une église : Couronnement du Christ

#### II.2.1. Descriptif de l'oeuvre



Une oeuvre placée dans le chœur de l'Eglise St Didier en Avignon a fait l'objet d'un suivi durant de nombreux mois. Ce tableau représentant la dépose de la couronne d'épines sur la tête du Christ, peint en 1563, est composé de quatre planches horizontales

pour donner un panneau haut de 143 cm et large de 178 cm. Après analyse d'échantillons de bois prélevés au revers il s'avère que l'essence composant le tableau est le peuplier. Les planches sont maintenues solidaires à l'aide de traverses verticales (cerisier ou merisier) montées en queues d'aronde.

#### II.2.2. Suivi In-Situ

Nous disposons de plus d'une année de relevés en hygrométrie et en température dans l'église, au niveau du tableau. Un dispositif au revers de la planche supérieure permet de connaître l'évolution de la déformation de cette planche en fonction des fluctuations climatiques dans l'église [3]. Ci-dessous sont représentées les diverses évolutions de décembre à août 2007.

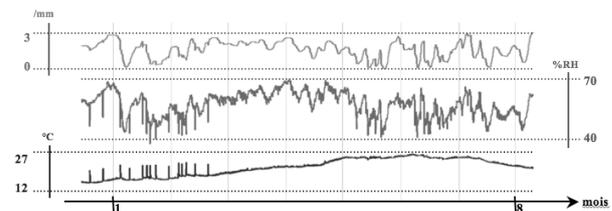


Figure 2 : Evolution de l'ambiance d'exposition du tableau durant 8 mois en parallèles de la variation de flèche de la planche supérieure

Le relevé durant quasiment une année montre que le panneau suit très nettement les fluctuations climatiques de l'environnement dans lequel il est exposé. On constate donc l'importance d'une bonne connaissance des effets du climat sur la problématique de conservation d'une oeuvre.

#### II.2.3. Prédiction numérique du comportement

J. Colmars [2] propose un modèle, issu des travaux de P. Pérré [8], permettant à partir des données hydriques de trouver les variations de flèches de la planche. Pour cela on se sert d'une simulation 1D prenant en compte la mécanique ainsi que les transferts hydriques dans le sens radial d'une planche.

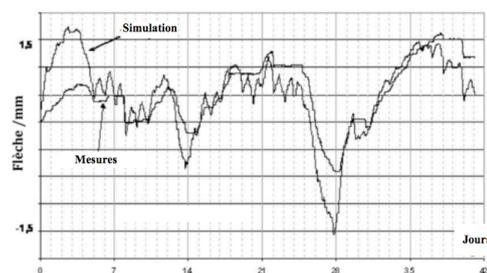


Figure 3 : Comparaison entre mesures in-situ et valeurs simulées

Avec des ajustements et certaines hypothèses sur le débit des planches et la perméabilité à l'humidité de la couche picturale on arrive à bien approcher le comportement de la planche par simulation.

Une deuxième partie de l'étude sur ce panneau concerne l'influence des variations météorologiques à l'extérieur du bâtiment sur l'ambiance à l'intérieur de ce dernier. Pour cela des relevés des ambiances extérieure et intérieure sont faits en parallèles (température et humidité relative). L'ensemble de cette étude une fois finalisée permettra de montrer l'importance de bien caractériser l'ensemble des facteurs influençant les conditions de conservation d'une œuvre peinte sur panneau de bois.

Une étude sur l'ensemble d'une œuvre et de son environnement, comme réalisée ici, vise à aider les conservateurs dans leur décision d'accorder ou non un prêt d'œuvre pour une exposition dans un autre lieu. On pourrait en effet prévoir le comportement du tableau de façon numérique pour anticiper un éventuel danger dû au changement de ses conditions de stockage ou d'exposition.

### III. EXPERTISE SUR UN ACTE DE RESTAURATION

Les actes de restaurations pratiqués sur des œuvres sont issus à grande majorité de Florence où se situe un centre de formation et de restauration appelé *Opificio delle Pietre Dure*.

L'acte de restauration étudié ici vise à réduire les mouvements hors plan du panneau pour que le panneau se déforme moins en tuilage. La technique développée et largement acceptée par la profession consiste en l'application d'un châssis à ressort au revers des panneaux [1].

#### III.1. Descriptif de la technique

La limitation des mouvements hors plan d'un panneau vise à réduire les risques d'endommagement de la couche picturale ainsi que la prévention d'une éventuelle augmentation du tuilage permanent des planches. La conception de ce châssis est représentée sur le schéma suivant.

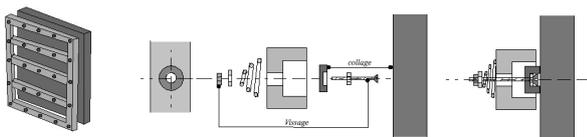


Figure 4 : Description de la conception du châssis à ressort

La problématique principale restant à résoudre sortant de l'approche métier est le dimensionnement de trouver les bonnes caractéristiques des ressorts. C'est-à-dire leur rigidité et la pré-charge qui leur est appliquée lors de l'installation du châssis. Ces paramètres ne peuvent pas être déterminés de façon systématique. Il est indispensable de les adapter au cas par cas selon les caractéristiques individuelles des tableaux. Dans le cadre de cette thèse on propose donc de concevoir un modèle numérique permettant le dimensionnement du châssis ainsi que des ressorts.

#### III.2. Descriptif du modèle associé [7]

Pour répondre à l'attente des restaurateurs et à leurs besoins, nous avons choisi de réaliser un modèle numérique simple qui rend compte de la physique réelle. En optant pour un modèle simple nous espérons pouvoir leur fournir un modèle utilisable dans le cadre de leur pratique. Un modèle

numérique de type 1D rempli, à priori, parfaitement ce rôle. Néanmoins, nous n'excluons pas d'enrichir la description numérique si le besoin s'en fait sentir.

Le modèle numérique est donc basé sur une formulation éléments finis de poutre et de barres. Les mouvements du panneau sont prédits avec comme hypothèse que la face du tableau (peinte) est parfaitement imperméable à la vapeur d'eau, ce qui correspond à une situation idéale, différente de la réalité. Cette situation doit simuler les déformations transitoires dues à la présence et à l'évolution d'un gradient non symétrique d'humidité interne dans le bois.

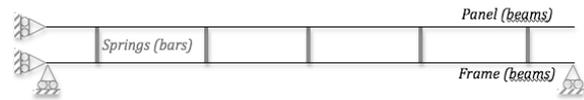


Figure 5 : Modèle éléments finis simple d'un panneau relié à un châssis par des ressorts

Le modèle prend en compte les conditions de contact unilatérales, la rigidité des ressorts ainsi que leur pré-charge. Lorsque le contact entre le châssis et le panneau est réalisé, la force de contact est égale à la pré-charge. A l'opposé, la force exercée par les ressorts est plus importante que la précharge initiale et tend à reformer le contact entre les deux structures. Nous faisons l'hypothèse d'une linéarité entre la force des ressorts et leur distance de compression.

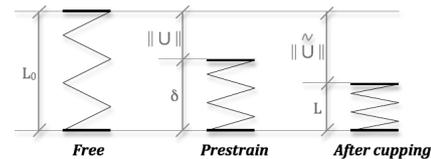


Figure 6 : Définition de la force dans les ressorts

$$F = (\|U\| + \delta - L)k \quad v = (\delta - L)$$

$L_0$  : longueur à vide du ressort /mm  
 $\delta$  : pré-charge en compression /mm  
 $v$  : compression due au tuilage du panneau /mm  
 $k$  : rigidité du ressort /N.mm<sup>-1</sup>

Le profil de la distribution de l'humidité interne est supposé linéaire dans l'épaisseur.

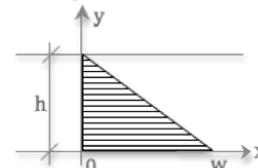


Figure 7 : Gradient d'humidité dans l'épaisseur

Cependant un profil plus complexe issu des travaux de Kollmann [6] peut être considéré comme alternative. Cette hypothèse sur la variation d'humidité en fonction de l'épaisseur peut conduire à une surestimation des déformations. Le modèle de comportement en retrait/gonflement est choisi linéaire.

$$\varepsilon_T = \alpha_T w \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad \sigma_T = E_T \varepsilon_T$$

$w$  : humidité interne /%RH  
 $\varepsilon_T$  et  $\sigma_T$  : champ de contrainte et de déformation /Pa  
 $\alpha_T$  : paramètre de retrait /%  
 $h$  : épaisseur de la planche /mm

Le moment intérieur  $Mz$  (dans le modèle de poutre) engendré par le gradient d'humidité dans l'épaisseur peut s'exprimer comme :

$$Mz = b \int_0^h \sigma_T \left( \frac{h}{2} - y \right) dy \quad Mz = \frac{1}{12} bh^3 E_T \alpha_T w$$

Les paramètres du modèle sont choisis afin d'être facilement manipulables par les restaurateurs (distance de compression des ressorts, nombre de ressorts, dimensions du panneau, les caractéristiques mécaniques des matériaux composant le panneau et le châssis).

### III.3. Validation par l'expérience du modèle numérique

La résolution numérique nécessite d'être validé expérimentalement ; c'est pourquoi une réplique d'une portion de tableau a été réalisée, sur laquelle est fixé un châssis à ressorts. Cette réplique a l'avantage d'être parfaitement connue en terme de dimensions ainsi que du point de vue du matériau la constituant.

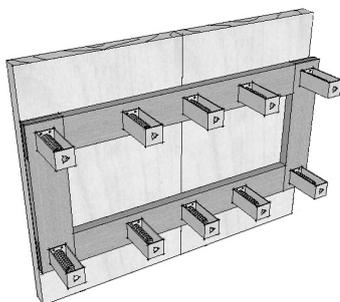


Figure 8 : Réplique de validation du modèle de châssis-ressort

En exposant la réplique à différents environnements et en relevant ses mouvements via un système de capteurs nous pourrions évaluer les performances du modèle numérique. Il faudra éventuellement améliorer le modèle en enrichissant les caractéristiques matériaux par exemple.

Une réplique aux mêmes dimensions et faite dans le même bois de peuplier sert de témoin. Cette dernière n'est pas équipée de châssis et subit les mêmes chargements hydriques et thermiques que la réplique à châssis. Cette étude, initiée lors du séjour à Florence au D.I.S.T.A.F., est en cours de finalisation.

## IV. CONCLUSION

Cette communication présente un éventail de ce que peut proposer la mécanique pour répondre aux questions diverses des conservateurs et des restaurateurs de panneaux peints appartenant au patrimoine culturel. Ce travail est réalisé en étroite collaboration avec ces derniers.

Un travail important reste à réaliser concernant le transfert de compétence afin que les différentes études présentées ici puisse accompagner les artisans de la conservation et de la restauration dans leur pratique.

## V. REFERENCES

[1] M. Ciatti, C. Castelli, and A. Santacesaria, *Dipinti su tavola, la tecnica e la conservazione dei supporti*. Edifir Florence, Italie, pp. 188-192, 1999.

[2] J. Colmars, *Rapport MR2*, Montpellier, France, 2008.  
 [3] P. Dionisi Vici, *Sviluppo di un apparato per la misurazione di forze e deformazioni indotte nei dipinti su tavola da variazioni climatiche : la traversa strumentata*, Thèse de doctorat, DISTAF, Florence, Italie, 1999.  
 [4] D. Dureisseix, J. Gril, O. Arnould, *Au coeur de la Joconde. Léonard de Vinci décodé*, Chap. II.6, Editions Gallimard, Paris, France, 2007.  
 [5] A. A. Griffith, *The theory of rupture, Selected papers on Foundations of Linear Elastic Fracture Mechanics* (A99-25742 pp. 06--39), Bethel, CT/Bellingham, WA, Society for Experimental Mechanics/Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SEM Classic Papers). Vol. CP 1; SPIE Milestone Series. Vol. MS 137, pp. 96--104, 1997.  
 [6] F. Kollmann, W. Côté, *Principles of Wood Science and Technology*. Springer Verlag: pp. 185--186, 1968.  
 [7] B. Marcon, D. Dureisseix, et al. , *Experimental and numerical mechanical study of a framing technique for cupping control of painted panels combining crossbars and springs*, COST IE0601 Wood in Culture Heritage, Braga, Portugal, 2007.  
 [8] P. Perré, I. W. Turner, *A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 42 pp. 4501--4521, 1999.

# Etude et modélisation de la fissuration à chaud en soudage

Aurélie NIEL <sup>1</sup> (Doctorante 1ere année)  
Gilles FRAS <sup>2</sup> (Directeur de thèse)  
Frederic DESCHAUX <sup>3</sup> Cyril BORDEUIL <sup>4</sup>  
Laboratoire de Mécanique et Genie Civil  
Université de Montpellier II  
34095 MONTPELLIER cedex, France

<sup>1</sup>aurelie.niel@iut-nimes.fr  
<sup>2</sup>fras@iut-nimes.fr <sup>3</sup>deschaux@iut-nimes.fr <sup>4</sup>bordreuil@iut-nimes.fr

**Résumé**— Le soudage est un procédé d'assemblage de pièces très développé dans l'industrie. Compte tenu des exigences actuelles du marché, les industriels cherchent à repousser les limites de ce procédé. En vue d'accroître la productivité, diminuer les coûts tout en garantissant la qualité des pièces. Toutefois, l'augmentation de la vitesse de soudage entraîne de nombreux défauts, dont la fissuration à chaud. Ces défauts altèrent considérablement la tenue mécanique des pièces. Plusieurs études ont été faites à ce sujet. L'analyse et l'interprétation du phénomène de fissuration à chaud sont explicités dans cet article. Pour finir, une nouvelle méthode liant l'expérimental et la modélisation sera développée dans le but de caractériser ce défaut en soudage.

**Mots-clés**— mécanique ; soudage ; solidification ; fissuration à chaud ; modélisation.

## I. INTRODUCTION

Le soudage est une opération d'assemblage par fusion locale des pièces. Ce procédé est utilisé dans la construction mais aussi dans l'aéronautique, l'énergie et l'automobile. Lors de l'augmentation de la vitesse de soudage, divers défauts tel que la fissuration à chaud apparaissent. Ces défauts affectent fortement la qualité des soudures et leurs résistances mécaniques. Sur la figure 1, l'apparition de la fissure en cours de soudage par faisceau d'électron est très nettement visible. Ce phénomène est celui abordé dans ce document. De nombreuses études ont donc été menées pour limiter les défauts tout en augmentant la productivité.

Ce document présente tout d'abord le soudage et le phénomène de fissuration à chaud. Dans la dernière section, une méthode de caractérisation de la fissuration à chaud en



FIGURE 1 : Fissuration à chaud en soudage par faisceau d'électrons [7]

soudage par des mesures couplées sera présentée. Puis, une modélisation de l'essai développé sera mise en place et aura pour objectif de corréler les conditions thermomécaniques locales d'apparition de la fissuration à chaud avec les paramètres du procédé par un critère.

## II. LE SOUDAGE

L'opération de soudage peut être assimilée à une opération de fusion locale ou de traitement thermique donnant à la pièce une nouvelle structure cristalline, cette structure dépendant des conditions de soudage et des métaux d'apport. En soudage, on observe un très fort gradient thermique dans la pièce du à un apport très localisé de chaleur.

Ainsi, la soudure réalisée peut se décomposer en 3 zones :

- la zone fondue : dans cette zone, la température de fusion a été atteinte. Dans le cas du soudage avec apport de métal, cette zone est constituée d'un mélange homogène du métal de base et du métal d'apport. Sa structure métallurgique dépend des conditions de soudage, du métal d'apport et du cycle de refroidissement.

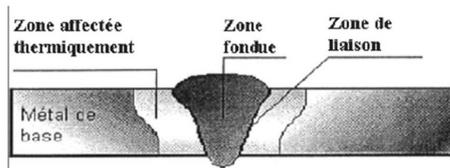


FIGURE 2 : Description d'une soudure

- la **zone affectée thermiquement** : la zone est soumise à une forte élévation de température mais n'atteint pas la fusion. Cet échauffement produit des modifications de la structure, dépendantes des conditions de soudage.
- le **métal de base** : aucune modification structurale n'est à noter dans cette zone, l'élévation de température n'étant pas suffisante.

Nous nous intéresserons dans cet article au phénomène de fissuration du métal en cours de soudage.

### II.1. Principe du soudage TIG

Le terme 'TIG' est l'abréviation de 'Tungsten Inert Gas' et désigne le procédé de soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène aussi appelée 'GTAW' (gaz tungsten arc welding).

Les différents éléments participant au soudage sont décrits dans la figure 3.

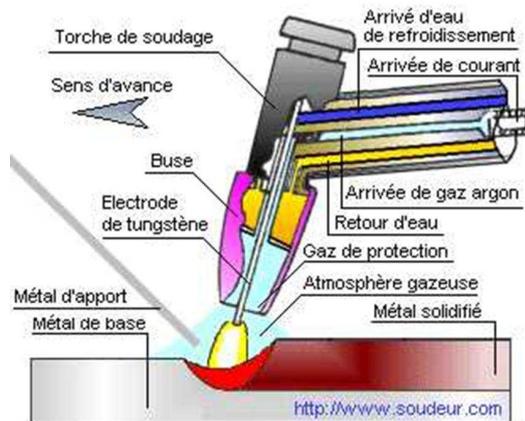


FIGURE 3 : Description du procédé de soudage TIG [8]

Le procédé de soudage TIG consiste à créer un arc entre l'extrémité d'une électrode réfractaire (tungstène) et la pièce à souder et à provoquer ainsi la fusion du métal de base.

### II.2. Défauts de soudage

Les défauts en soudage sont multiples. Ils peuvent être liés à des facteurs métallurgiques, aux paramètres de soudage, ou encore à l'environnement dans lequel est réalisé la soudure. Parmi les principaux défauts de soudage, on peut citer la

fissuration à froid ou à chaud, les porosités, la corrosion ou encore le collage. Dans ce travail, nous nous intéresserons plus particulièrement à la fissuration à chaud. Ce défaut apparaît en cours de soudage (en fin de solidification) et affecte fortement la tenue mécanique des pièces assemblées.

## III. LA FISSURATION À CHAUD

Le soudage, comme tous les autres procédés où il y a solidification de l'alliage, est très sensible à la fissuration à chaud. De nombreux paramètres sont à prendre en compte pour limiter les risques de fissuration, comme la vitesse de refroidissement ou encore la composition de l'alliage. Ce paragraphe décrit les mécanismes d'apparition de la fissuration ainsi que les facteurs influents.

### III.1. Les mécanismes de solidification

La solidification correspond à un changement d'état, du liquide au solide. La structure du matériau est définie par les conditions de solidification. En soudage, la pièce est soumise à de très forts gradients thermiques dus à l'apport localisé de chaleur. Le changement d'état liquide/solide se fait de façon continue. La zone pâteuse correspond à la coexistence de la phase liquide et de la phase solide. Cette zone ne se comporte ni comme un solide ni comme un liquide. Les bornes de l'intervalle de solidification correspondent à la température de liquidus et de solidus du matériau.

La structure évolue en 4 étapes successives pour atteindre l'état solide [2].

- la **germination** : c'est la première étape de la solidification. Des particules solides germent alors dans une grande quantité de liquide. Le matériau se comporte comme un fluide visqueux sans tenue en traction.
- la **croissance** : la fraction solide croît progressivement et la température tend vers le solidus. En soudage, le gradient thermique étant très important, le front de solidification (interface liquide solide) est de type dendritique.
- la **cohésion** : la fraction solide commence à être élevée. Les dendrites entrent en contact les unes avec les autres et forment un squelette solide cohérent. La chute de la perméabilité alors observée est due à la formation d'un réseau solide de plus en plus dense. De fins films liquides subsistent entre les grains solides et subissent de fortes déformations. Elles sont principalement dues à la contraction de solidification et à la contraction thermique du solide.
- la **solidification** : la fraction solide tend vers 1 et les dernières poches de liquide se solidifient. Le réseau solide peut alors résister aux déformations. La contrainte et la déformation à rupture (de la zone pâteuse) augmentent rapidement.

