



HAL
open science

Masquer l'Objet pour Mieux le Reconnaître

L.F.C. Lew Yan Voon, Olivier Aubreton, Benaïssa Bellach, Bernard Lamalle,
Patrick Gorria, Guy Cathébras

► **To cite this version:**

L.F.C. Lew Yan Voon, Olivier Aubreton, Benaïssa Bellach, Bernard Lamalle, Patrick Gorria, et al..
Masquer l'Objet pour Mieux le Reconnaître. uB Sciences, 2005, 1, pp.70-77. lirmm-00105366

HAL Id: lirmm-00105366

<https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-00105366>

Submitted on 12 Apr 2016

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

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





SCIENCES ET TECHNOLOGIES



□ Systèmes chaotiques universels

Dans cet article, je parlerai d'abord de la théorie du chaos de façon superficielle, comme une discussion de café. Puis je formaliserai (un peu) le propos, en présentant la branche des mathématiques traitant du chaos : les systèmes dynamiques. Je définirai alors plus précisément ce que l'on entend par dynamique non-chaotique et dynamique chaotique. Finalement, je présenterai un aspect de ma recherche actuelle dans ce sujet.

■ Christian BONATTI
 Directeur de Recherche au CNRS,
 Institut de Mathématiques de Bourgogne

C'est quoi « le chaos » ?

Dans le film *Jurassic Park* de Spielberg, le promoteur du parc amène sur l'île aux dinosaures trois savants censés cautionner son projet : l'un de ces savants est mathématicien, ou plutôt, il rectifie aussitôt, « chaoticien », spécialiste de la théorie du chaos. Rigoureux dans ses pensées mais fantaisiste dans la vie, il tente de séduire sa jeune collègue en lui montrant qu'une goutte d'eau posée sur sa main va s'écouler en choisissant un chemin imprédictible : deux gouttes posées au même endroit choisiront des chemins différents¹.

La théorie du chaos, l'imprédictibilité, est l'une des rares théories mathématiques récentes qui soient passées dans le grand public, avec de jolies images de fractales transformées en paysages lunaires et quelques formules choc : « un battement d'aile de papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas ?² ». Un film récent a même pris comme titre « L'effet papillon ».

Je suis moi-même un mathématicien « pur³ », dont les travaux portent essen-

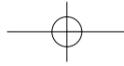
tiellement sur les systèmes chaotiques. Avec Lorenzo Diaz de Rio de Janeiro, nous avons mis en évidence des *systèmes chaotiques universels* ; cette appellation recouvre une réalité (mathématique) vraiment surprenante : chacun de ces systèmes contient tous les systèmes existants (de même dimension), présente simultanément tous les comportements chaotiques connus ou non encore connus, ainsi d'ailleurs que tous les comportements non chaotiques. Ces systèmes font partie d'une classe plus vaste appelée « *systèmes sauvages* ». Que viennent faire les mathématiciens, supposés si rigides et cartésiens, dans le monde de l'imprédictibilité ? En quoi le chaos peut-il être un objet mathématique ? Il faut reprendre les choses depuis le début.

Quand on parle de chaos, en mathématiques, en physique ou en chimie, il s'agit d'évolution chaotique, c'est-à-dire que l'état présent du système étudié ne permet pas de prédire son évolution. On pense bien sûr à la météorologie : ce que les météorolo-

gues ont à leur disposition, ce sont des informations sur le temps aujourd'hui, un peu partout sur la planète, et de cela ils essayent de déduire le temps qu'il fera demain, après demain... et si leurs prédictions ont visiblement gagné en fiabilité ces dernières années, on constate au jour le jour des erreurs importantes pour les prédictions au lendemain, sans parler des prédictions à plus long terme.

Que la météo soit chaotique, on le comprend facilement : il y a tellement de paramètres. La description précise du temps présent nécessite une masse énorme de données à gérer. De la même manière, que la bourse soit chaotique fait partie des choses admises facilement : on ne contrôle jamais tous les paramètres.

La théorie du chaos s'est développée de façon spectaculaire dans les années 60, quand divers domaines des sciences ont mis en évidence des évolutions chaotiques dont les expressions étaient extrêmement simples. Je ne citerai qu'un exemple, spectaculaire par sa simplicité et par les développements qu'il a amenés.