C'est entre la zone de cohérence et celle de solidification totale qu'apparaît la fissuration à chaud. Les films de liquide résiduel se retrouvent piégés à cause de la forte chute de perméabilité de la zone pâteuse en fin de solidification.

Le liquide ne peut donc plus circuler pour accommoder les déformations et le réseau de ponts solides n'est pas encore assez résistant pour éviter la fissuration. Il y a alors risque de fissure intra ou inter granulaire.

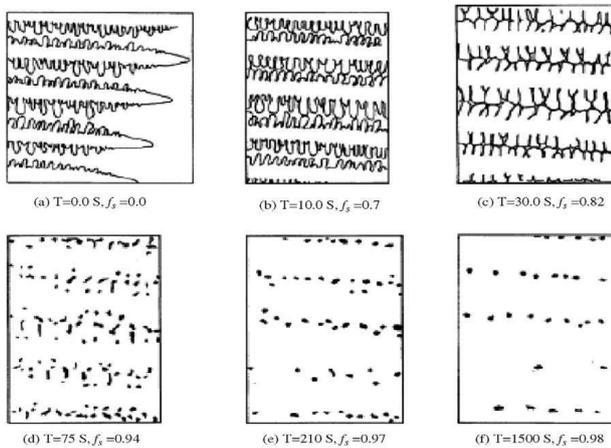


FIGURE 4 : Evolution de la microstructure de la zone pâteuse en fonction de la température [6]

### III.2. Sollicitations

Les sollicitations mécaniques subies par le squelette pendant la solidification sont dues à trois types de phénomènes, thermiques et mécaniques.

- la **contraction de solidification** : cette contraction volumique est due au changement de phase liquide/solide.
- la **contraction thermique du squelette solide** : qui dépend du coefficient de dilatation du solide déjà formé.
- les **déformations provenant des contraintes extérieures** : celles-ci dépendent du procédé et du bridage de la pièce qui empêche sa distorsion naturelle.

### III.3. Intervalle de fragilité

La fissuration à chaud se produit dans la zone pâteuse. Elle correspond à une séparation inter dendritique due à une forte diminution de la perméabilité et à une résistance encore trop faible des ponts solides. Une forte corrélation entre la fraction solide et le risque de la fissuration (ou la tenue aux sollicitations mécaniques) existe. La fissure sera colmatée si la perméabilité du squelette solide est assez grande pour que le liquide vienne remplir le défaut. Sinon, la fissure va se propager. La propagation de la fissure se fera le long des grains solides à travers les films liquides inter granulaires.

L'intervalle de fragilité (Brittle Temperature Range ou BTR) est défini comme étant l'intervalle de température correspondant aux fractions solides où la microstructure est en configuration critique. Les bornes du BTR correspondent respectivement à la température où la fraction de solide est telle que le liquide ne peut plus circuler à cause de la perte de perméabilité ( $f_{critique}$ ) et à la température où la fraction de

solide est suffisante pour que la résistance mécanique augmente grâce au nombre de ponts solides formés (au-delà de  $f_s$  coalescence mais inférieur à 1). Pour une opération de fonderie, on admet parfois que les fonctions solides sont égales à 0.9 et 0.99 [1].

$$BTR = T_{cr} - T_{coal} \Rightarrow f_{scoal} - f_{scr} = \pm 0.9 - 0.99 \quad (1)$$

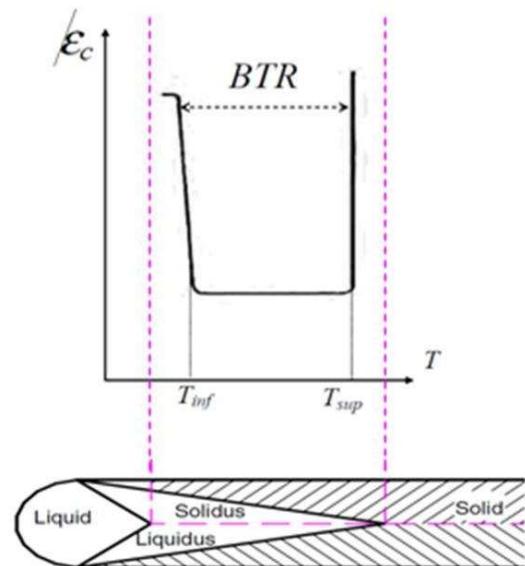


FIGURE 5 : Solidification d'une soudure et BTR

Sur la figure 5, le bain de fusion d'une soudure est mis en parallèle avec l'évolution des températures. La soudure est décomposable en trois zones distinctes : la zone liquide directement située sous la source de chaleur, la zone solide à l'arrière du bain et la zone pâteuse. Cette dernière se trouve dans l'intervalle de température compris entre le liquidus et le solidus. Toutefois, la zone de fragilité, ou BTR, n'est pas égale à l'intervalle de solidification. En effet, la fragilisation du matériau apparaît pour un intervalle de fraction solide durant lequel le liquide ne peut pas accommoder les déformations et les ponts solides ne peuvent pas résister aux déformations. La zone du BTR se situe à l'arrière du bain de fusion entre ( $f_{critique}$ ) et ( $f_{scoalescence}$ ). C'est à cet endroit qu'apparaît l'initiation des fissures.

De plus, le gradient thermique de soudage étant très élevé, Fabrègue a proposé de choisir la fraction solide critique de 0,7 environ (au lieu de 0,9 en fonderie) pour un alliage d'aluminium. Ainsi en soudage, la zone pâteuse est plus large ce qui induit un risque de fissuration plus important [2].

### III.4. Paramètres influents

Dans l'étude bibliographique, les facteurs influents le plus sur la fissuration sont [1] :

- la **composition chimique du matériau** et notamment la teneur en éléments résiduels qui créent des com-

- posés à bas point de fusion
- son **mode de solidification**, soit la quantité de la phase liquide inter dendritique ou inter granulaire à bas point de fusion, pour les fissures amorcées par décohésion de films liquides résiduels.
- les **caractéristiques de mouillage** de la phase liquide inter dendritique à bas point de fusion en contact avec le matériau déjà solidifié,
- la **viscosité** de cette phase liquide (ce point semblait important pour les phénomènes observés de guérison de fissures en train de se former à l'intérieur du bain de fusion),
- la **dilatation thermique** de l'alliage considéré,
- la **taille et la forme des grains** en zone affectée thermiquement (ZAT) dans le cas de la fissuration à chaud de réaffectation.

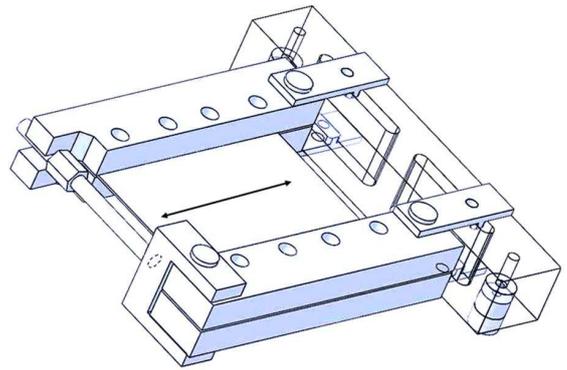


FIGURE 6 : Essai de fissuration développé dans l'étude

#### IV. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

Ce paragraphe décrit la démarche proposée pour étudier les risques de fissuration à chaud en soudage. Dans la bibliographie, de nombreuses études ont été faites sur les mécanismes de fissuration à chaud [2,3]. Plusieurs tests ont permis de caractériser la sensibilité à la fissuration du matériau. Ces essais permettent de classer les alliages suivant leur sensibilité mais ne développent pas de critère quantitatif pour chaque matériau. Dans un premier temps, un banc d'essai de fissuration sera développé permettant d'obtenir un maximum de mesures multiphysiques (optique, thermique et mécanique). En parallèle, une modélisation de l'opération de soudage et du phénomène de fissuration à chaud sera développée, dans le but de tenter de prédire l'apparition de la fissure. Les données issues de l'expérience permettront à la fois d'alimenter la modélisation et de la valider.

##### IV.1. L'essai développé

Les essais peuvent être classés en trois familles selon le type de sollicitation produisant la fissuration : les essais de soudage autobridés, les essais de soudage sollicités extérieurement et les essais de simulation du cycle thermique de soudage [3]. L'essai développé sur la figure 6 fait partie des essais provoquant la fissuration par sollicitation extérieure. La tôle est sollicitée avec un déplacement croissant dans la longueur. Une fois la tôle en traction, une ligne de fusion sera faite au centre. L'instrumentation de l'essai permettra d'obtenir de nombreuses mesures : thermiques par des thermocouples, mécaniques par des jauges de déformation mais aussi une visualisation en temps réel de la zone pâteuse par une caméra rapide.

##### IV.2. Modélisation

L'essai présenté ci-dessus sera modélisé et les résultats de mesures permettront d'alimenter l'étude. Pour chaque étape, l'approche bi phasique est mise en place. Effectivement, on se situe dans la zone pâteuse où la phase liquide coexiste avec la phase solide [5]. Cette modélisation se décompose en trois étapes [4,6] :

- **La modélisation thermique**, définie par le chemin de solidification de l'alliage et par l'équation de conservation de la chaleur.
- **La modélisation mécanique**, définie par l'équation d'équilibre et nécessitant les champs de température ainsi que la fraction solide en tout point de la soudure.
- **La résolution du critère de fissuration**, utilisant l'équation de conservation de la quantité de mouvement couplée à l'équation de Darcy. Des simplifications sont faites à l'aide des travaux de Rappaz. [6]

Sur la figure 7, le schéma récapitulant les différentes étapes de la modélisation est présenté.

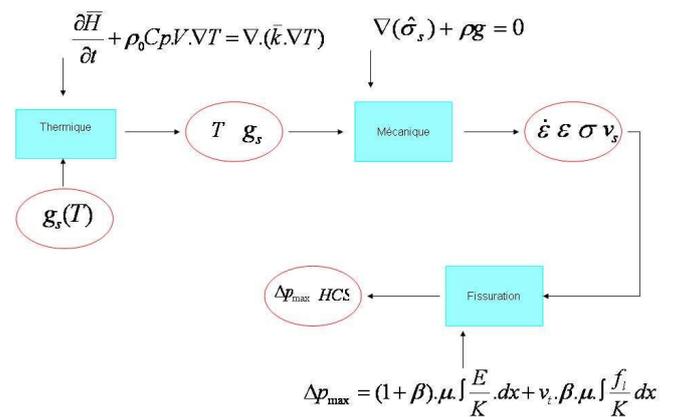


FIGURE 7 : Modélisation générale

Le modèle utilisé sera ensuite testé pour différents cas de soudage et permettra de déterminer si la fissuration a lieu. Des essais seront fait pour valider cette modélisation.

## V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La mise en place de cette méthode permettra d'interpréter les mesures couplées pour minimiser les risques vis à vis de la fissuration à chaud. La réalisation de l'essai et son instrumentation donneront les données nécessaires à la simulation et valideront par la suite les résultats de la modélisation. La visualisation de la zone pâteuse reste un point important de cette étude pour caractériser l'initiation de la fissure dans la zone pâteuse. Dans un premier temps, le critère de fissuration utilisé sera celui de R-D-G [6]. Ensuite, des corrélations entre les paramètres du procédé et les conditions thermomécaniques locales seront menées pour tenter d'accroître les performances du soudage tout en limitant les risques de fissuration à chaud.

### RÉFÉRENCES

- [1] Cerri - Rupture à chaud des aciers en cours de solidification. Thesis, Ecole des Mines de Paris, 2007.
- [2] Fabrègue - Microstructure et fissuration à chaud lors du soudage laser dalliages. Thesis, INPG, 2004.
- [3] Kerrouault - Fissuration à chaud en soudage. Thesis, CEA, 2001.
- [4] Hamide - Modélisation numérique du soudage. Thesis, MINES PARIS, 2008.
- [5] Mathier - Two-Phase Modelling of Hot Tearing. Thesis, EPFL, 2007.
- [6] Rappaz, « A new hot tearing criterion, » *Metallurgical and materials transactions A* 1999, 30A, 449.
- [7] Wisniewski, « Identification dun critère de fissuration à chaud lors du soudage par faisceau délectrons de lalliage CuCrZr » CEA 2007.
- [8] [http ://www.soudeur.com/](http://www.soudeur.com/)

# Capteurs optiques appliqués à la détection de biomolécules

Caroline DESFOURS<sup>1</sup> (Doctorante 3e année)  
Pascal ETIENNE<sup>2</sup>, Csilla GERGELY<sup>3</sup> (Directeurs de thèse)

Groupe d'Etude des Semi-conducteurs  
Université des Sciences  
34095 MONTPELLIER cedex 5, France

<sup>1</sup>desfours@ges.univ-montp2.fr  
<sup>2</sup>petienne@univ-montp2.fr, <sup>3</sup>gergely@ges.univ-montp2.fr

**Résumé** – La spectroscopie par guide d'onde est une technique optique à onde évanescente très sensible et rapide permettant de détecter des objets biologiques à l'échelle du micron comme les bactéries ou un ensemble de cellules en solution aqueuse. Mon travail de thèse porte sur l'élaboration d'un nouveau type de guide d'onde planaire à partir d'un substrat poreux et d'améliorer la sensibilité de ce guide lors de l'adsorption de molécules en couches minces.

**Mots-clés** – sol-gel ; porosité ; guide d'onde optique planaire ; adsorption.

## I. INTRODUCTION

Les guides d'onde optiques planaires sont utilisés depuis des années pour détecter des matériaux biologiques à la surface du capteur en milieu aqueux. Ces systèmes sont basés sur le phénomène de variation de l'indice de réfraction effectif du mode de surface induit par une variation de l'indice de réfraction du milieu aqueux. Ce changement est détecté par un champ évanescent optique diminuant exponentiellement à partir de la surface du capteur. Dans un guide d'onde conventionnel, la profondeur de pénétration du champ évanescent est limitée à 100 nm.

Récemment, un nouveau design de guide d'onde avec la dite symétrie inversée a été mis en place par R. Horvath et al.<sup>1</sup> afin de pallier aux limites de la profondeur de pénétration du champ évanescent dans le milieu aqueux. Dans ce système, l'indice de réfraction du substrat  $n_s$  est très inférieur à l'indice de réfraction du milieu aqueux  $n_c$ , c'est-à-dire inférieur à 1,2. Il est difficile de trouver un tel substrat, à part utiliser l'air ou des matériaux poreux tels les aérogels.

Les aérogels de silice sont les solides les plus poreux connus, avec une fraction volumique de l'ordre de 99,9%. Ils sont obtenus par procédé sol-gel. Le principe de ce procédé, autrefois appelé « chimie douce », repose sur l'utilisation d'une succession de réactions d'hydrolyse-condensation, à température ambiante, pour préparer des réseaux d'oxydes, qui peuvent être à leur tour traités thermiquement. La méthode de synthèse utilisée a été proposée par S. S. Prakash et al.<sup>2</sup> en 1995 et permet d'atteindre une porosité maximum des gels déposés en couches minces.

La réalisation du guide d'onde sera complétée par le dépôt d'un film guidant de polymère sur le substrat poreux et l'impression d'un réseau de diffraction sur le film. En vue d'une application dans le domaine des biomatériaux (recouvrement de surface d'implants dentaires), nous nous sommes intéressés à la caractérisation de films à base de

polyélectrolytes, notamment la poly-L-lysine (cationique) et la caséine (anionique).

## II. REALISATION DU GUIDE D'ONDE A SYMETRIE INVERSEE

### II.1. Propagation de la lumière dans les guides d'onde planaires - Principes

La configuration d'un guide d'onde conventionnel consiste en un film guidant (indice de réfraction  $n_f$ ) encadré par un substrat (indice  $n_s$ ) et un milieu couvrant (indice  $n_c$ ). Le milieu couvrant est typiquement un échantillon aqueux à analyser. Les indices de réfraction sont choisis de telle sorte que  $n_f > n_s > n_c$ . Un réseau de diffraction imprimé sur le film augmente la sensibilité dans le guide.

A certains angles discrets entre la normale au réseau de diffraction et le faisceau laser incident, la lumière peut être couplée et se propage alors par réflexion totale interne (RTI) au sein du film guidant (cf. Figure 1). En dépit du fait que la lumière ne peut se propager dans les milieux autour, le profil transversal du mode lumineux guidé s'étend toutefois dans le substrat et le milieu couvrant ; c'est ce qu'on appelle le champ évanescent.

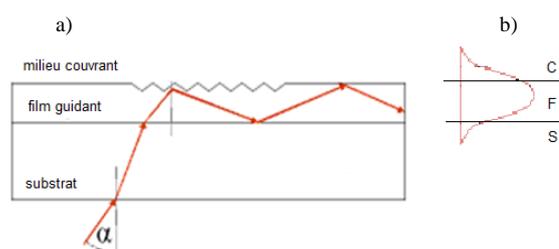


Figure 1 : Schéma du biocapteur : a) Propagation de la lumière par RTI dans le film guidant ; b) Profil transversal du mode lumineux : onde guidée dans F et onde évanescente dans C et S.

L'indice de réfraction effectif  $N$  du mode détecté par l'onde évanescente est donné par l'équation du réseau :

$$N = n_c \cdot \sin(\alpha) + l \cdot \lambda / \Lambda \quad (1)$$

Avec  $\alpha$  l'angle de couplage de la lumière sur le réseau,  $l$  l'ordre de diffraction,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $\Lambda$  la période du réseau.

R. Horvath et al.<sup>2</sup> ont démontré qu'un guide d'onde à symétrie inversée ( $n_s < n_c$ ) capte de plus grandes substances biologiques dans son champ évanescent qu'un guide d'onde conventionnel ( $n_s > n_c$ ). Une couche de silice poreuse a donc

été élaborée et intercalée entre un support en verre et le film guidant afin de créer un substrat de bas indice de réfraction.

Avec cette nouvelle configuration et simplement en choisissant l'épaisseur correcte du film guidant, on peut ajuster la profondeur de pénétration du champ évanescent. Les guides d'onde appelés monomodes, juste assez épais pour permettre la propagation des deux modes d'ordre zéro (polarisations transverse électrique TE et transverse magnétique TM de la lumière), sont les plus sensibles aux perturbations dans la couche adsorbée.

## II.2. Synthèse du substrat poreux

Le procédé sol-gel permet de passer de l'état sol à l'état gel par des réactions d'hydrolyse et de condensation (cf. Figure 2). Un aérogel est obtenu par séchage supercritique d'un gel extrêmement poreux, mais en raison de la dangerosité et du coût de cette manipulation, nous avons privilégié le procédé proposé par S. S. Prakash et al.<sup>1</sup> à pression ambiante.

La synthèse d'aérogels de silice se déroule suivant une catalyse en 2 étapes. D'abord, on hydrolyse du tetraethoxysilane  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  (TEOS) en milieu acide HCl 1M en présence d'éthanol (EtOH) suivant le rapport molaire  $1\text{TEOS} : 3.8\text{EtOH} : 1.1\text{H}_2\text{O} : 7 \cdot 10^{-4}\text{HCl}$ . Le mélange est porté à  $70^\circ\text{C}$  à reflux et sous forte agitation pendant 90 min. La solution obtenue est appelée solution mère. Ensuite, on ajoute de l'éthanol à cette solution en milieu basique  $\text{NH}_4\text{OH}$  0.05M avec le rapport volumique 10solution mère :  $1\text{NH}_4\text{OH} : 44\text{EtOH}$ . Après agitation à température ambiante, on place le sol (mélange stable d'oligomères colloïdaux et de petites macromolécules) à l'étuve à  $50^\circ\text{C}$ .

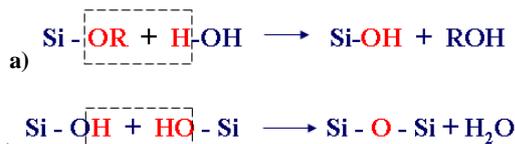


Figure 2 : Le procédé sol-gel : a) Hydrolyse ; b) Condensation, avec  $\text{R} = \text{C}_2\text{H}_5$ .

Le sol devient un gel au bout de 24h ; un gel est constitué d'un réseau d'oxyde tridimensionnel gonflé par le solvant, avec des liaisons chimiques assurant la cohésion mécanique du matériau, lui donnant un caractère rigide, non déformable. On laisse alors vieillir le gel obtenu pendant 24h supplémentaires à l'étuve à  $50^\circ\text{C}$  afin d'augmenter la rigidité et la force réseau poreux Si-O-Si.

L'étape clé dans la réalisation de ces aérogels consiste à retirer le solvant emprisonné dans le gel mouillé tout en maintenant l'intégrité du gel et sa forte porosité. Comme on souhaite travailler à pression ambiante, on va devoir réduire au maximum la pression capillaire et pour cela, on va rendre le gel hydrophobe. On procède à une série de lavages ; d'abord dans l'éthanol puis dans l'hexane pour ôter l'eau contenue dans les pores. En effet, le trimethylchlorosilane (TMCS), utilisé pour la modification de surface, réagit violemment avec l'eau, tandis qu'il est stable avec le n-hexane qui possède par ailleurs une basse tension de surface.

Le gel est ensuite immergé pendant 22h dans un mélange 5TMCS/95hexane. Ce traitement est nécessaire pour parvenir à une silylation suffisante du gel mouillé pour réduire la tension de surface induite par le séchage. Les groupements organiques du TMCS vont capter les silanols Si-OH résiduels à la surface du gel ainsi la pression capillaire dans les pores va être réduite au cours du séchage, rendant la contraction du gel réversible. On effectue un lavage post-silylation dans l'hexane pour réduire l'énergie de surface solide-vapeur du fluide. En

conséquence, la pression capillaire est considérablement diminuée lorsque le fluide entre dans les pores.

Afin de déposer le gel en film mince, on le liquéfie aux ultra-sons dans l'hexane (environ 20g dans 50mL). On obtient une solution transparente et homogène que l'on va concentrer jusqu'à l'obtention d'une viscosité adéquate pour un dépôt par dip-coating.

Le dip-coating ou « trempage-retrait » consiste à immerger un substrat dans une cuve contenant la solution à déposer en couche mince, d'ôter la pièce et la laisser sécher. La vitesse de dépôt est comprise entre 0.7 et 1.2 cm/sec pour des épaisseurs de couches d'aérogel de l'ordre de  $1\mu\text{m}$ . La silylation prend tout son sens lors du séchage du film lors du dip-coating. En effet, elle gêne la condensation des silanols et évite la contraction du gel. C'est ce qu'on appelle l'effet « springback ».

Pour parfaire la porosité du substrat poreux, on le traite thermiquement à  $500^\circ\text{C}$  pendant 1h.

## II.3. Système capteur biologique

Le guide d'onde à symétrie inversée est composé d'un substrat de silice poreuse, recouvert d'un film guidant de polystyrène et imprimé d'un réseau à partir d'un tampon en polydiméthylsiloxane par répllication en lithographie douce.

Parce qu'un dépôt direct du polystyrène par spin-coating sur le substrat poreux est impossible en raison du risque de remplissage des pores, une autre technique est utilisée, créant un film de polystyrène flottant à la surface de l'eau et appelée dip-floating. Ce film est ensuite transféré sur le substrat poreux et traité thermiquement.

Le tampon est ensuite appliqué sur la structure à  $120^\circ\text{C}$  pendant 30 minutes. Après refroidissement, il est enlevé et le guide d'onde à symétrie inversée est prêt à l'emploi (cf. Figure 3).

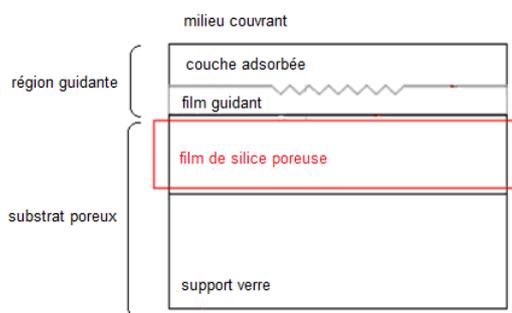


Figure 3 : Schéma de la structure finale du guide d'onde à symétrie inversée avec adsorption d'une fine couche de molécules en milieu aqueux.

## II.4. Méthodes de caractérisation

L'épaisseur des films de silice poreuse est mesurée par microscopie à force atomique (MFA) en mode tapping car la couche est trop tendre pour être caractérisée au profilomètre. Par ellipsométrie porosimétrique (EP), méthode basée sur la détection du changement d'état de polarisation de la lumière après réflexion en incidence non normale sur la surface à étudier, l'indice de réfraction et l'épaisseur du film de silice poreuse sont déterminés au cours de l'adsorption-désorption d'éthanol gazeux. A partir de l'équation de Lorentz-Lorenz<sup>3</sup>, l'indice de réfraction est converti en volume poreux.

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = V_p \frac{n_p^2 - 1}{n_p^2 + 2} + (1 - V_p) \frac{n_s^2 - 1}{n_s^2 + 2} \quad (2)$$

Avec  $n_s$  l'indice du squelette silicié,  $n_p$  l'indice de l'air et  $n$  l'indice du film de silice poreuse.

Le réseau de diffraction imprimé sur le film de polystyrène est caractérisé par microscopie électronique à balayage (MEB) et par MFA afin d'évaluer sa profondeur et sa période.

Par spectroscopie optique par guide d'onde (OWLS), l'épaisseur et l'indice de réfraction de la couche de molécules adsorbées sont déterminées et ce, à partir des déplacements des indices de réfraction effectifs  $N$  des modes guidés TE et TM.

### III. RESULTATS

#### III.1. Caractérisation du substrat poreux

Le film de silice poreuse doit être suffisamment épais pour isoler le film guidant du support de verre, sinon la symétrie inversée n'est pas prise en compte lors de la propagation de la lumière dans le guide d'onde.

On obtient un film d'épaisseur de l'ordre de 880 nm estimé par des mesures MFA (cf. Figure 4). L'épaisseur voulue étant atteinte, reste à caractériser la porosité du film.

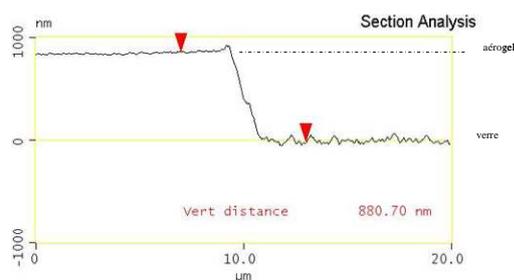


Figure 4 : Mesure de l'épaisseur du film de silice poreuse par MFA

Lors des mesures ellipsométriques ( $\lambda=632.8$  nm), les pores alors vides du film sont remplis sous pression de vapeur contrôlée d'éthanol jusqu'à saturation, puis vidés.

L'indice de réfraction  $n$  est de 1.15, ce qui correspond à un volume poreux de 64% d'après (2). On prend  $n_s=1.46$  et  $n_p=1$ .

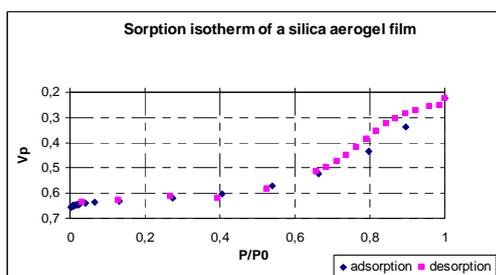


Figure 5 : Détermination du volume poreux  $V_p$  du film de silice poreuse par EP

On est bien dans une configuration inverse avec  $n_s=1.15 < n_c$ .

#### III.2. Caractérisation du réseau de diffraction

Un réseau de diffraction est constitué d'une série de lignes parallèles également espacées. L'efficacité du réseau est fonction de la forme des lignes, de l'angle d'incidence et de la réflectance de la couche.

Le réseau a été répliqué conformément au modèle (cf. Figure 6a). On mesure une périodicité de 480 nm et une profondeur comprise entre 5 et 15 nm (cf. Figure 6b).

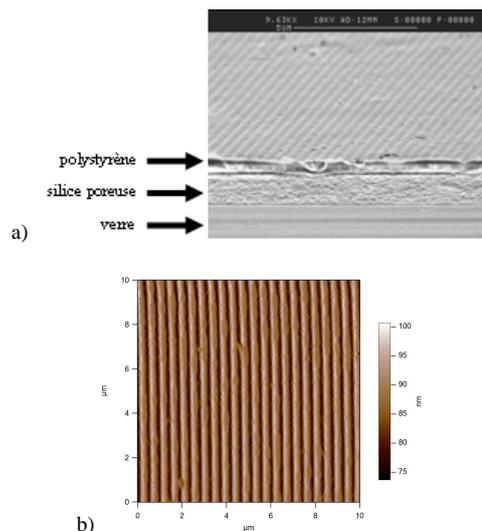


Figure 6 : Imagerie du réseau de diffraction : a) MEB ; b) MFA.

#### III.3. Application à la détection de biomolécules

Les dentistes utilisent la protéine de caséine (protéine du lait) pour former une couche de protection à la surface de la dent dans le but de complexer des ions calcium et phosphate, ce qui permet d'éviter l'apparition de carie. L'OWLS se révèle être la technique de détection la plus appropriée pour quantifier l'adsorption de cette protéine sur un guide d'onde optique et ce, en très faible quantité.

Ici, le système (fait maison) qui supporte le guide pivotote, tandis qu'un faisceau laser fixe He-Ne avec une longueur d'onde  $\lambda = 632.8$  nm illumine le réseau de diffraction positionné au centre de la rotation. La lumière couplée est collectée aux extrémités du guide par des photodiodes. De cette manière, l'intensité est contrôlée en fonction de l'angle d'illumination  $\alpha$ , varié par rotation mécanique à l'aide d'un moteur (contrôlé par l'ordinateur) pas à pas de haute précision. Une cellule de mesure avec des tubes connectés à une pompe péristaltique est positionnée sur le dessus du guide d'onde, ce qui rend possible le flux de divers liquides à la surface du guide (cf. Figure 7).

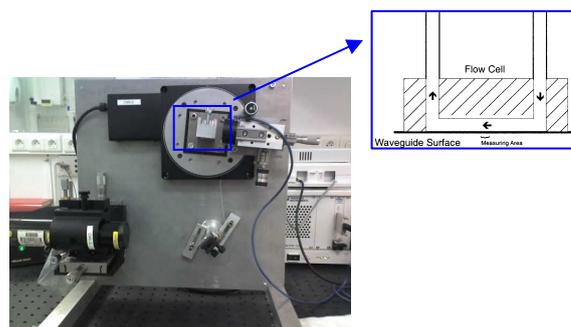


Figure 7 : Montage expérimental avec zoom sur la cellule de mesure.

Au début de l'expérience, une solution tampon (HEPES/NaCl, pH = 7,4) est envoyée dans la cellule de mesure à débit constant (8 mL/h) avec un pousse-seringue jusqu'à ce que des valeurs constantes des angles de couplage soient atteintes. Ces valeurs serviront de référence pour la suite de l'expérience. Ensuite, le flux de tampon est stoppé et une solution de poly-L-lysine (PLL) est injectée dans la cellule. Lorsqu'un signal d'adsorption stable est obtenu, le flux de tampon repart pour 30 minutes afin de rincer le polyélectrolyte

en excès dans la cellule. Il reste alors une fine couche de polyanions adsorbée à la surface du guide. De la même façon, une solution d' $\alpha$  caséine est injectée et une fine couche de polycations se forme sur la PLL.

A chaque injection, on observe des shifts de l'angle de couplage  $\alpha$  pour les modes TE et TM. A partir de l'équation (1), on détermine les indices de réfraction effectifs des modes (cf. Figure 8).

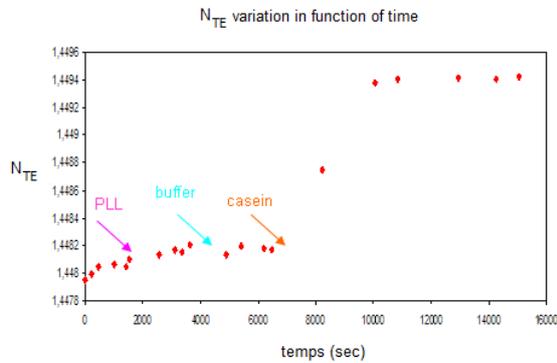


Figure 8 : Variation de l'indice de réfraction effectif du mode TE en fonction des couches adsorbées.

A partir des résultats obtenus, il est possible d'évaluer l'indice et l'épaisseur de la couche adsorbée suivant la condition d'existence du mode<sup>4</sup> :

$$2k_z \cdot r d_F + \Phi_{F,S} + \Phi_{F,C} = 2\pi m \quad (3)$$

Avec  $2k_z \cdot r d_F = 2\pi N/\lambda$ ,  $\Phi_{F,S}$  et  $\Phi_{F,C}$  les shifts de phase dus aux réflexions film-milieu couvrant et film-substrat. Du fait qu'il existe deux polarisations orthogonales pour chaque mode TE et TM, on double le nombre de paramètres disponibles.

Malheureusement, la largeur à mi-hauteur des pics correspondant aux shifts de l'angle de couplage n'étant pas correctement définie, nous n'avons pu mener plus loin notre étude au jour d'aujourd'hui.

Cependant, les résultats sont encourageants et démontrent de l'efficacité de notre guide quant à la mesure de l'indice effectif à  $10^{-4}$  près.

#### IV. CONCLUSION

Le premier objectif de ce travail qui était de réaliser des substrats poreux d'épaisseur proche du micromètre avec une forte porosité a été atteint. Des guides d'ondes à symétrie inversée ont ensuite été élaborés à partir du substrat précédemment cité et testés en solution aqueuse. Une réponse a été obtenue, cependant, la largeur des pics impose une incertitude sur l'évaluation de l'indice et de l'épaisseur des couches adsorbées. D'autres motifs de réseaux et un travail en salle blanche devraient permettre de pallier à ces inconvénients.

Par la suite, à partir de la formule de Feitjer<sup>5</sup>, nous serons aptes à déterminer la masse de molécules adsorbées. Dans des travaux futurs, nous souhaitons tester d'autres types de films guidants, comme le téflon, pour voir s'il est possible d'adsorber et de quantifier des molécules hydrophobes à la surface du guide.

Un problème persistant reste le nettoyage du guide, qui est pour l'instant à usage unique et implique donc un certain coût.

#### V. REFERENCES

- [1] R. Horvath et al. / Journal of Micromechanics and Microengineering 15 (2005) 1260-1264.
- [2] S. S. Prakash et al. / Journal of Non-Crystalline Solids 190 (1995) 264-275.
- [3] V. Rouessac et al. / Journal of Porous Materials 12 (2005) 113-121.
- [4] W. Lukosz et al. / JACS 6:2 (1989) 209.
- [5] J.J. Ramsden / Chimia 53 (1999) 67-71.

# Raies polarisées de l'hydrogène en émission dans les étoiles Miras un mystère derrière le choc

Nicolas FABAS <sup>1</sup> (Doctorant 1ere année)  
Agnès LÈBRE <sup>2</sup>, Denis GILLET <sup>3</sup> (Directeurs de thèse)

Groupe de Recherche en Astronomie et Astrophysique (GRAAL)  
Université Montpellier 2  
34095 MONTPELLIER cedex, France

<sup>1</sup>fabas@graal.univ-montp2.fr

<sup>2</sup>lebre@graal.univ-montp2.fr, <sup>3</sup>denis.gillet@oamp.fr

**Résumé**— Nous présentons une étude spectropolarimétrique complète (dans les paramètres de Stokes I,Q,U et V) sur omicron Ceti, le prototype des étoiles Miras dans l'atmosphère desquelles se propagent des ondes de choc. Cette étude est faite avec des observations de l'instrument NARVAL au TBL (Télescope Bernard Lyot) situé à l'observatoire du Pic du Midi.

Nos observations, faites à partir de septembre 2007, nous ont permis de confirmer la découverte faite par McLean & Coyne (1978) de l'existence d'une contrepartie polarimétrique sur les raies en émission de l'hydrogène dans le visible (série de Balmer) pour omicron Ceti. On savait que les ondes de choc dans les Miras donnaient lieu à des raies de Balmer en émission (en intensité I) mais aucune observation polarimétrique (dans les autres paramètres de Stokes Q,U,V) de ce phénomène n'avait été faite jusqu'alors. Mais McLean & Coyne (1978) n'avaient observé omicron Ceti qu'à une seule date autour du maximum de novembre 1977 et sur une seule raie d'hydrogène, la raie H $\beta$ .

Nos observations nous ont permis d'obtenir des spectres polarimétriques sur plusieurs raies de l'hydrogène, au minimum comme au maximum de luminosité, nous permettant de compléter le travail de McLean & Coyne (1978). Le résultat principal de cette étude est que ces raies en émission polarimétrique suivent la propagation de l'onde choc dans l'atmosphère. Nous avons donc un phénomène de polarisation au sein de notre onde de choc que nous associerons à l'apparition d'un champ électromagnétique.

**Mots-clés**— spectropolarimétrie, ondes de choc, étoiles Miras

## I. INTRODUCTION

### I.1. Physique stellaire

Les étoiles Miras sont des étoiles froides, évoluées et variables, le prototype étant omicron Ceti (auss appelé Mira).

Ce sont des étoiles pulsant radialement avec des longues périodes de variation de luminosité (par exemple, la période d'o Ceti est 332 jours ; voir Fig. 1 et 3). Ces étoiles évoluées sont caractérisées par une atmosphère froide, très étendue et entourée d'une enveloppe circumstellaire.