May⁴, biologiste, s'intéressait à la croissance d'une population de bactéries : il remarqua que, tant que la population est très peu dense, elle se multiplie à intervalles de temps réguliers par un facteur constant ; quand cette densité devient conséquente, ce taux de croissance diminue. Quand on exagère la densité, le taux de mortalité dépasse alors le taux de croissance, la densité diminuant alors avec le temps. Si la densité est réellement exagérée, toutes les bactéries meurent. Mais si elles ne sont pas toutes mortes, elles peuvent recommencer alors à se reproduire. Notons d (compris entre 0 et 1) la densité des bactéries. May a considéré que la densité à l'instant suivant était une fonction de d , et il a cherché la fonction f la plus simple ressemblant à ses observations : $f_a(d) = ad(1-d) = ad - ad^2$ où a est un paramètre qui provient du milieu dans lequel vivent les bactéries, c'est-à-dire que, si la densité est de d à l'instant t , elle sera de $ad(1-d)$ à l'instant $t+1$. A l'instant $t+2$ la densité sera alors de $f_a(f_a(d))$, et pour connaître la densité à l'instant $t+n$ il suffit d'itérer n fois le procédé. Comme la fonction est très simple (trinôme du second degré) il est facile de faire un programme calculant la densité $d(t)$ à l'instant t en fonction de la densité initiale $d(0)$. May s'est aperçu que, Tant que le paramètre a est petit (entre 0 et 3), la densité $d(t)$ converge vers un état d'équilibre d (nécessairement point fixe de f_a , c'est-à-dire $f_a(d)=d$). Pour d'autres valeurs, ce qui est déjà plus surprenant, la densité $d(t)$ s'approche d'un comportement périodique, c'est-à-dire qu'elle oscille régulièrement entre plusieurs valeurs. Finalement, pour certaines valeurs de a , par exemple pour $a=4$, la densité $d(t)$ semble avoir un comportement aléatoire et prend successivement toutes les valeurs possibles, sans ordre apparent. De plus dans ce cas, l'évolution dépend aussi de façon radicale de la densité initiale $d(0)$. On est maintenant de plain-pied dans le monde des mathématiques : on s'est donné une famille f_a de fonctions de l'intervalle, et l'on veut étudier la

limite, quand n tend vers $+\infty$ de la suite $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ définie par récurrence par $x_{n+1} = f_a(x_n)$, en fonction du paramètre a et de la condition initiale x_0 . Cette famille f_a a fait couler beaucoup d'encre, depuis les années 70 et jusqu'à tout récemment⁵. De nombreuses expressions et le nom de nombreux mathématiciens sont liés à cette famille : « Cascades de doublement de période », « marche vers le chaos », « attracteur de Feigenbaum » (l'histoire ayant oublié que Coulet et Tresser l'ont trouvé simultanément), « opérateur de renormalisation »...

Les Systèmes dynamiques

Déterminisme et Systèmes Dynamiques

Le scientifique décrit l'état d'un système physique (mécanique, chimique, écologique...) à l'aide de quantités mesurables (positions et vitesses pour un système mécanique, densités de population en écologie...) en nombre fini, disons n : l'état d'un système est donc représenté par un point de l'espace euclidien \mathbb{R}^n . Très souvent, ces quantités sont soumises à des contraintes, si bien que l'ensemble M de tous les états possibles du système, appelé « espace des phases », est une partie de \mathbb{R}^n .

Si l'on croit au déterminisme et si le système est isolé de toute influence extérieure, son état initial $x(0)$ détermine son évolution. La *loi d'évolution* du système est l'application F , de M dans M , qui à l'état initial $x(0)$ associe l'état du système $x(1)$ à l'instant 1.

L'*orbite* d'un point x pour F est la suite $x_0=x, x_1=F(x), \dots, x_{n+1}=F(x_n), \dots$. Elle décrit l'évolution du système au cours du temps. On dit que le point x_n est le n ème itéré du point x par F et on note $x_n = F^n(x)$.