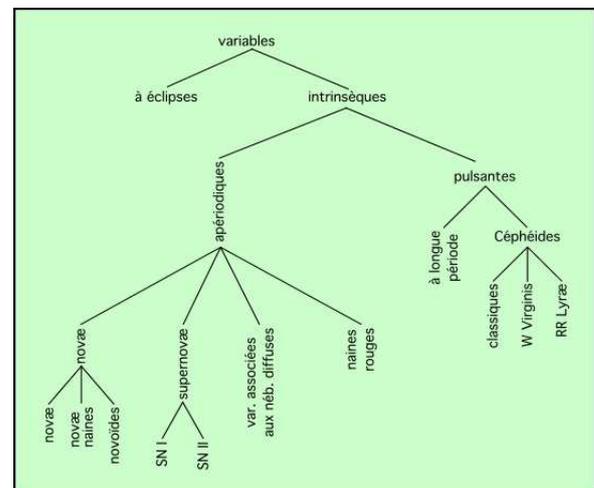


FIG. 1 : Classification des étoiles variables. Les étoiles Miras considérées sont des étoiles variables intrinsèques pulsantes à longue période

Du maximum au minimum de lumière, le type spectral <sup>1</sup> d'omicron Ceti varie de M5 à M9 ce qui correspond à une

<sup>1</sup>Le type spectral d'une étoile représente en fait un domaine de température dans lequel se situe l'étoile. On a une série de lettres

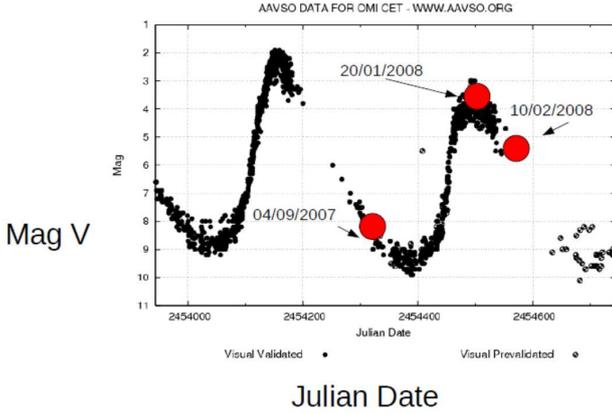


FIG. 2 : Courbe de luminosité d'omicron Ceti donnée en magnitude visible.  $MagV = -2.5 * \log_{10}(F_V) + F_0$  où  $F$  est le flux de lumière reçu de l'étoile, c'est-à-dire une luminosité (Watts) par unité de surface ( $m^2$ ).  $F_0$  est le flux de référence pris sur l'étoile Véga. Les dates des observations effectuées avec NARVAL sont données en jours juliens, c'est-à-dire en jours depuis une origine fixé au 1er janvier -4713 à midi (le jour 2454000 correspond au 21 septembre 2006 à midi). Cette courbe a été créée sur le site de l'AAVSO (American Association of Variable Stars Observers)

température effective d'environ 3000K (plus froide que le soleil, par exemple, dont la température est de 5800K). D'une manière générale, les Miras peuvent être oxygénées (type spectral M), carbonées (type spectral C) ou riches en éléments s (type spectral S). Sur le diagramme de Hertzsprung-Russell, où l'on trace chaque étoile en fonction de sa luminosité et de sa température, les Miras ne sont pas sur la séquence principale où les étoiles passent la majeure partie de leur vie mais sur la branche dite des AGB (Asymptotic Giant Branch). Cela correspond à un stade très évolué dans la vie de l'étoile qui n'est plus très loin de la mort (voir Fig. 3).

Parmi les caractéristiques des spectres des étoiles Miras, on trouve des raies en émission et plus particulièrement celles des raies de Balmer de l'hydrogène. Ces raies correspondent à des transitions atomiques vers le premier niveau excité produisant de la lumière visible. Les raies de Balmer de l'hydrogène sont observées en émission durant environ 80% de la période de luminosité et sont supposées être formées dans le sillage radiatif d'une onde de choc hypersonique se propageant périodiquement au travers de l'atmosphère stellaire (Fadeyev et Gillet 2004). McLean et Coyne 1978 avaient découvert qu'à ces raies en émission correspondaient des pics de polarisation linéaire.

O,B,A,F,G,K,M, en allant du plus chaud ( $\geq 30.000K$ ) au plus froid ( $\leq 3700K$ ). C'est ce qu'on appelle la classification de Harvard. Le type spectral C correspond au type M en température mais est plus carboné.

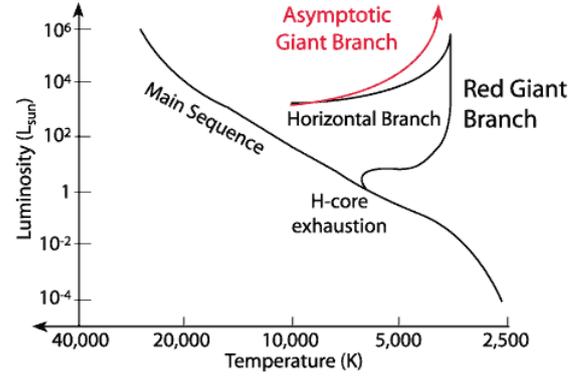


FIG. 3 : Schéma du diagramme de Hertzsprung-Russell (ou juste HR) dans lequel est surligné en rouge la branche des AGB

### 1.2. Spectropolarimétrie

La spectropolarimétrie est l'analyse des quatre paramètres de Stokes I, Q, U, V. I représente l'intensité du rayonnement, Q et U représentent la polarisation linéaire et V représente la polarisation circulaire. Cette polarisation du rayonnement est liée à la position du vecteur champ électrique  $\vec{E}$  dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement. Si on considère la base orthonormée  $(\vec{e}_x, \vec{e}_y)$  appartenant à ce plan, le champ  $\vec{E}$  aura dans cette base les composantes  $E_x$  selon  $\vec{e}_x$  et  $E_y$  selon  $\vec{e}_y$ . Sachant cela, on aura plusieurs cas de figure concernant la polarisation.

1. Les composantes  $E_x$  et  $E_y$  varient en phase  $\rightarrow$  polarisation linéaire
2. Les composantes  $E_x$  et  $E_y$  varient avec une différence de phase de  $\pm 90^\circ \rightarrow$  polarisation circulaire (gauche ou droite selon le signe de la différence de phase)
3. Sinon, on aura une polarisation quelconque, c'est-à-dire elliptique

La lumière reçue des étoiles est une lumière dite naturelle, c'est-à-dire à polarisation quelconque et partielle. Dans cette configuration, on appellera  $I_p$  l'intensité du rayonnement polarisé et  $I$  l'intensité totale. On aura donc  $\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} = I_p \leq I$ . Le système optique que constitue l'instrument NARVAL a pour but de filtrer les composantes de polarisation linéaire ou circulaire de ce rayonnement. Il peut mesurer les valeurs  $I_0^\circ, I_{90^\circ}, I_{45^\circ}, I_{135^\circ}$  (intensités des polarisations linéaires à 0,45,90 et 135°),  $I_G, I_D$  (intensités des polarisations circulaires gauche ou droite) et les utiliser pour donner une mesure des paramètres de Stokes :

$$Q = I_0^\circ - I_{90^\circ}$$

$$U = I_{45^\circ} - I_{135^\circ}$$

$$V = I_G - I_D$$

## II. ANALYSE SPECTROPOLARIMÉTRIQUE

Des signatures spectropolarimétriques sont détectées par le spectropolarimètre NARVAL dans les 4 paramètres de Stokes associées aux raies de Balmer de l'hydrogène (de  $H\alpha$  à  $H\delta$ ).

Raie de Balmer	$H\alpha$	$H\beta$	$H\gamma$	$H\delta$
Longueur d'onde (nm)	656,3	486,1	434,1	410,2

Ces signatures s'avèrent être dépendantes du temps et de surcroît beaucoup plus visibles et structurées au maximum de luminosité quand le choc émerge de la photosphère et se propage avec une haute intensité. Ci-dessous (Fig. 4) sont présentées les signatures pour  $H\beta$  et  $H\delta$  aux trois phases<sup>2</sup> observées ( $\phi=0.58, 1.00$  et  $1.06$  correspondant aux dates suivantes : 04/09/2007, 20/01/2008, 10/02/2008). Des paramètres de Stokes Q & U, la polarisation linéaire dans les raies de Balmer peut être estimée ( $\text{pol. lin.} = \sqrt{Q^2 + U^2}$ , voir Fig. 5). Il convient de noter que NARVAL ne mesure que la polarisation dans les raies et pas celle dans le continu.

## III. RÉSULTATS

Au minimum de luminosité ( $\phi = 0.58$ ), les spectres en Q,U,V sont complètement dominés par le bruit. L'onde de choc est à ce moment-là au plus haut dans l'atmosphère stellaire et a perdu de sa force. La seule signature visible est celle sur  $H\beta$  car le signal sur bruit y est plus important que sur  $H\delta$ .

Au maximum ( $\phi = 1.00$ ), on peut voir que sur  $H\beta$  et  $H\delta$  un signal polarimétrique surgit du bruit dans les 4 paramètres de Stokes. L'onde de choc sort tout juste de la photosphère et a sa pleine puissance. La polarisation est donc maximale. De plus, on remarque que les signatures sont plus intenses dans  $H\delta$  que dans  $H\beta$ . En effet, la capacité d'absorption de l'atmosphère stellaire dépend de la longueur d'onde. Selon la figure 6 de Gillet 1988, la raie  $H\delta$  serait la moins affectée par cette absorption ce qui expliquerait l'aspect de nos spectres.

Enfin, un peu après le maximum ( $\phi = 1.06$ ), on voit que l'onde de choc est toujours aussi puissante et que les signatures polarimétriques sont toujours aussi marquées, particulièrement sur  $H\delta$ .

Cette évolution temporelle est aussi visible lorsque l'on trace la polarisation linéaire à partir de nos données en Q et U autour de  $H\beta$ , comme l'avaient fait McLean & Coyne 1978. La nouveauté ici est que cette polarisation a été mesurée à plusieurs instants différents ce qui nous donne accès à une évolution temporelle. Encore une fois, la polarisation linéaire atteint son maximum à la phase  $\phi = 1.06$ .

## IV. CONCLUSION

Nous confirmons l'unique détection dans la raie  $H\beta$  (McLean et Coyne 1978) sur omicron Ceti observée à son maximum de luminosité : les raies de Balmer de l'hydrogène en émission sont fortement polarisées, beaucoup plus que le

continu local. De plus, le taux de polarisation linéaire dans toutes les raies de Balmer s'avère être dépendant du temps et nul au minimum de luminosité. Nous trouvons que cette polarisation dans les raies d'émission de Balmer est susceptible d'être liée au mécanisme de formation des raies en émission existant au sein du sillage de l'onde de choc qui se propage dans l'atmosphère stellaire à chaque cycle de pulsation. De plus, selon la théorie de l'onde de choc, un champ électromagnétique devrait apparaître juste derrière le front du choc (où les raies en émission sont formées), induisant de la polarisation. À ce jour, ce champ n'a jamais été détecté conclusivement dans les étoiles Miras (ni sur aucun autre type d'étoile à pulsation radiale). Nos observations spectropolarimétriques constituent la première tentative de compréhension et de caractérisation complètes du mécanisme physique associé. Finalement, cette étude pourrait aussi être utile pour la caractérisation de l'onde de choc en fonction de l'étoile centrale.

## V. PERSPECTIVES

Cette étude sur les ondes de chocs s'inscrit dans un domaine plus global : l'étude des interactions entre les Miras et le milieu interstellaire. En effet, les pertes de masse importantes que subissent ces étoiles en fin de vie sont un apport majeur au milieu interstellaire par l'intermédiaire de la formation de nébuleuses planétaires. Les Miras contribuent en grande partie à l'enrichissement de cette matière et les ondes de choc sont un des mécanismes par lequel les atomes créés au cœur des étoiles peuvent être transportés vers la surface.

## RÉFÉRENCES

- [1] Fadeyev, Y.A. & Gillet, D., « The structure of radiative shock wave » *A&A*, vol. 420, pp. 423, 2004.
- [2] Gillet, D., « The Balmer emission profile in Mira stars » *A&A*, vol. 192, pp. 206, 1988.
- [3] McLean, I.S. & Coyne G.V., 1978, *ApJ* 226, p.145, « Spectropolarimetry of o Ceti (Mira) : Discovery of Polarized Balmer Emission » *ApJ*, vol. 226, pp. 145, 1978.

<sup>2</sup>Dans ce contexte, on appelle phase le rapport entre le nombre de jours écoulés depuis le dernier maximum de luminosité et la période de variation. Par exemple, un minimum se trouvera aux alentours de  $\phi \approx 0.5$ .

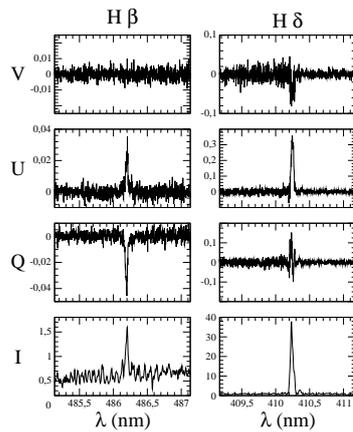
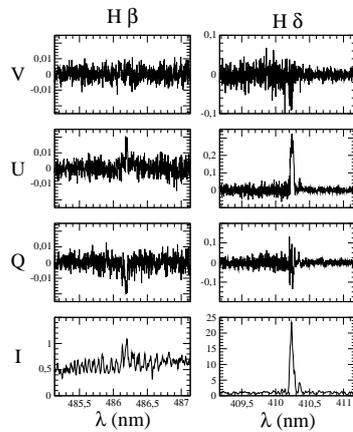
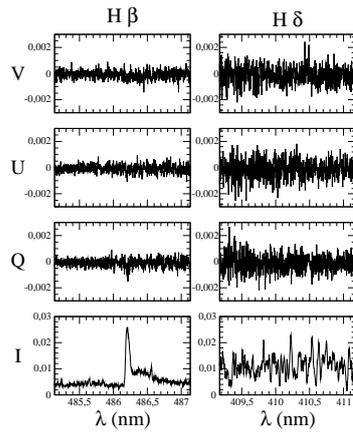


FIG. 4 : Signatures pour  $H\beta$  et  $H\delta$  aux trois phases observées ( $\phi=0.58, 1.00$  et  $1.06$ ). Abscisses : longueur d'onde (nm). Les spectres sont divisés par le continu sur NARVAL donc on a  $I = \frac{I'}{I_c}, Q = \frac{Q'}{I_c}, U = \frac{U'}{I_c}, V = \frac{V'}{I_c}$  où  $I_c$  est l'intensité au continu (déterminée par NARVAL selon le type spectral de l'étoile) et  $I', Q', U', V'$  sont les paramètres de Stokes non-divisés par le continu.  $I, Q, U, V$  sont donc des fractions de  $I_c$ .

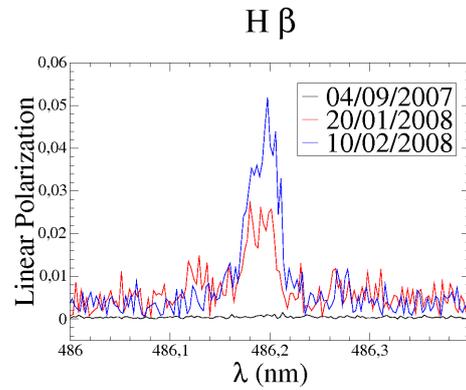


FIG. 5 : Pourcentage de polarisation linéaire pour  $H\beta$  aux trois phases observées ( $\phi=0.58, 1.00$  et  $1.06$ )

# EFFET DU RECUIT POST CROISSANCE SUR L'ANISOTROPIE MAGNETIQUE DANS LES FILMS MINCES DE $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ .

Souleymane KAMARA<sup>1</sup> (Doctorant 3e année)  
Férial TERKI<sup>2</sup>, Salam CHARAR<sup>3</sup> (Directeurs de thèses)

Groupe d'Etude des semiconducteurs  
Université Montpellier II, 34095 Montpellier, France

<sup>1</sup> [kamara@ges.univ-montp2.fr](mailto:kamara@ges.univ-montp2.fr)

<sup>2</sup> [terki@ges.univ-montp2.fr](mailto:terki@ges.univ-montp2.fr), <sup>3</sup> [charar@ges.univ-montp2.fr](mailto:charar@ges.univ-montp2.fr)

**Résumé :** Nous avons étudié l'effet du recuit post croissance sur l'anisotropie magnétique dans les films minces de  $\text{GaMnAs}$ . En combinant les mesures magnétiques et électriques, nous avons observé une nette amélioration des ces propriétés après le recuit. On montre aussi que, l'anisotropie magnétique dans ces échantillons est fortement modifiée. Les modèles théoriques existants nous ont permis de quantifier ces anisotropies en évaluant les constantes d'anisotropie cubique et uniaxiale.

**Mots-clés** – semiconducteurs magnétiques, ferromagnétisme, magnéto-transport, effet Hall, anisotropie magnétique, SQUID.

## I. INTRODUCTION

La miniaturisation des composants électroniques basés sur le transport de charges atteint des limites physiques qu'on ne pourra pas dépasser sans penser aux nouveaux concepts technologiques. L'électronique de spin est une thématique émergente qui exploite l'autre degré de liberté de l'électron, le « spin », en vue de stocker des informations. Le  $\text{GaMnAs}$  est l'un des semiconducteurs magnétiques dilués le plus prometteur due à sa température de Curie ( $T_C$ ) élevée et à ses propriétés magnétiques [1]. Depuis ces dix dernières années, le  $\text{GaMnAs}$  fait l'objet de plusieurs études. En effet, la réalisation de dispositifs dédiés à l'électronique de spin à base de semiconducteurs magnétiques dilués nécessite une bonne compréhension des processus de retournement de l'aimantation et une maîtrise de l'anisotropie magnétique. Il a été montré que cette anisotropie est liée au couplage spin-orbite entre les porteurs libres (trous) et les moments magnétiques des atomes de manganèse. Elle est aussi fortement liée aux contraintes structurales et à la température [2]. Plusieurs techniques expérimentales sont utilisées pour mettre en évidence et quantifier cette anisotropie, le SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), la résonance ferromagnétique, l'imagerie magnéto-optique à haute résolution, et l'effet Hall planaire [3] [4]. Ces études montrent qu'à basse température  $T \ll T_C$ , l'anisotropie est

gouvernée par les axes cristallographiques cubiques (100). En revanche, il existe peu d'études sur l'influence du recuit post croissance sur l'anisotropie magnétique [3]. Nous présentons dans cet article une étude de l'anisotropie magnétique en combinant les mesures SQUID et de la résistance de Hall planaire (RHP) sur les échantillons de  $\text{GaMnAs}$  non recuits et recuits.

## II. ECHANTILLONS ET DETAILS EXPERIMENTAUX

### II. 1. ECHANTILLONS

#### II. 1. 1. CROISSANCE

Le  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  est déposé sur un substrat semi-isolant de  $\text{GaAs}$  (001) par épitaxie par jets moléculaires (MBE) à basse température,  $T = 230^\circ\text{C}$ . Habituellement cette température varie entre  $590^\circ - 640^\circ$  dans le cas par exemple de la croissance du  $\text{GaAs}$ . Lors de la croissance, un atome de manganèse (Mn) remplace un atome de galium (Ga) dans la structure de  $\text{GaAs}$ , ils sont notés  $\text{Mn}_{\text{Ga}}$ . Le  $\text{Mn}_{\text{Ga}}$  est accepteurs, il introduit alors dans la structure un moment magnétique de spin localisé  $S=5/2$  et un porteur libre (trou). La croissance à basse température permet une meilleure solubilité du manganèse dans l'échantillon. En revanche, cette technique de croissance à basse température génère des défauts de structures (Figure.1a) comme les antisites d'arsenic ( $\text{As}_{\text{Ga}}$ ): l'arsenic se substitue au Ga. Les manganèses en position interstitiel ( $\text{Mn}_i$ ) qui sont doubles donneurs, ils compensent les porteurs libres (trous) et constituent une véritable barrière à l'augmentation de la température de Curie. Le record actuel de cette température est de 188K, l'objectif étant d'atteindre la température ambiante, soit  $T_C \sim 300\text{K}$  [5].

#### II. 1. 2. RECUIT POST CROISSANCE

Contrairement aux antisites d'arsenic, les  $\text{Mn}_i$  peuvent d'être diffuser du volume vers la surface par un recuit après la croissance. Ces  $\text{Mn}_i$  sont ensuite passivés par oxydation ou en ajoutant un élément réactif à la surface. La première méthode donne de bons résultats mais demande des temps de recuits

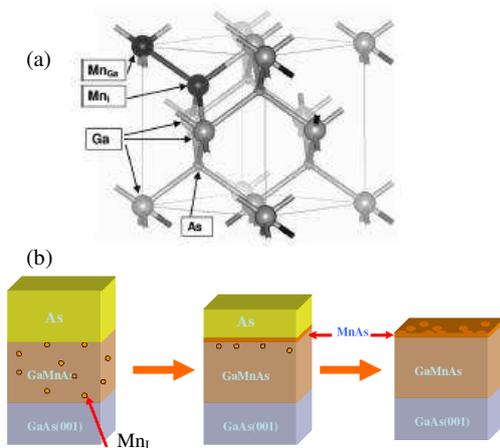


Figure 1 : (a) Structure zinc-blende du GaMnAs. (b) procédure du recuit post croissance avec passivation des Mn interstitiels.

très long (> 100 heures). Notre méthode est la deuxième, elle consiste à déposer une couche d'arsenic amorphe sur la surface pendant le recuit (figure 1b) [6]. Cette technique développée par notre équipe donne de très bons résultats avec des temps de recuit plus courts, entre 1–3h.