Un *système dynamique* est la donnée d'un espace des phases M et d'une loi d'évolution F de M dans M . Il faut imaginer un système dynamique comme un mouvement sur M , le point x allant en $F(x)$ puis en $F^2(x)$... Au temps n , le point qui était initialement en x sera en $F^n(x)$. On peut aussi l'imaginer comme un jeu de piste où, en tout point x , est

indiquée la prochaine étape : $F(x)$. Si l'on regarde l'espace M avec le mouvement de ses points, on voit en fait toujours la même chose : le point qui est en x à l'instant n sera en $F(x)$ à l'instant $n+1$. Par contre il n'est pas facile de suivre l'orbite d'un point en particulier. La *dynamique* d'un tel système est le comportement, quand n tend vers l'infini, des orbites $x, F(x), \dots, F^n(x), \dots$ pour toute condition initiale $x \in M$.

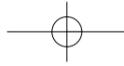
Le but de la branche des mathématiques appelée *Systèmes Dynamiques* est de fournir une procédure générale permettant de décrire la dynamique de tout système dynamique. Le type d'étude et d'information que l'on va pouvoir donner dépend beaucoup de l'espace M et de la régularité (continuité, dérivabilité, etc...) de la fonction F .

Quels systèmes étudions-nous ?

On a vu que l'espace des phases M est naturellement une partie d'un espace Euclidien. Voyons quelques exemples simples, pour fixer les idées :

Vous avez sans doute déjà étudié le pendule simple : une masse accrochée à un axe par une barre rigide, et pouvant tourner sans frottements autour de cet axe, et soumise à la seule force de la pesanteur. L'état du système est décrit par la position du pendule, donné par l'angle α que fait la barre avec la verticale, et sa vitesse donnée par la dérivée α' . L'angle α est un point sur le cercle unité de \mathbb{R}^2 , alors que la vitesse est un nombre réel. L'espace des phases est donc naturellement le cylindre vertical de \mathbb{R}^3 , de base le cercle unité du plan des xy . C'est un espace de dimension 2, une surface lisse. Cependant, on sait que l'énergie (potentielle + cinétique) est conservée. Les orbites évoluent donc sur les courbes de niveau de cette fonction et ces courbes sont des cercles, sauf une courbe singulière en forme de 8, la singularité correspondant au point d'équilibre instable : le pendule immobile, à la verticale au dessus de l'axe. On voit sur cet exemple que le cercle est un exemple naturel de l'espace des phases M .





Regardons à présent le pendule double : un pendule simple est accroché à la masse mobile d'un autre pendule simple. L'état du système est décrit par les deux angles α et β que font les deux tiges avec la verticale et par les deux vitesses angulaires α' et β' , donc par un point dans l'espace de dimension 4 qui est le produit cartésien $S^1 \times S^1 \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}$. Que l'espace des phases soit de dimension 4 ne doit pas vous inquiéter : cela signifie juste que le système a 4 degrés de liberté. Une fois de plus, l'évolution préserve l'énergie. Les orbites du système évoluent donc sur les « surfaces d'énergie » qui sont ici des espaces de dimension 3 aux « formes » variées. Le pendule double est un système chaotique qui a été popularisé par les bibelots de bureau en métal chromé représentant des acrobates ou des dauphins virevoltant de manière imprévisible... Ces bibelots sont bien sûr munis d'une pile permettant de compenser les frottements et d'assurer un mouvement perpétuel. On voit ici que le chaos n'a rien d'inquiétant ou de terrible : c'est juste un mouvement déterministe qui a l'aspect d'une évolution aléatoire.

D'une façon générale, M est un espace lisse de dimension d (c'est-à-dire ressemblant localement à \mathbb{R}^d) et qu'on appelle « variété différentielle de dimension d ». Les mathématiciens préfèrent souvent les variétés « compactes » (comme le cercle, la sphère ou le tore) c'est-à-dire sans point à l'infini (contrairement au plan ou au cylindre).

Sur ces espaces M , nous considérons des applications F qui sont :

- continues (l'étude des systèmes avec discontinuités est moins avancée, à part quand M est un segment (de dimension 1))
- inversibles, c'est-à-dire que F admet une fonction réciproque notée F^{-1} (on étudie aussi les systèmes non-inversibles, mais une fois encore l'étude est moins poussée, à part en dimension 1). F et F^{-1} sont dérivables et leurs applications dérivées sont continues⁵.