## II. 1. DÉTAILS EXPÉRIMENTAUX

Les mesures de transport sont effectuées sur des motifs de barre de Hall de 150  $\mu\text{m}$  de largeur, fabriqué en salle blanche par photolithographie et gravure chimique. Le courant est injecté le long de la barre de Hall qui est toujours gravée suivant la direction cristallographique [110]. L'échantillon est monté sur une canne, sur laquelle est monté un moteur « pas à pas » pour des mesures en rotation. L'échantillon est ensuite refroidi dans un cryostat à bain d'hélium qui permet de faire des mesures à toutes températures comprises entre 3K – 300K. Le cryostat est logé entre deux bobines qui nous permettent d'appliquer un champ magnétique graduellement entre  $\pm 5\text{kOe}$  (figure 3). Deux séries de mesures ont été effectuées. La première, en fixant la direction du champ magnétique  $\varphi_H$  par rapport à la direction du courant, nous avons mesuré la résistance de Hall planaire (RHP) en fonction de l'intensité du champ magnétique de  $-H$  à  $+H$ . Puis dans la deuxième, en fixant une valeur du champ magnétique  $H$ , on mesure la RHP en fonction de l'angle  $\varphi_H$  en le faisant varier de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ . La figure 2 résume le schéma expérimental avec les différentes orientations du courant, de l'aimantation, et du champ magnétique. Ces mesures de transport ont été précédées des mesures directes d'aimantation par le SQUID.

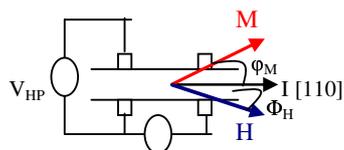


Figure 2 : Schéma de la géométrie utilisée pour les mesures de la RHP avec les orientations de l'aimantation  $M$  et du champ magnétique  $H$  par rapport au courant  $I$ .

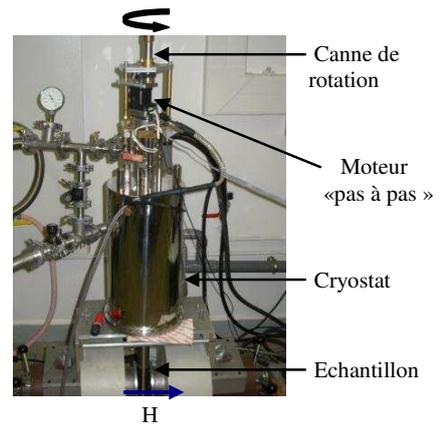


Figure 3 : Dispositif expérimental.

## III. THÉORIES

### III. 1 AIMANTATION

Comme tous matériaux magnétiques, le GaMnAs est caractérisé d'une part sa température de Curie définie par [7] :

$$T_C \sim P^{1/3} \cdot x_{\text{eff}} \cdot N_0 \cdot \beta^2 \cdot \rho_S \quad (1)$$

La concentration de trous  $P$ , et  $x_{\text{eff}} \cdot N_0$  la concentration effective de Mn en substitution du Ga sont des paramètres physiques déterminants pour optimiser la  $T_C$ .  $\beta$  est l'intégrale d'échange et  $\rho_S$  la densité d'état de spin. D'autre part, lorsqu'on applique un champ magnétique externe suffisamment élevé à un matériau magnétique, l'aimantation de ce dernier s'aligne suivant la direction de l'application du champ magnétique. On dit que l'échantillon est saturé, cette aimantation à saturation (valeur maximale de l'aimantation) est donné par :

$$M_s = x_{\text{eff}} \cdot N_0 \cdot g \cdot S \cdot \mu_B \quad (2)$$

avec  $g$  le facteur de Lande,  $S$  le spin du manganèse et  $\mu_B$  le magnéton de Bohr.

### III. 2 EFFET HALL PLANAIRE

Nous nous intéressons en particulier à l'anisotropie magnétique dans les couches minces de GaMnAs à aimantation planaire. Pour cela, nous avons utilisé la technique de l'effet Hall planaire, qui consiste à appliquer le champ magnétique dans le plan des couches contrairement à l'effet Hall « classique » où le champ est appliqué perpendiculairement au plan des couches. Dans ce cas la résistance de Hall planaire (RHP) est décrit par :

$$R_{\text{HP}} = (R_{//} - R_{\perp}) \cdot \sin(\varphi_M) \cdot \cos(\varphi_M) \quad (3)$$

$R_{//}$  et  $R_{\perp}$  sont des résistances du matériau lorsque l'aimantation est parallèle et perpendiculaire au courant respectivement,  $\varphi_M$  est l'angle entre l'aimantation et la courant. La RHP ne dépend que de l'orientation de  $M$ , un changement de direction  $\varphi_M$  entrainera un changement au niveau de la RHP. L'analyse de la RHP peut nous fournir les informations concernant l'anisotropie magnétique et le processus de retournement de l'aimantation dans le GaMnAs.

L'énergie libre d'un système ferromagnétique monodomaine peut être décrit par le model de Stoner – Wohlfarth :

$$E = K_U \cdot \cos(\varphi_M) + K_C/4 \cdot \cos(2\varphi_M) - M \cdot H \cdot \cos(\varphi_M - \varphi_H) \quad (4)$$

Avec  $K_U$ ,  $K_C$  constantes d'anisotropie uniaxiale et cubique,  $\varphi_M$  et  $\varphi_H$  les orientations de  $M$  et  $H$  par rapport au courant  $I$ . L'évaluation de ces constantes d'anisotropie nous donnera des informations qualitatives sur l'anisotropie magnétique dans le GaMnAs. On pourra par la suite déduire les orientations réelles  $\varphi_M$  de l'aimantation.

#### IV. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSIONS

##### IV.1 MESURES SQUID

Nous avons étudié l'influence du recuit post croissance sur l'anisotropie magnétique. A cet effet, des mesures d'aimantation sur deux échantillons de  $\text{Ga}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{As}$  de 20 nm d'épaisseur ont été effectuées. Le premier, non recuit (# 1) et le second recuit pendant 2h à 210°C (# 2). Les figures 4 a et 4 b montrent d'une part l'évolution de l'aimantation avec la température et d'autre part l'évolution de l'aimantation avec le champ magnétique. Comme nous pouvons le voir sur la figure 4 a, l'aimantation décroît avec la température jusqu'à s'annuler à la température de Curie qui est la température de transition entre la phase ferromagnétique ( $M \neq 0$ ) et la phase paramagnétique ( $M = 0$ ). Notez surtout l'augmentation de la  $T_c$  qui passe de 75K à 146K après recuit. Cette augmentation traduit l'augmentation de la concentration de trous  $P$  et donc une diminution considérable des  $\text{Mn}_I$ . On observe sur la figure 4 b le cycle d'hystérésis de l'aimantation en fonction du champ magnétique. Ce dernier est appliqué dans le plan des couches suivant la direction cristallographique [100]. Le cycle carré observé confirme que l'aimantation est bien confinée dans le plan des couches. Le champ coercitif  $H_c$  diminue de 95 Oe à 22 Oe, traduisant la diminution des défauts dans le matériau après le recuit. L'aimantation à saturation théorique pour un échantillon à 7% de manganèse est  $M_s = 61 \text{ emu/cm}^3$ , expérimentalement on trouve  $M_s = (40 \pm 3) \text{ emu/cm}^3$ . On peut donc calculer la concentration effective de manganèse qui participe au ferromagnétisme. Nous avons trouvé 55% (# 1) et 65% (# 2) seulement de manganèse présent dans nos échantillons sont magnétiquement actifs. Cependant les concentrations de trous déduites à partir des mesures d'effet Hall fort champ montrent une nette augmentation,  $P = (4.5 \pm 0.4) \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  avant et  $P = (9.3 \pm 0.6) \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  après le recuit.

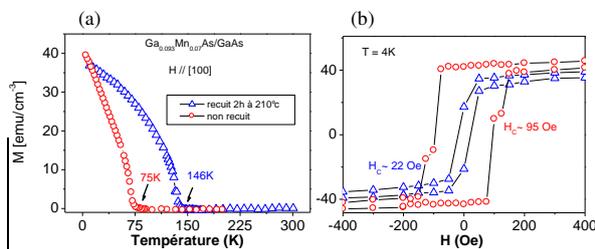


Fig. 4 : (a) Aimantations en fonction de la température pour deux échantillons de GaMnAs 7% de Mn et 20 nm d'épaisseur, avant recuit (# 1) et après un recuit post croissance à 210°C pendant 2h (# 2). (b) Aimantation en fonction du champ magnétique pour les mêmes échantillons.

##### IV.2 MESURES DE LA RÉSISTANCE DE HALL PLANAIRE.

Nous avons vu que, à saturation l'aimantation s'aligne dans la même direction que le champ magnétique. Cependant, il existe dans le plan les directions dites de facile aimantation. Le but de ces expériences est de chercher les positions d'équilibre du système. Ces positions correspondent aux axes de facile aimantation. Premièrement, nous avons mesuré la RHP en fonction du champ magnétique comme on peut le voir sur la figure 5a. A 4K et pour un angle  $\varphi_H \sim 0^\circ$ , on observe pour l'échantillon (# 1), un cycle d'hystérésis avec deux sauts successifs  $H_{C1}$  et  $H_{C2}$  de la RHP lorsque le champ magnétique change de signe. Ceci est caractéristique des systèmes ferromagnétiques qui possèdent deux axes de facile aimantation dirigés suivant les axes cristallographiques cubiques [100] et [010]. Après recuit, on observe une forte diminution de l'amplitude de la RHP, le champ coercitif  $H_{C2}$  diminue de 720 Oe à 170 Oe. L'anisotropie étant gouvernée par les axes cubiques, ceci laisse envisager une diminution de cette contribution.

Pour comprendre ce changement, nous avons fait des mesures de la RHP en fonction de l'angle  $\varphi_H$ . Lorsque le champ magnétique est assez élevé, l'aimantation suit l'orientation du champ magnétique. On peut approximativement écrire  $\varphi_M \sim \varphi_H$  dans l'équation (3). On obtient alors une dépendance sinusoïdale de la PHR comme on peut le voir sur la figure 5 b. En revanche, lorsque le champ est faible (figure 5c), l'échantillon n'est pas saturé, l'approximation  $\varphi_M \sim \varphi_H$  n'est plus valable. Le signal sinusoïdal de la RHP se déforme. Pour comprendre cela, nous allons chercher une nouvelle relation entre  $\varphi_M$  et  $\varphi_H$ , cette relation est donnée par la minimisation de l'énergie libre,  $\partial E/\partial \varphi_M = 0$ . En utilisant  $K_U$  et  $K_C$  comme paramètres de fit, nous avons un très bon accord entre la théorie et nos points expérimentaux. Pour cet échantillon, on trouve à 4K,  $K_C = (13950 \pm 1500) \text{ erg/cm}^3$ ,  $K_U = (1070 \pm 140) \text{ erg/cm}^3$  et à 50K,  $K_C = (220 \pm 15) \text{ erg/cm}^3$ ,  $K_U = (310 \pm 20) \text{ erg/cm}^3$ . Ces résultats sont en bon accord avec ceux publiés par Wang et al. [7]. On remarquera qu'à 4K,  $K_C \gg K_U$ , l'anisotropie est cubique, cette anisotropie devient uniaxiale à 50K,  $K_C < K_U$ . On observe là, une réorientation de l'axe de facile aimantation de [100]  $\rightarrow$  [110]. Le même travail a été effectué sur l'échantillon # 2, on trouve par exemple à 4 K,  $K_C = (1455 \pm 110) \text{ erg/cm}^3$  soit une diminution de 90% et  $K_U = (640 \pm 50)$ . On observe là, une réorientation de l'axe de facile aimantation de [100]  $\rightarrow$  [110]. Le même travail a été effectué sur l'échantillon # 2, on trouve par exemple à 4 K,  $K_C = (1455 \pm 110) \text{ erg/cm}^3$  soit une diminution de 90% et  $K_U = (640 \pm 50)$  [8].

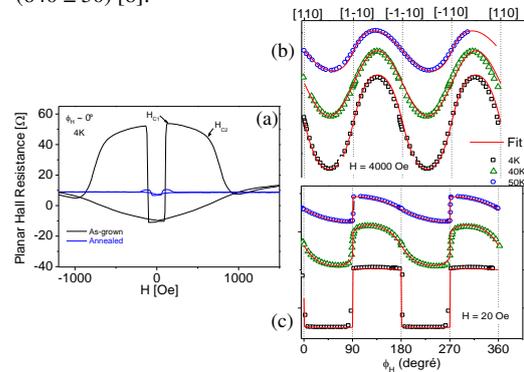


Fig. 5 : (a) Résistance de Hall planaire en fonction du champ magnétique externe  $H$  pour les échantillons # 1 et # 2. (b) et (c) RHP en fonction de  $\varphi_H$  pour l'échantillon # 1 à différentes températures. (b) à fort champ,  $H = 4000 \text{ Oe}$  et (c) à faible champ,  $H = 20 \text{ Oe}$ .

## V. CONCLUSION

En résumé, nous avons étudié l'anisotropie magnétique dans les films minces de GaMnAs par effet Hall planaire. Nos résultats montrent que le recuit post croissance permet d'améliorer efficacement les propriétés magnétiques et électriques de nos échantillons. Nous avons multiplié par deux la température de Curie. Nous avons aussi montré qu'après le recuit l'anisotropie n'était plus gouvernée par les axes cubiques. Les modèles théoriques utilisés nous ont permis de déduire les constantes d'anisotropie qui sont les paramètres physiques déterminants pour la compréhension du processus de retournement de l'aimantation.

## VI. REFERENCES

- [1] H. Ohno, *Science* **281**, 951 (1998)
- [2] T. Dietl et al., *Phys. Rev. B* **63**, 195105
- [3] V. Stanciu and P. Svedlindh, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 242509 (2005)
- [4] K. Y. Wang and M. Sawicki, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 217204
- [5] V. Novak et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 077201 (2008)
- [6] J. Sadowski et al., *Acta. Phys. Pol A.* **114**, 5 (2008)
- [7] T. Dietl, H. Ohno *Phys. Rev. B* **68**, 233310 (2001)
- [8] S. Kamara, "poster", JMC 11, Strasbourg, France.

DOCTISS 2009

# Détection de radiations Terahertz par les ondes de plasma dans des nano transistors et applications à l'imagerie

Salman Nadar<sup>1</sup> (Doctorant 2e année),  
Wojciech Knap, Frédéric Teppe et Dominique Coquillat<sup>2</sup> (Directeurs de thèse)

Groupe d' Etude des Semiconducteurs (GES)  
UMR5650 CNRS-Université Montpellier2- Place Eugène Bataillon  
34095 MONTPELLIER cedex 5 France

1 [nadar@ges.univ-montp2.fr](mailto:nadar@ges.univ-montp2.fr)  
2 [knap@univ-montp2.fr](mailto:knap@univ-montp2.fr)  
[teppe@ges.univ-montp2.fr](mailto:teppe@ges.univ-montp2.fr)  
[coquillat@ges.univ-montp2.fr](mailto:coquillat@ges.univ-montp2.fr)

**Résumé** -j'ai essayé dans ce papier d'atteindre deux buts : le première est d'expliquer pourquoi le domaine fréquentiel THz est étudié au sein de notre équipe et ses importances pour les applications. Le deuxième consiste à expliquer comment des nanotransistors peuvent constituer des détecteurs de radiations THz efficaces.

Dans le cadre de ma thèse des nouvelles structures de transistors ont été développées pour optimiser le mécanisme de détection des radiations THz. Il s'agit de structures multigrilles interdigitées à base de Indium Gallium Arsenide (InGaAs), L'avantage de ce structure est d'augmenter le couplage des ondes électromagnétiques THz avec les ondes de plasma dans le canal de transistor. Dans cet article j'ai montré l'efficacité de cette structure et sa capacité de détection à température ambiante avec une bonne sensibilité.

D'autre part pour montrer l'intérêt de THz dans l'application, des expériences d'imagerie THz ont été faites , le contraste et la résolution de ces images obtenues montrent la capacité de ce transistor autant qu'un appareil photo THz, la perspective de ce travail est de réaliser une matrice de ce transistor pour réduire le temps d'acquisition d'image .

**Mots-Clés** -Terahertz ; nanotransistors ; ondes de plasma ; détecteurs ; imagerie

I. Domaine de recherche de l'équipe Terahertz  
du GES

Le domaine Terahertz ou lointain infrarouge est une région spectrale s'étendant de 100 GHz à 10 THz (30  $\mu\text{m}$  à 3 mm en longueur d'onde). Elle se situe entre deux domaines distincts, celui de l'électronique (parties hertziennes) et celui de l'optique. Cette partie du spectre est longtemps restée le domaine le moins exploité du spectre

électromagnétique malgré son importance au niveau des applications. En effet le rayonnement Terahertz peut avoir des applications dans les domaines aussi divers que l'imagerie médicale, la sécurité, la chimie, la communication, l'observation spatiale.

Le travail de l'équipe Terahertz est en partie consacré à la conception et au développement de nouveaux systèmes de détection et d'émission des rayonnements Terahertz compacts basés sur les matériaux semiconducteurs notamment les nanotransistors de hautes mobilités.

Nos recherches se basent sur la théorie de Dyakonov-Shur sur l'instabilité des ondes de plasma dans un gaz d'électrons bidimensionnel. Cette théorie énonce qu'un transistor peut fonctionner comme détecteur ou source Terahertz quand la longueur de grille est de taille nanométrique. Les détecteurs accordables sont destinés au développement des applications électroniques et photoniques dans la région Terahertz du spectre électromagnétique. Aujourd'hui il y a une large variété des détecteurs THz comme les bolomètres, les détecteurs pyroélectriques et les antennes photoconductives. Ici nous montrons le potentiel de nanotransistors de détecter les radiations THz à température ambiante par les ondes de plasma ainsi que l'application de cette détection en imagerie THz.

## II. Théorie de détection de radiations THz

D'après la théorie de Dyakonov-Shur sur les non linéarités de fluide électronique (plasma) dans le canal de transistor, Un HEMT (High Electron Mobility Transistor) polarisé par une tension appliqué entre le grille et la source et soumis à une radiation électromagnétique incidente développe une tension drain source  $\Delta U$  qui est due à la rectification de l'onde incidente par les ondes de plasma, c'est cette tension qui est mesurée au cours des expériences de détection THz (Photoréponse de transistor). Cette théorie montre également l'existence de deux régimes de détection différentes selon le facteur de qualité  $\omega\tau$  où  $\omega$  est la fréquence incidente et  $\tau$  est le temps de relaxation des électrons: si  $\omega\tau > 1$  la détection est résonante et si  $\omega\tau < 1$  la détection est non résonante ou large bande, dans cet article je me concentre sur le cas non résonante où la photoréponse peut s'exprimer par:

$$\Delta U \propto \frac{eu^2}{4k_B T} \frac{1}{\ln\left(1 + \exp\left(\frac{eU_0}{k_B T}\right)\right)}$$

$u$  est la tension grille source induite par l'onde THz incidente,  $U_0 = V_{gs} - V_{seuil}$  est la tension de swings,  $k_B$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température et  $e$  la charge d'électron.

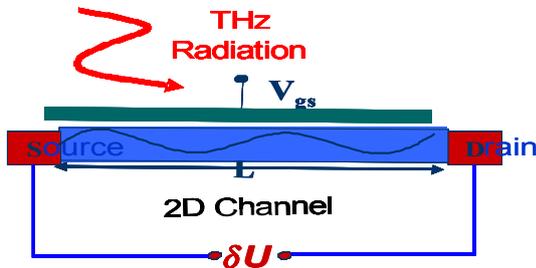


Fig1: Effet simplifié de la détection THz par un transistor.

La figure 1 montre le schéma d'un transistor standard comme détecteur de radiations THz incidente.

## III. Détection par les structures multigrilles

Pour optimiser l'effet de couplage entre l'onde incidente et le transistor, on a testé de nouvelles structures, comportant des double grilles interdigitées (Figure 2). L'avantage de ces structures est leur capacité de créer des densités d'électrons différentes dans le canal; en effet la densité d'électrons peut être contrôlée de façon indépendante par la tension appliquée à chacune des grilles ce qui permet d'avoir des cavités périodiques alternées dans le canal.

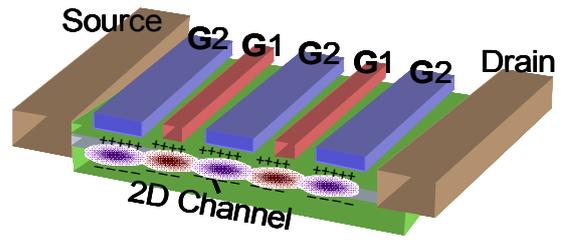


Fig2: Schéma de la structure de transistor à double grille interdigitées.

La Figure 3 présente le dispositif expérimental de détection Terahertz. Le principe est d'illuminer le transistor par une radiation électromagnétique Terahertz. La radiation a été produite par Carcinotron (BWO) opérant dans la gamme 200 - 400 GHz. La radiation incidente de 10 mW a été focalisée sur un échantillon avec un spot d'un diamètre compris entre 1 - 10 mm, c'est à dire plus grand que la dimension totale des structures. La radiation incidente est modulée via un chopper.

Le photoréponse est mesurée sur le contact de drain à l'aide d'un système d'amplificateur synchrone en fonction de la tension appliquée sur la grille  $V_{gs}$ .

Deux études ont été faites sur cette structure, la première est l'effet de longueur de grille sur la détectivité de transistor et la deuxième est l'effet de nombres de période qui est défini comme la longueur de doigt de grille 1 plus celle de grille 2 avec deux fois l'espacement entre ces deux doigts.

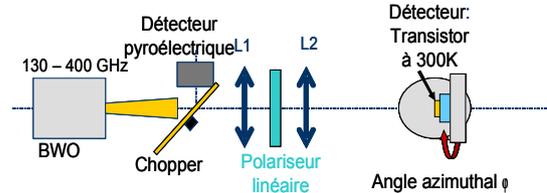


Fig3: Système expérimental de détection d'une radiation THz.

Deux échantillons à base de InGaAs ont été étudiés T1 ( $L_{G1}=100\text{nm}$ ,  $L_{G2}=300\text{nm}$ , 150 périodes) et T2 ( $L_{G1}=100\text{nm}$ ,  $L_{G2}=1300\text{nm}$ , 50 périodes). Ces deux échantillons ont la même distance source drain.

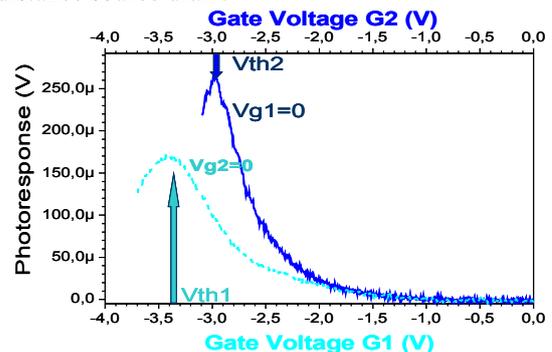


Fig4: Photoréponse de T1 en fonction de  $V_{g1}$  et  $V_{g2}$ .

La figure 4 illustre les réponses du T1 à 240 GHz en fonction de la tension appliqué sur la grille 1(en turquoise) et sur la grille 2 (en bleu). Dans les deux cas la tension sur l'autre grille est nulle. Ces courbes montrent trois points: 1-une détection non résonante (pas de pic qui correspond à la fréquence de résonance), 2-la réponse de transistor augmente en s'approchant de la tension de seuil où le nombre des électrons dans le canal devient très faible, 3-la sensibilité de transistor augmente avec la longueur de grille polarisée.

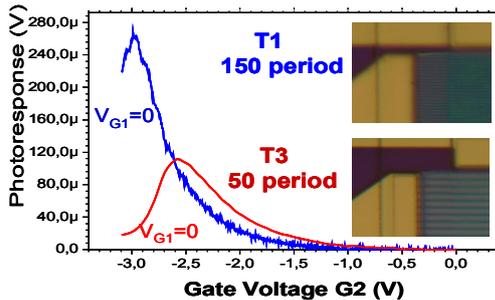


Fig5:Photoréponse de T1 et T2 en fonction de  $V_{G2}$ .

La figure5 illustre les photoréponses de deux transistor de même longueur de canal mais de nombres de période différents en fonction de la tension appliquée sur la grille 2, ces courbes montrent une détection non résonante avec une sensibilité qui augmente avec le nombre de périodes. On peut conclure donc que la sensibilité de ce transistor dépend de la longueur de grille polarisée et du nombres de périodes .

#### IV.Imagerie THz

De nombreuses techniques d'imageries sont actuellement disponibles pour observer un objet en deux ou trois dimensions, comme l'imagerie par Rayon X, l'imagerie par résonance magnétique et la tomographie optique cohérent.

Les radiations THz, de par leurs caractéristiques spectroscopiques uniques, offrent de nouvelles perspectives quant à leur utilisation dans le domaine de l'imagerie. Grâce à sa faible énergie, l'imagerie THz a l'avantage d'être sans danger pour les milieux biologiques. Compte tenu de leur longueur d'onde, une résolution spatiale de quelques centaines de micron est attendue.

Vu l'intérêt de rayonnement THz on s'est intéressé à monter un système d'imagerie THz en transmission en utilisant un transistor HEMT (High Electron Mobility Transistor) à base de GaAs comme détecteur et un laser CO2 opérant en mode continu entre 0,6 et 2,6 THz comme source de rayonnement avec un puissance de quelques mW. La figure 6 montre le montage expérimental de l'imagerie THz.

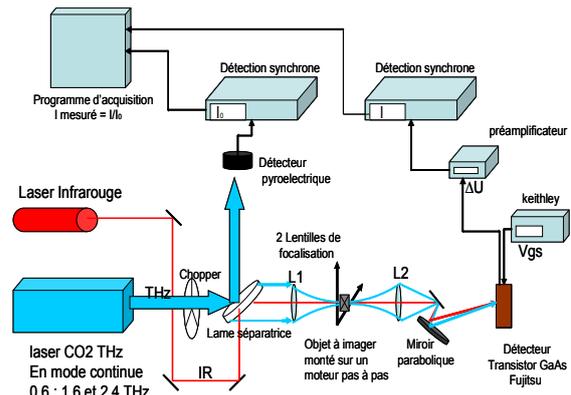


Fig6: Montage expérimental d'imagerie THz.

Avant de faire l'imagerie et pour savoir le meilleur point de fonctionnement de transistor autant qu'un détecteur , on a mesuré la photoréponse de GaAs aux rayonnements émis par le laser (même montage de figure6 )et on a obtenu les courbes de Figure7.

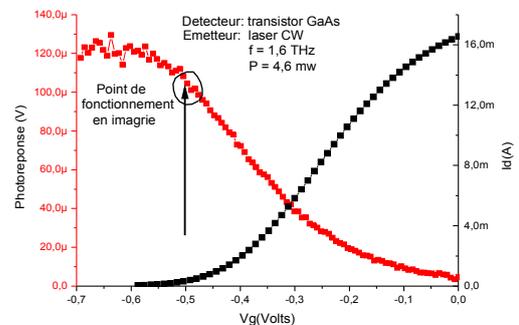


Fig7:PHORéponse et caractéristique  $I_d(V_g)$  de transistor GaAs testé pour l'imagerie.

D'après la courbe de photoréponse, on peut conclure que le meilleur point de fonctionnement pour l'imagerie de GaAs est à  $-0,5V(V_{seuil})$  où le signal est élevé et le bruit est assez faible.

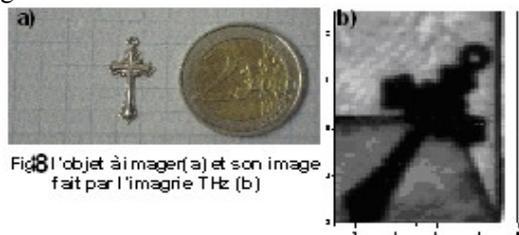


Fig8 l'objet à imager(a) et son image fait par l'imagerie THz (b)

La Figure8 présente l'image d'une croix cachée dans une enveloppe obtenue avec le système d'imagerie en transmission. La technique consiste à déplacer l'objet à imager en deux dimensions devant les radiations à 1,6 THz et de puissance 15 mW. Les radiations transmises à travers l'objet seront détectées par un transistor GaAs fixe polarisé par une tension  $-0,5V$ , le signal mesuré par une détection synchrone sera alors normalisé par le signal de référence de source afin d'éviter l'effet d'instabilité de laser sur l'image. Cette image est constituée de  $70 \times 60$  pixels avec un temps de

réalisation de 87 minutes, chaque pixel correspond à un lecteur unique sur la détection synchrone.

#### V. Conclusion

Nous avons montré expérimentalement la détection non résonante d'une radiation terahertz à température ambiante par un transistor InGaAs à double grilles interdigitées et la capacité de cette structure de mieux coupler les ondes incidentes avec le transistor. On a montré également l'expérience d'imagerie THz avec un transistor GaAs comme détecteur. Le bon contraste et l'excellente résolution de l'image obtenue à 1,6 THz fait de notre transistor un bon détecteur pour l'imagerie THz pour réaliser une camera THz avec des matrices de ces détecteurs.

#### VI. Références:

- [1] M. Dyakonov and M. Shur, Phys. Rev. Lett. 71, 2468 (1993).
- [2] M. Dyakonov and M. Shur, IEEE, Vol. 43, No. 3 1996.
- [3] W. Knap, V. Kachorovskii, Y. Deng et al., Journal of Applied Physics. Volume 91, Number 11 (2002).
- [4] T. Otsuji, Y. Meziani et al., APL 89, 263502 (2006).
- [5] Y. Meziani, H. Handa, W. Knap et al., APL 92, 201108 (2008).
- [6] Sous la direction de Jean Louis Coutaz. *Optoélectronique THz*. EDP Sciences, 2008.
- [7] A. El Fatimy, Rapport de thèse, *Détection et émission THz par les ondes de plasma dans des transistors HEMT*, Soutenu le 15 Juin 2007.
- [8] S. Boubanga Tombet, Rapport de thèse, *Modes plasmoniques dans les transistors à effet de champ et Détection THz*, Soutenu le 17 Novembre 2008

DOCTISS 2009

# Astronomie $\gamma$ avec l'expérience embarquée en satellite *Fermi*

Véronique PELASSA <sup>1</sup> (Doctorante 2eme année)  
Frédéric PIRON <sup>2</sup>, Alain FALVARD <sup>3</sup> (Directeurs de thèse)

Laboratoire de Physique Théorique et Astroparticules  
Université Montpellier 2  
34095 MONTPELLIER cedex, France

<sup>1</sup>pelassa@lpta.in2p3.fr  
<sup>2</sup>piron@lpta.in2p3.fr, <sup>3</sup>falvard@lpta.in2p3.fr

**Résumé**— L'observation du ciel dans le domaine des rayons  $\gamma$  permet d'étudier certains des phénomènes les plus violents de l'Univers, comme les supernovae, le voisinage des trous noirs massifs au coeur des galaxies, de sonder l'Univers lointain grâce aux sursauts  $\gamma$ . Lancé le 11 juin 2008, l'observatoire *Fermi* ouvre une nouvelle fenêtre sur le ciel  $\gamma$  de 30 MeV à plus de 300 GeV, avec des performances inégalées. Cet article présente des sources astrophysiques de rayonnement  $\gamma$ , les principes de la détection des  $\gamma$  avec *Fermi*, et les premiers résultats obtenus.

**Mots-clés**— astrophysique : rayons cosmiques, accélération, rayonnement  $\gamma$  ; détection : trajectographe, scintillation.

## I. INTRODUCTION

L'observatoire *Fermi* est un projet international regroupant plus de 400 scientifiques de plusieurs pays : États-Unis, France, Italie, Allemagne, Suède, Japon. Le but de ce projet est d'observer le ciel en  $\gamma$  et étudier les objets astrophysiques émettant ce rayonnement.

Le rayonnement  $\gamma$  est un rayonnement électromagnétique très énergétique. D'après la relation de De Broglie l'énergie transportée par un photon est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique correspondante. Dans le domaine visible, l'énergie transportée par un photon est de l'ordre de 1 eV (électron-Volt). Le domaine  $\gamma$  s'étend au-delà du MeV.

Dans l'Univers ce rayonnement peut provenir de divers objets astrophysiques, décrits dans la section II.

L'observatoire spatial *Fermi* est doté d'un détecteur principal, le *Large Area Telescope* (LAT) pour l'observation entre 20 MeV et plus de 300 GeV, dont le principe est décrit dans la section III. Le détecteur secondaire de *Fermi*, le *Gamma-ray Burst Monitor* (GBM) sert à l'étude des sources transitoires et est aussi décrit dans la section III.

Depuis l'été 2008, l'observatoire *Fermi* a déjà permis de

collecter de nombreuses heures d'observations. Les premiers résultats seront présentés dans la section IV.

La section V. présente mon travail de thèse sur l'étude des sursauts  $\gamma$  observés avec *Fermi*.

## II. SOURCES ASTROPHYSIQUES DE RAYONS $\gamma$

### II.1. Plusieurs types de sources

#### II.1.1. Vents stellaires

La couronne d'une étoile, située juste à sa surface, est constituée d'un gaz chaud (plusieurs millions de degrés) donc ionisé. Ces particules chargées sont expulsées par l'étoile tout au long de sa vie, formant un vent stellaire continu. Le champ magnétique terrestre est un bouclier aux particules du vent solaire. Des éruptions peuvent aussi avoir lieu, produisant une émission supplémentaire de particules.

Ces deux phénomènes s'accompagnent de la production de rayons  $\gamma$ , qui dans le cas du Soleil sont détectables depuis la Terre — du moins depuis l'orbite de *Fermi*.

#### II.1.2. Étoiles massives et supernovae

Les étoiles dites massives ont une masse au moins dix fois supérieures à celle du Soleil, et vivent bien moins longtemps. La plupart explosent en supernova, dite gravitationnelle du fait de son mécanisme.

L'étoile massive est initialement constituée principalement d'hydrogène, et au cours de sa vie les réactions de fusion nucléaire en son coeur forment des atomes de plus en plus gros : hélium, puis carbone, azote et oxygène, puis silicium et soufre, et enfin fer et nickel. Au coeur de l'étoile les électrons sont alors capturés par les protons des noyaux atomiques. La pression, qui dans cette zone n'était maintenue que par la répulsion entre électrons, chute et le coeur s'effondre sur lui-même sous l'effet de sa propre gravité.

Selon la masse de l'étoile, cet effondrement donne naissance à une étoile à neutrons ou un trou noir, appelé objet compact. En effet la matière dans une étoile à neutrons est aussi dense que dans un noyau atomique : une telle étoile a environ la masse du Soleil pour un rayon d'environ 10 km. La matière d'un trou noir est encore plus dense : la masse du Soleil entre dans une boule de 3 km de rayon. La trajectoire de la lumière est courbée au voisinage d'un objet dense, et un trou noir est si dense qu'aucune lumière ne s'en échappe, d'où son nom.

Pour une étoile très massive, de 30 à 50 masses solaires, la supernova peut donner lieu à un sursaut  $\gamma$  (section II.1.3.).

Pour une étoile de moins de 30 masses solaires, les couches externes de l'étoile tombent sur la jeune étoile à neutrons, rebondissent et sont expulsées : c'est l'explosion en supernova, celle-ci est symétrique. Il reste donc une étoile à neutrons et une coquille de matière ionisée qui s'en éloigne à environ  $1000 \text{ km.s}^{-1}$ . Cette coquille, appelée Vestige de supernova, ou *SuperNova Remnant* (SNR) peut émettre du rayonnement  $\gamma$ . L'étoile à neutrons peut aussi dans certains cas émettre dans le domaine  $\gamma$  ainsi que dans tout le spectre électromagnétique, de manière périodique : on l'appelle alors pulsar. Ce pulsar émet et accélère des particules chargées, responsables du rayonnement observé (voir section II.2.), qui forment un nuage autour de lui. Une onde de choc se forme à la limite entre ce flot de particules et la matière du vestige de supernova. Du rayonnement  $\gamma$  peut aussi être émis dans cette région, nommée Nébuleuse de vent de pulsar (ou *Wind Pulsar Nebula*, PWN). Le spectre et l'évolution temporelle de l'émission  $\gamma$  du pulsar donnent des indices sur la structure de l'étoile et la forme de la matière à l'intérieur. L'association (ou l'absence) d'un pulsar, d'une PWN, d'une SNR, renseignent sur le mécanisme de formation de ces objets et leur évolution. La figure II.1.2. montre un exemple de pulsar visible en  $\gamma$ , entouré de sa nébuleuse et son vestige de supernova : le pulsar du Crabe, reste d'une supernova observée par les astronomes Chinois en 1054.

Les étoiles massives vivant peu de temps, elles naissent et meurent dans des régions où la densité de population est élevée, et peuvent former des couples, les deux étoiles tournant l'une autour de l'autre. Lorsque l'une meurt il en reste un objet compact, qui aspire la matière de l'autre étoile. Ce phénomène s'accompagne éventuellement de l'émission de rayons X et/ou  $\gamma$ , modulé par le mouvement de révolution et par la distance entre les deux objets comparée aux dimensions de l'étoile massive.

Les SNR et pulsars, ainsi que les systèmes binaires observés sont situés dans la Voie Lactée, ils émettent en effet trop peu de  $\gamma$  pour être distingués dans une autre galaxie.

### II.1.3. Les sursauts $\gamma$

Les sursauts  $\gamma$ , ou *Gamma-Ray Bursts* (GRB), sont des bouffées brèves et intenses de rayons  $\gamma$  ne se reproduisant pas dans le temps. Dans le modèle actuel, ce rayonnement viendrait d'un jet de plasma relativiste. Les particules chargées du jet, accélérées à des vitesses proches de celle de la lumière, émettent alors dans un fin cône dirigé vers l'avant. À l'origine

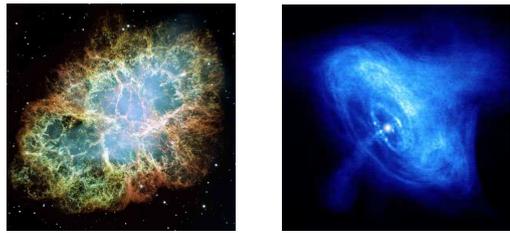


FIG. 1 : À gauche : observation faite en lumière visible par Hubble de la nébuleuse du Crabe, nom donné en fait au vestige (SNR) associé au pulsar du Crabe. À droite : pulsar du Crabe entouré de sa nébuleuse (PWN), vu ici en rayons X.

de ce jet. un trou noir de quelques masses solaires, entouré d'un disque d'accrétion. La matière du disque tourne en tombant sur l'objet compact et rebondit sous forme de deux jets de plasma perpendiculaires au plan du disque.

Une possibilité est que ce système se forme lors d'une supernova. En effet, pour une étoile très massive, de 30 à 50 fois la masse du Soleil, le trou noir formé attirerait rapidement à lui la matière du restant de l'étoile, qui formerait le disque d'accrétion. Une autre possibilité est la fusion de deux objets compacts : deux étoiles à neutrons, ou un trou noir et une étoile à neutrons. Deux tels objets qui tournent l'un autour de l'autre en se rapprochant seraient déformés par leurs forces de marée. Ils fusionneraient alors en un trou noir entouré d'un disque d'accrétion.

Très lumineux, les GRB peuvent être observés même s'ils surviennent hors de la Voie Lactée. L'observation d'un GRB lointain permet parfois de déduire la présence de la galaxie, elle-même invisible, dans laquelle il a eu lieu.

### II.1.4. Trous noirs supermassifs

Au coeur de certaines galaxies se cache un trou noir supermassif, de plusieurs millions ou milliards de fois la masse du Soleil.

La matière environnant ce trou noir tombe en tournant sur celui-ci et forme parfois deux jets de plasma de part et d'autre du disque. Ce plasma relativiste émet du rayonnement dans tout le spectre électromagnétique, notamment des rayons  $\gamma$ . On parle alors de Noyau Actif de Galaxie (NAG). Le noyau de la Voie Lactée, avec un trou noir de 3 millions de masses solaires, n'est pas actif.

L'évolution temporelle de l'émission  $\gamma$  est un indice du mécanisme d'accrétion et de "rebond", encore mal compris.

### II.1.5. Matière noire

Depuis les années 70, les scientifiques sont à la recherche de ce qui constitue l'essentiel de la masse de l'Univers. Il ressort des observations qu'environ 90% en masse de l'Univers est invisible, c'est-à-dire que cette matière n'émet pas de rayonnement électromagnétique, elle est donc dite noire. Sa nature est inconnue, on sait juste qu'elle n'est pas constituée de mêmes particules que la matière "usuelle". Plusieurs candidats sont proposés, selon différentes théories. Celles-ci pro-

posent de compléter le modèle actuel de la physique des particules, dit Modèle Standard, en ajoutant ces particules et en décrivant leurs interactions avec les particules déjà connues.

Les particules de matière noire, comme toutes les autres, ont a priori une durée de vie finie, et peuvent donc se désintégrer, ou interagir entre elles. Ces réactions produisent d'autres particules plus légères, et éventuellement des rayons  $\gamma$ , selon un spectre bien déterminé. Une méthode de recherche indirecte est donc de chercher à observer ce rayonnement, mais il est en principe très faible, donc difficile à distinguer des contributions provenant des autres sources.

### II.1.6. Émission diffuse

La Voie Lactée est constituée d'étoiles, de poussière, et de gaz très ténu. Elle est contenue dans un nuage sphérique de gaz encore plus ténu, appelé halo. Ce gaz émet aussi du rayonnement  $\gamma$ , dit diffus, qui constitue 80% du rayonnement observé. Les sources ponctuelles trop lointaines ou trop faibles pour être distinguées participent aussi à ce rayonnement.

### II.2. Accélération de particules chargées et émission de $\gamma$

Dans la plupart des cas sus-cités, l'émission de rayons  $\gamma$  est associée à des particules chargées accélérées. Les phénomènes d'accélération diffèrent d'une source à l'autre. Dans le cas des pulsars, un fort champ électrique existe au voisinage de l'étoile, qui à la fois arrache des électrons et protons à la surface de l'étoile, et accélère ces particules chargées. Dans les autres cas c'est probablement une onde de choc qui accélère les particules [2].

Ces particules chargées accélérées peuvent émettre du rayonnement de plusieurs manières :

- en interagissant avec le champ magnétique ambiant, amplifié comme la densité de matière juste en amont de l'onde de choc (rayonnement synchrotron)
- en transférant aux photons ambiants ou émis par rayonnement synchrotron un peu de leur énergie cinétique (diffusion Compton)
- en s'annihilant, par exemple des paires  $e^-e^+$  (électron-antiélectron)
- en se désintégrant, créant des particules plus légères et émettant de l'énergie sous forme de  $\gamma$

Ces mécanismes sont dits non-thermiques, contrairement à l'émission d'un corps à l'équilibre thermique dont le spectre est relié à la température. C'est le cas par exemple des êtres vivants, qui émettent un rayonnement infrarouge.

Les spectres d'émission  $\gamma$  permettraient de connaître la nature des particules accélérées, la distribution de leur énergie cinétique (leur spectre) et le champ magnétique régnant dans ce milieu. L'étude des spectres des sources observées permet donc aussi de les identifier ou de les éliminer comme lieux d'accélération de particules chargées et de comprendre les mécanismes d'accélération associés.

### II.3. Le rayonnement cosmique chargé

Les particules chargées ainsi accélérées vont bien quelque part, et en l'occurrence nous en observons. Elles forment le rayonnement cosmique chargé. La trajectoire de ces particules chargées est courbée par le champ magnétique, le rayon de

courbure augmentant avec l'énergie cinétique de la particule. Les rayons cosmiques observés proviennent donc : du Soleil essentiellement au-dessous de quelques centaines de GeV, de la Voie Lactée jusqu'à quelques centaines de TeV, d'autres Galaxies au-delà [1].

Le flux de particules décroît comme l'énergie augmente, mais excède tout de même largement celui des photons de mêmes énergies. Ces particules constituent donc un bruit de fond encombrant pour l'astronomie  $\gamma$ . Ces particules, essentiellement des protons, interagissent différemment des photons, ce qui leur confère des signatures différentes, rendant possible un tri des événements observés selon leur nature.

## III. DÉTECTER LES RAYONS $\gamma$ AVEC *Fermi*

### III.1. Détecteurs spatiaux et télescopes au sol [3]

Le rayonnement  $\gamma$  astrophysique ne traverse pas l'atmosphère. Les photons incidents interagissent avec le champ électrique auprès des noyaux des molécules d'air pour se convertir en paires  $e^+e^-$ . Cette réaction primaire a lieu à environ 10 km d'altitude.

Si les particules ainsi créées sont assez énergétiques elles peuvent interagir encore avec les molécules de l'atmosphère, émettant de l'énergie sous forme de photons  $\gamma$  d'énergie moindre. Ceux-ci se convertissent en paires, etc. jusqu'à ce que les photons émis ne puissent plus se convertir, et que les  $e^+e^-$  créés n'émettent plus de photons  $\gamma$ . Ces particules chargées se déplacent dans l'air à une vitesse proche de  $c$ , vitesse de la lumière dans le vide, et supérieure à la vitesse de la lumière dans l'air  $v_{air} = c/n_{air}$ . Elles émettent alors une lumière bleue appelée lumière Čerenkov dans un fin cône orienté dans le sens de leur déplacement.

Pour des photons incidents très énergétiques, de l'ordre du TeV, ce rayonnement Čerenkov est observable au sol, par des nuits claires et sans Lune. Il peut être étudié à l'aide d'ensembles de miroirs de grande surface de collection, comme par exemple dans l'expérience *H.E.S.S.* en Namibie.

Les  $\gamma$  d'énergie plus faible, au-dessous de quelques dizaines de GeV, forment une gerbe trop petite pour être bien observée depuis le sol. Il est donc nécessaire de s'élever, en envoyant un détecteur dans l'espace. De plus, le flux des  $\gamma$  croît quand leur énergie diminue, si bien qu'il est possible d'étudier le ciel en  $\gamma$  entre quelques MeV et quelques centaines de GeV à l'aide d'un détecteur porté par un satellite, ayant donc une surface de collection assez petite.

#### III.1.1. Télescopes $\gamma$ spatiaux

L'observatoire *Fermi* est en orbite à 560 km d'altitude depuis son lancement à Cap Canveral le 11 juin 2008 [6]. La trace au sol de son orbite reste entre les tropiques pour limiter le flux de rayons cosmiques chargés provenant du Soleil. Ceux-ci sont en effet piégés par le champ magnétique terrestre et guidés vers les pôles où ils produisent les aurores polaires. Le satellite, doté d'un grand champ de vue (2,2 stéradians), effectue une révolution en une heure et demie et est animé d'un mouvement de bascule Nord-Sud, observant ainsi la totalité du ciel en 2 orbites soit trois heures.

Le prédécesseur de *Fermi* était le détecteur *Energetic*

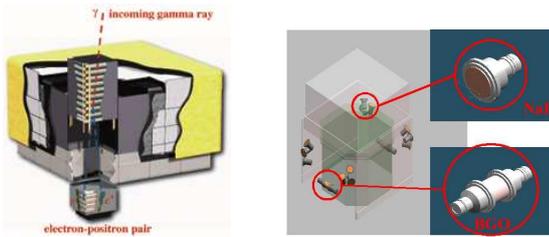


FIG. 2 : À gauche : vue schématique du LAT. La modularité du LAT ainsi que le principe de détection sont représentés. On reconnaît le bouclier anti-coïncidence (tuiles grises) protégé par un dôme anti-micrométéorites (en jaune), le trajectographe (partie haute de la tour en éclaté) ainsi que le calorimètre (partie basse). À droite : répartition des détecteurs du GBM tout autour du satellite : 12 détecteurs NaI aux coins, 2 BGO sur les faces libres. Le GBM est ainsi doté d'un champ de vue couvrant tout le ciel non-oculté par la Terre.

*Gamma-Ray Experiment Telescope* (EGRET) à bord de l'observatoire spatial *Compton Gamma-Ray Observatory* (CGRO) de la NASA. Il a fonctionné de 1991 à 2000 et a permis l'étude du ciel  $\gamma$  entre 20 MeV et 30 GeV. Le catalogue de 271 sources établi sert de référence pour l'astronomie  $\gamma$ . Il comprend 6 pulsars, 93 NAG, et presque 170 sources non identifiées à l'époque.

Depuis avril 2007, l'instrument *Astro-rivelatore Gamma a Immagini Leggero* (AGILE), issu d'une collaboration italienne et conçu sur le même principe que le LAT avec une surface de collection moins importante, permet l'observation du ciel  $\gamma$  entre 30 MeV et 30 GeV [6].

### III.2. Le Large Area Telescope (LAT)

Le LAT [6] est conçu pour observer la réaction la plus probable entre le matériau du détecteur et un photon  $\gamma$  de 30 MeV à 300 GeV : la création de paires  $e^+e^-$ .

Ses éléments constitutifs, visibles sur la figure III.2. sont :

- un trajectographe, empilement de couches de tungstène (W) et de silicium (Si). Les photons  $\gamma$  se convertissent dans le tungstène, dont les noyaux contiennent beaucoup de protons ( $Z=74$ ) et génèrent donc un fort champ électrique à leur voisinage. Les  $e^+$  et  $e^-$  créés, en traversant les pistes de silicium, y déposent de l'énergie transformée en courant électrique par le semiconducteur. L'alternance d'orientation des pistes de silicium (selon les axes X et Y du détecteur) et sa structure modulaire (16 tours identiques) permettent de localiser chaque petit dépôt d'énergie, l'ensemble de ces dépôts formant la trace laissée par la particule. À partir des traces du  $e^+$  et du  $e^-$  on remonte à la direction du photon incident.
- un calorimètre, situé au-dessous du trajectographe et formé de barreaux d'iodure de césium (CsI) dans lequel les particules chargées déposent une grande partie de leur énergie. Le matériau ainsi excité scintille, et la collec-

tion de la lumière émise permet la mesure de l'énergie déposée. Comme les pistes du trajectographe, les barreaux de CsI sont répartis en 16 modules identiques, chacun fait de 8 couches d'orientations alternées (selon X ou Y), ce qui permet de localiser chaque dépôt. La mesure de l'énergie totale déposée permet de reconstruire l'énergie du photon incident.

- un détecteur anti-coïncidence formé de tuiles de scintillateur plastique, posées au-dessus du trajectographe et sur ses côtés. Ce matériau scintille lorsqu'il est traversé par une particule chargée, ce qui permet d'utiliser ce sous-détecteur comme veto, c'est-à-dire que les événements associés à une scintillation dans les tuiles plastiques sont rejetés. Ceci permet d'éliminer une grande partie du bruit constitué des rayons cosmiques chargés.

Les données collectées sont enregistrées et envoyées au sol 6 à 8 fois par jour via un réseau de satellites et une grande antenne radio située au Nouveau-Mexique (É.-U.). Le traitement peut alors commencer : reconstruction des traces, calcul de l'énergie des particules incidentes, estimation de leur nature. Le veto du détecteur anti-coïncidence ne suffisant pas à éliminer tout le bruit des particules chargées, un tri est encore nécessaire. Les événements clairement identifiés comme  $\gamma$  sont mis à part et utilisés pour l'étude principale. Les événements correspondant à des particules chargées sont aussi utilisés, entre autres pour la calibration de l'instrument.

### III.3. Le Gamma-ray Burst Monitor (GBM)

L'observatoire *Fermi* dispose aussi d'un détecteur de rayons X, le GBM, pour l'étude des sources transitoires [7].

Cet instrument est en fait un ensemble de 14 photomultiplicateurs scintillateurs répartis autour du corps du satellite (v.fig III.2.). Chacun de ces détecteurs est constitué d'un bloc de matériau scintillant, posé sur un tube photomultiplicateur (PM). La lumière émise par le matériau est collectée et transformée en courant électrique à l'aide du PM. L'intensité de ce courant est proportionnelle à la puissance lumineuse de scintillation, cela permet de calculer l'énergie de la particule incidente.

Deux types de matériaux scintillants sont utilisés ici. Douze détecteurs contiennent un bloc d'iodure de sodium (NaI), ils sont sensibles aux photons et particules d'énergies allant de 8 keV à 1 MeV. Les deux autres détecteurs contiennent un bloc de germanate de bismuth (BGO), ils sont sensibles aux énergies de 150 keV à 40 MeV.

La prise de données finement échantillonnées en temps est déclenchée par une forte augmentation du taux d'événements (particules ou photons) détectés dans les PM au NaI. Dans le GBM on ne détermine pas la nature de chaque particule incidente, on mesure seulement son énergie. Si une variation brusque est observée, tout ce qui dépasse du niveau moyen de fond est considéré comme des photons provenant d'une source astrophysique. Ce n'est valable que pour les sources transitoires, car l'émission ainsi détectée est intense et de courte durée : GRB, éruptions solaires, pulsars émettant des flashes dans les domaines X ou  $\gamma$ . Sa position dans le ciel est

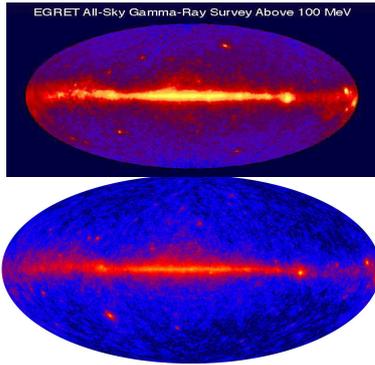


FIG. 3 : Le ciel  $\gamma$  vu par EGRET (en haut) au dessus de 100 MeV après 9 ans de vol [5]. En bas, le même ciel vu avec 4 jours de données de *Fermi*-LAT (first-light) [8]. Les cartes sont en coordonnées galactiques, la bande rouge (plus de photons collectés) au milieu de la carte est la Voie Lactée, vue par la tranche. Les trois sources brillantes dans le plan galactique à l'est est des pulsars, d'ouest en est : Vela, Geminga, Crabe. La source brillante au sud-ouest hors du plan est un NAG.

déterminée d'après les intensités relatives observées dans les différents détecteurs NaI. Les données des NaI et BGO sont combinées pour obtenir un spectre entre 8 keV et 40 MeV. Cette plage correspondant au domaine d'énergie du maximum d'émission des GRB, ce détecteur sert notamment à la détection et l'étude de ces sources, en synergie avec le LAT.

#### IV. PREMIERS RÉSULTATS

La figure IV. compare les observations du ciel  $\gamma$  effectuées par EGRET et par le LAT. Le LAT a une plus grande surface de collection que n'avait EGRET, ainsi qu'un temps mort plus faible, ce qui permet de collecter plus de photons  $\gamma$ . Ceci explique que la carte cumulant les 4 premiers jours d'observation du LAT soit aussi bien voire mieux résolue que celle cumulant 10 ans d'observation avec EGRET.

Une liste de 205 sources très brillantes a été publiée, basée sur les 3 premiers mois d'observation. Environ sources 160 ont pu être identifiées, c'est-à-dire associées à des sources connues à d'autres longueurs d'onde : 106 NAG, 45 pulsars, des systèmes binaires et des amas d'étoiles renfermant des pulsars. Parmi ces sources, 60 étaient dans le catalogue EGRET : les nouvelles observations confirment les anciennes en termes de spectre et la localisation obtenue aujourd'hui avec le LAT est plus précise. Certaines ont pu être identifiées grâce à ces nouvelles observations.

Le GBM a détecté environ 150 GRB à ce jour, dont 6 ont été également observés dans le LAT. Le faible temps mort du LAT comparé à son prédécesseur EGRET nous permet à la fois de détecter plus de sursauts dans le domaine  $\gamma$  qu'avec EGRET, et d'étudier les caractéristiques des GRB dans ce domaine d'énergie. Notamment, le 16 septembre 2008 on a pu observer avec *Fermi* un GRB d'une grande puissance, le plus lumineux jamais observé [9]. L'étude conjointe des données

du GBM et du LAT a permis de poser des contraintes sur les caractéristiques du jet, notamment de donner une limite inférieure de la vitesse moyenne du flot de 99,9999995% de la vitesse de la lumière. L'observation par une autre expérience dans le domaine visible a permis d'estimer sa distance : 12,7 milliards d'années lumière.

#### V. CONTRIBUTION PERSONNELLE

Ma thèse consiste en la caractérisation de l'émission des GRB dans le somaine du LAT, c'est-à-dire le spectre et l'évolution temporelle de l'émission. Avant le lancement je me suis entraînée l'analyse sur des simulations d'observations et ai estimé les incertitudes des outils numériques utilisés pour l'analyse spectrale. Depuis l'été 2008, j'analyse les données LAT pour chaque sursaut observé. J'étudie aussi les incertitudes d'origine instrumentale sur la localisation des GRB et sur leur spectre. Une caractérisation minutieuse de ces observations me permettra de les comparer à un scénario théorique afin de comprendre le mécanisme d'accélération de particules et d'émission de  $\gamma$  dans les sursauts  $\gamma$ .

#### VI. CONCLUSION

Les données collectées depuis l'été 2008 par *Fermi* permettent une étude fine du ciel  $\gamma$  dans une gamme d'énergie (30 MeV – 300 GeV) peu ou pas observée auparavant. L'utilisation notamment des pistes de semiconducteur dans le trajectographe a permis de réduire considérablement le temps mort par-rapport à l'expérience précédente, et la structure modulaire du trajectographe comme du calorimètre une reconstruction précise des caractéristiques des photons incidents. Ajoutons à cela une surface de collection la plus large autorisée pour un détecteur embarqué en satellite, et on obtient le meilleur détecteur spatial de rayons  $\gamma$  jamais construit.

#### RÉFÉRENCES

- [1] A. Marcowith, Y. Gallant, G. Henri, « Sources cosmiques de haute énergie et prédictions », *38ème École de Gif*, Montpellier, France, 2006
- [2] J. Kirk, « Acceleration mechanisms », *38ème École de Gif*, Montpellier, France, 2006
- [3] B. Degrange, « Méthodes expérimentales pour l'étude du rayonnement cosmique », *38ème École de Gif*, Montpellier, France, 2006
- [4] R.C. Hartman et al, « The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources », *ApJS* 123 :79-202, 1999
- [5] EGRET, <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/egret.html>
- [6] W. Atwood et al., « The Large Area Telescope on the *Fermi* Gamma-ray Space Telescope », *ApJ*, 2009, *soumis*
- [7] C. Meegan et al., « The Gamma-Ray Burst Monitor onboard the *Fermi* Gamma-ray Space Telescope », *ApJ*, 2009, *soumis*
- [8] *Fermi* First light, <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>
- [9] A. Abdo et al., « Fermi observations of high-energy gamma-ray emission from GRB 080916C », *Science*, 2009, *soumis*

## Emission et détection d'ondes TéraHertz par des transistors

Hadley VIDELIER<sup>1</sup> (Doctorant 2<sup>e</sup> année)  
Wojciech KNAP<sup>2</sup>, Frédéric TEPPE<sup>3</sup> (Directeurs de thèse)

Groupe d'études des semi-conducteurs  
Université Montpellier IIUMR5650 CNRS-Université Montpellier 2 Place Eugène Bataillon 34095  
MONTPELLIER cedex5 France

<sup>1</sup>h.videlier@gmail.com  
<sup>2</sup>TEPPE@GES.UNIV-MONTP2.FR ; <sup>3</sup>KNAP@GES.UNIV-MONTP2.FR

**Résumé** – Le domaine du TéraHertz (THz) correspond à la partie du spectre électromagnétique située entre l'infrarouge et les micro-ondes. On parle parfois de " gap THz " du fait du faible développement applicatif de cette zone contrairement aux autres domaines du spectre. Il n'existe que quelques sources et détecteurs THz commercialisés à ce jour. L'équipe THz du GES cherche à développer le téraHertz, en essayant de mettre au point des transistors capables, le plus simplement possible, d'émettre et de détecter les ondes THz.

**Mots-clés** – TéraHertz, Emission, Détection, Transistors, ondes de plasma, Mobilité électronique.

## I. INTRODUCTION

Le domaine du téraHertz (THz) correspond à la partie du spectre électromagnétique située entre l'infrarouge et les micro-ondes. On parle parfois de " gap THz " du fait du faible développement applicatif de cette zone contrairement aux autres domaines du spectre. Il n'existe que quelques sources et détecteurs TéraHertz commercialisés à ce jour.

L'équipe THz du GES cherche à développer le téraHertz, en essayant de mettre au point des transistors capables, le plus simplement possible, d'émettre et de détecter les ondes THz.

## II. LE DOMAINE TERAHERTZ (THz)

Le domaine du téraHertz correspond à la partie du spectre électromagnétique située entre l'infrarouge et les micro-ondes. D'un point de vue fréquentiel  $\nu$  s'étend de 0.1 THz à une dizaine de THz, et en longueur d'onde  $\lambda$  va de 30  $\mu\text{m}$  à 3 mm. En nombres d'onde  $\sigma$  va de 333.3  $\text{cm}^{-1}$  à 3.3  $\text{cm}^{-1}$

La figure 1 montre une vue générale du spectre électromagnétique en insistant sur la zone THz, que l'on

caractérise parfois par le " gap THz " du fait du faible développement applicatif de cette zone.

On peut d'ores et déjà remarquer que la zone THz se situe à la frontière entre deux domaines de recherche distincts ; l'un concernant l'électronique (partie ondes hertziennes), et l'autre concernant l'optique.

Chaque zone, une fois le principe de génération et de détection des photons d'intérêt maîtrisé, connaît un fort développement surtout axé sur la réalisation d'applications grand public. Exemple ; Pour le domaine des rayons X : la radiographie médicale X. Pour le domaine UV ; la photochimie, la lithographie et les matériaux filtrant les UV, utilisés dans les lunettes de soleil ou crème solaires. Pour le domaine IR ; les systèmes de commandes sans fil et de la spectroscopie des vibrations moléculaires. Pour le domaine micro-ondes ; four micro-ondes ou téléphone portable. Et les ondes radio sont à la base des télécommunications.

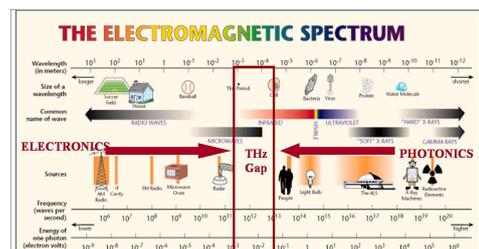


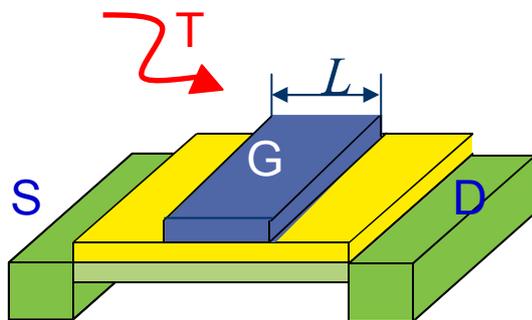
Fig.1 : Le spectre électromagnétique (Source ; Ref[13]).

Le domaine THz, lui, ne connaît pas à l'heure actuelle de telles applications, essentiellement parce qu'il constitue un domaine de recherche jeune, en plein développement. Il n'existe que quelques sources et détecteurs THz commercialisés à ce jour ; Pour les émetteurs il y a les Laser CO<sub>2</sub>, Laser à cascades quantiques, les diodes GUNN et les carinotrons. Quant aux détecteurs il y a les bolomètres, les pyromètres, et les diodes Schottky. En général ces appareils sont assez encombrants, et marchent à basse température.

Notre approche du domaine THz est basée sur l'exploitation des propriétés des ondes de plasma dans les transistors à effet de champ pour émettre ou détecter une radiation THz. Les transistors à effet de champ sont la base des composants électroniques actuels. Les technologies permettant la fabrication de ces transistors sont bien maîtrisées. Leurs coûts sont faibles, ils sont de petite taille et peuvent donc être intégrables. De plus ils fonctionnent à température ambiante et peuvent atteindre des fréquences de fonctionnement de l'ordre de 250 GHz. Ainsi, le potentiel applicatif de ces transistors à ondes de plasma est grand.

### III. ONDES DE PLSAMA DANS LE CANAL DES TRANSISTORS

Le transistor est le composant à la base de tout circuit électronique. Un schéma général de son architecture simplifié est donné en *Figure2* ci-dessous.



*Fig. 2 - Un transistor est constitué de trois contacts ; S la source, D le drain, et G la grille. Le canal du courant est entre S et D. Plus la tension de drainage ( $U_{ds}$ ) sur D est importante, plus le courant est fort. La grille, G, permet d'ouvrir, ou de fermer, ce canal exactement comme un interrupteur « on/off ». Lorsque la tension appliquée sur la grille dépasse une valeur dite « de seuil », le transistor est passant. L est la longueur du canal contrôlée par la grille et est un paramètre important. T est l'incidence d'une onde THz.*

Les ondes de plasma sont les oscillations collectives de densité de charges. Il a été démontré que ces ondes de plasma permettent d'émettre et/ou de détecter une radiation électromagnétique dans le domaine de fréquence THz (Ref [1,2,3]). Le système bidimensionnel (2D) considéré est un gaz d'électrons bidimensionnel à l'intérieur du transistor, situé sous la grille, dans lequel le mouvement des porteurs est confiné dans un plan. En considérant que le gaz 2D est homogène, infini et se trouve à une distance  $d$  de la surface métallique infinie, la relation de dispersion prend la forme

$$\omega_P^{2D} = \sqrt{\frac{n_{2D} e^2 d}{m^* \epsilon_0 \epsilon_1}} k$$

La relation de dispersion donnée par cette équation est similaire à celle des ondes à la surface d'un bassin en "eau peu profonde".

Le principe de l'émission a été proposé par M. Dyakonov et M. Shur en 1993 (Ref [2]). En effet ils ont montré qu'un courant appliqué entre la source et le drain pouvait, à partir d'un seuil, créer une instabilité du système électronique, pouvant ainsi conduire à l'émission d'une

onde électromagnétique aux fréquences d'oscillation plasma. Cette instabilité est appelée "Instabilité Dyakonov-Shur".

La détection d'une radiation THz avec un transistor à effet de champ est quand a elle, une idée originale de M. Dyakonov et M. Shur qui date de 1996 (Ref [1]). Cette idée est basée sur l'exploitation de la non-linéarité du fluide électronique présent dans le canal du transistor. Une onde THz incidente se couple au transistor à travers les électrodes de contact (grille, source et drain) ou à travers les fils utilisés pour câbler les contacts. Elle induit à travers ce couplage des tensions qui sont rectifiées par la non-linéarité du fluide électronique. Une tension continue apparaît alors aux extrémités source et drain. Lorsque les conditions aux bords sont asymétriques à ces deux extrémités, une tension continue ( $\Delta U$ ) non nulle peut être mesurée entre la source et le drain. On peut donc dire qu'une onde électromagnétique incidente induit une tension continue entre la source et le drain. C'est cette tension qui est mesurée au cours des expériences de détection THz (Photoconductivité). (Voir Ref[4] pour plus de détails).

### IV. IMAGERIE THZ

Les systèmes d'imagerie font partie intégrante de notre vie quotidienne et s'avèrent être des outils indispensables dans la quasi totalité des domaines tels la santé, la sécurité au sens large, l'astronomie, des usages de notre vie quotidienne (Vidéo, photo, télévision). Il existe donc une multitude de systèmes d'imagerie, appliqués de manière adaptée aux différentes régions du spectre électromagnétique. N. Niépce en utilisant les techniques de fixation réalisa la première photographie le 28 mai 1816. En 1895 Roentgen découvre les rayons X et réalise avec succès une image de la main de sa femme dans cette gamme de fréquence. Comme avec les rayons X, chaque fois qu'une portion du spectre électromagnétique a été expérimentée, il n'a pas fallu longtemps pour voir les techniques d'imagerie s'y développer. Il n'est donc pas étonnant que de nos jours, plusieurs systèmes d'imagerie existent, utilisant les ondes radio, les microondes, l'infrarouge, le visible, les rayons X et les rayons gamma. Les ondes acoustiques sont elles aussi utilisées en imagerie pour des applications comme l'échographie et dans d'autres systèmes d'imagerie ultra sonore. Dans le domaine THz, l'imagerie n'est encore qu'à ses débuts, mais possède un potentiel applicatif indéniable. En effet parmi les avantages qui motivent le développement de l'imagerie THz on peut citer les faibles énergies d'interaction mises en jeu dans le domaine THz (entre 1 et 10 meV), mais aussi le fait que bon nombre de matériaux communément utilisés ont un coefficient d'absorption très faible aux fréquences THz. Les matériaux comme le plastique, le tissu, le carton et même certains matériaux de construction sont transparents aux fréquences THz alors qu'ils sont opaques dans le visible. Ainsi l'imagerie THz est devenue très attractive pour plusieurs domaines dont, la médecine, l'odontologie, la sécurité les arts etc... De façon générale les systèmes d'imagerie peuvent être classés en deux catégories, les systèmes passifs et les systèmes actifs se distinguant par l'absence ou la présence de source de radiation pour illuminer l'objet à imager.

Les systèmes d'imagerie passifs utilisent l'émission thermique de l'objet à imager. La distribution du spectre d'émission du corps noir dépend de la température de l'objet et est régi par la loi de Planck. Cette loi définit la répartition de l'énergie électromagnétique (ou répartition de la densité de photons) émis par un corps à une température  $T$  donnée en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  (émission du corps noire). La loi de Planck est donnée par :

$$L_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda T}\right) - 1}$$

Les objets à 300 K émettent principalement dans l'infrarouge (figure 3), tandis que le milieu interstellaire en phase froide ( $T = 30$  K) émet essentiellement dans le THz (figure 4). L'univers baigne donc dans un grand flux de radiations THz. Ainsi, les techniques d'imagerie THz passive ont tout d'abord été utilisées dans le domaine spatial.

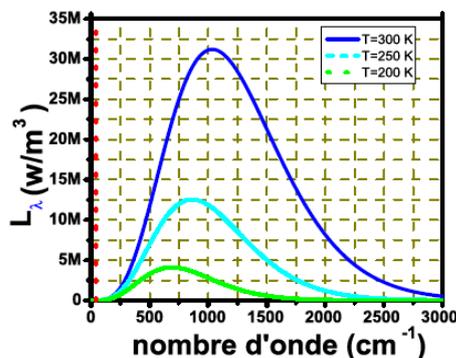


Fig. 3 – Spectre d'émission du corps noir à 300 K, 250K et 200 K. A ces températures l'essentiel de l'intensité émise par un corps noir se trouve dans l'infrarouge. Ces courbes présentent la distribution de l'intensité émise à 300K, à 250K puis à 200K. La ligne en pointillé rouge représente la position du nombre d'onde ( $1/\lambda$ ) correspondant à 1THz ( $10\text{ cm}^{-1}$ ). (source ; Ref[6].)

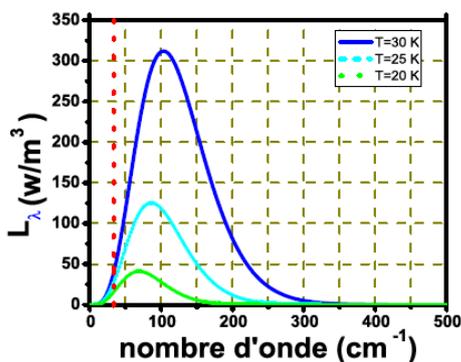


Fig. 4 – Spectre d'émission du corps noir à 30 K, 25 K et 20 K. A ces températures l'essentiel de l'intensité émise par un corps noir se trouve dans le domaine THz. La ligne en pointillé rouge représente la position du nombre d'onde ( $1/\lambda$ ) correspondant à 1THz ( $10\text{ cm}^{-1}$ ) (source ; Ref[6].)

Dans le domaine THz, l'imagerie active des objets à température ambiante est très ardue puisque comme on peut le voir sur la figure 3, l'émission du corps noir à 300 K y est très faible. En imagerie active on utilise une source de radiation (Laser, diode etc...) pour illuminer l'objet à imager ; on mesure alors la radiation transmise ou réfléchi par cet objet. Ce qui nécessite donc de mettre au point des émetteurs, et des détecteurs. Les transistors à effet de champ sont présentés comme de sérieux candidats pour contribuer à réaliser ce challenge. En effet des résultats très enthousiasmants ont été rapportés sur la sensibilité et le bruit de ces détecteurs (voir Fig. 6). De plus, ces détecteurs pourraient être intégrés sous forme de pixels dans des matrices (Ref [5]).

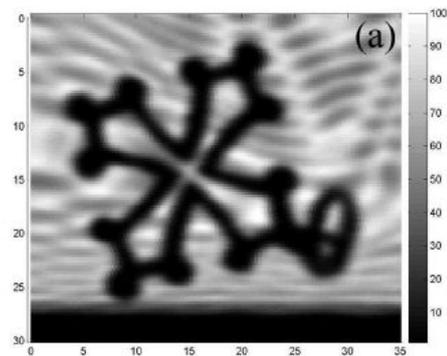


Fig. 6 – Images obtenues avec le système en d'imagerie THz en transmission. La croix du Languedoc était placée dans une enveloppe. La fréquence incidente est de 0.6 THz grâce à une diode GUNN et à la température ambiante. (source ; Ref[12].)

## V. CONCLUSION

Même si l'imagerie THz n'en est qu'à ses balbutiements, nous montrons qu'elle est possible à température ambiante, et grâce à des détecteurs facile à produire, peu coûteux, et assez compétitif par rapport à ce qu'il existe pour le moment (Fig. 8 et Ref [8]). Le domaine d'applications est vaste et promet un bel avenir à cette technologie. De plus, de nouveaux détecteurs à base de matrices de transistors sont à l'étude (Ref [5]).

Détecteurs THz	Température	Sampling Frequency	Gamme du fréquence	NEP
Bolomètres	4K	<1MHz	<30THz	$>10^{-12}\text{ W}\cdot\text{Hz}^{-0.5}$
Cellule de Golay	300K	~20Hz	<20THz	$10^{-10}\text{ W}\cdot\text{Hz}^{-0.5}$
Pyroélectrique	300K	<10KHz	<200THz	$10^{-7}\cdot 10^{-9}\text{ W}\cdot\text{Hz}^{-0.5}$
Photodiodes Schottky	300K	<20GHz	<1.0THz	$10^{-9}\cdot 10^{-11}\text{ W}\cdot\text{Hz}^{-0.5}$
Microbolomètres	300K	<1MHz		$10^{-11}\cdot 10^{-12}\text{ W}\cdot\text{Hz}^{-0.5}$
Si MOSFET	300K	~20GHz	0.7 THz	$<10^{-10}\text{ W}\cdot\text{Hz}^{-0.5}$

## VI. REFERENCES

- [1]M. Dyakonov and M. Shur. "Detection, Mixung, and frequency multiplication of TeraHertz Radiation by Two-Dimensional Electronic Fluid". IEEE 43, 380 (1996).
- [2]M. Dyakonov and M. Shur. Phys. Rev. Lett 71,2465 (1993).

[3]M. Dyakonov and M. Shur. “*Plasma wave Electronics: Novel Terahertz Devices using Two Dimensional Electron Fluid*”. IEEE 43, 1640 (1996).

[4]W. Knap, V. Kachorovskii, Y. Deng, S. Romyantsev, J.-Q. Lu, R. Gaska, M. S. Shur, G. Simin, X. Hu, M. Asif Khan, C. A. Saylor and L. C. Brunel. “*Nonresonant detection of terahertz radiation in field effect transistors*” J. Appl. Phys., V 91, N 11, pp.9346-9353, 2002.

[5]Alvydas LISAUSKAS, Ulrich Pfeiffert, Eric Ojefors, Peter Haring Bolivar, Diana Glaab, Hartmut Roskos, “*Rational design of high-responsivity detectors of THz radiation based on distributed self-mixing in silicon CMOS transistors*”.

[6]Bouanga Tombet Stéphane Albon “*Modes Plasmoniques dans les Transistors à Effet de champ et Détection THz*”. Novembre 2008, Montpellier.

[7]Rabih TAUKE «*Mobilité électronique et détection Terahertz dans les transistors ultimes*», 2007, Montpellier.

[8]R. Tauk, F. Teppe, S; Bouanga, D. Coquillat, W. Knap, Y. M. Meziani, C. Gallon, F. Boeuf, T. Skotnicki, C. Fenouillet-Beranger, D. K. Maude, S. Romyantsev and M. S. Shur «*Plasma wave detection of terahertz radiation by silicon field effects transistors: Responsivity and noise equivalent power*». Appl. Phys. Lett. 89, 253511, 2006.

[9]N. Dyakonova, A. El Fatimy, J. Lusakowski, W. Knap, I. Dyakonov, M.-A. Poisson, E. Morvan, S. Bollaert, A. Shchepetov, Y. Roelens, Ch. Gaquiere, D. Theron, and A. Cappy “*Room-temperature terahertz emission from nanometer field-effect transistors*”. Appl. Phys. Lett. 88, 141906, 2006.

[10]J. Lusakowski, W. Knap, F. Teppe, N. Dyakonova and Y.M. Meziani “*Terahertz generation and detection by plasma waves in nanometer gate high electron mobility transistors*”. Acta Physica Polonica A, 107, N°1, pp. 82-91, 2005.

[11]N. Pala, F. Teppe, D. Veksler, Y. Deng, M.S. Shur, R. Gaska “*Nonresonant detection of terahertz radiation in SoI MOSFETs*”. Electronic Letters, 41, No. 7, pp. 89-90, 2005.

[12]A. LISAUSKAS, W. Von Spiegel, S. Bouanga-Tombet, A. El Fatimy, D. Coquillat, F. Teppe, N. Dyakonova, W. Knap and H.G. Roskos, “*THz imaging with GaAs field-effect transistors*”. Electron. Lett. 44, 408, 2008.

[13]<http://www.lbl.gov/MicroWorlds/ALSTool/EMSpec/EMSpec2.html>