Quels types d'arguments utilise-t-on ?

On s'attend à ce qu'un mathématicien fasse des calculs... alors pourquoi ne pas calculer les orbites d'un système ? Pour les systèmes les plus simples, c'est même possible. Mais cela a perdu tout sens si la moindre erreur sur la condition initiale x_0 ou sur la loi d'évolution F amène des orbites totalement différentes.

Voici juste une comparaison : pour localiser les zéros d'une fonction réelle $\varphi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ on peut bien sûr résoudre l'équation $\varphi(x)=0$, quand c'est possible. Mais, si φ est continue, on peut utiliser le théorème des valeurs intermédiaires : si x et y sont des points tel que $\varphi(x)<0$ et $\varphi(y)>0$, alors φ prend la valeur 0 en un point z situé entre x et y .

Cette comparaison n'est pas que théorique : considérons un système dynamique ayant la droite réelle \mathbb{R} comme espace des phases et comme loi d'évolution une application continue F de \mathbb{R} . Supposons que F possède un point périodique z de période 2 : c'est-à-dire que $F^2(z)=z$ alors que $F(z) \neq z$. Autrement dit, l'orbite de z fait un va et vient incessant entre z et $F(z)$.

Regardons l'application φ de \mathbb{R} dans \mathbb{R} qui à tout point x associe $\varphi(x)=F(x)-x$. On remarque que φ est une fonction continue qui change de signe entre z et $F(z)$: il existe donc un point y entre z et $F(z)$ pour lequel $\varphi(y)=0$, ce qui signifie que y est un point fixe de F : $F(y)=y$. On vient de montrer que : l'existence d'un point périodique de période 2 implique l'existence d'un point fixe.

En approfondissant cet argument simple, Sharkovsky (1964) a montré :

Théorème : soit F une fonction continue de \mathbb{R} dans \mathbb{R} . On suppose que F possède un point périodique x de période 3, c'est-à-dire que $F(x) \neq x$, $F^2(x) \neq x$ et $F^3(x)=x$. Alors, pour tout entier n , F possède au moins un point périodique de période n . En particulier, φ possède une infinité de points périodiques.

Ce théorème a été popularisé par la formule « période 3 implique chaos ».

Quelques types de dynamiques

Dynamiques non chaotiques

Les dynamiques les plus simples se comportent comme l'eau de pluie qui ruisselle sur une montagne, en descendant toujours la plus grande pente : toutes les gouttes, ou presque, descendent dans une vallée pour finalement se noyer dans un lac. Chacun de ces lacs a son bassin bien déterminé, et une goutte tombant sur son bassin rejoindra le lac, après un périple plus ou moins long. Des lignes de partage des eaux séparent ces bassins, et l'on peut imaginer qu'une goutte tombant sur cette ligne glissera le long de cette ligne de crêtes jusqu'à atteindre un col.

Pour un système dynamique, les orbites périodiques attractantes (point d'équilibres stables) jouent le rôle des lacs, et leurs bassins d'attractions sont séparés par les rares orbites qui aboutissent aux états d'équilibres de type « col ».

Le « chaoticien » de Jurassic Park, avec sa goutte d'eau imprévisible, décrivait non pas un système chaotique, mais la situation près d'un point d'équilibre instable (col ou source).

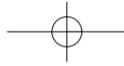
Dynamiques chaotiques simples

Peut-être le titre de cette section peut-il apparaître paradoxal. Mais, voyez plutôt ! Je vous présente ci-dessous la dynamique chaotique la plus simple possible, et vous risquez d'être déçu par sa simplicité même !

On prend pour espace des phases M le cercle, noté S^1 ; il peut être vu comme l'ensemble des angles : un point du cercle est donc un nombre de la forme $2\pi \cdot x$ avec $x \in [0,1]$. Remarquez que l'on peut aussi bien prendre x dans \mathbb{R} , simplement x et $x+1$ correspondent au même point du cercle.

On considère l'application F de S^1 dans S^1 consistant à multiplier x par 10. C'est une application continue, dérivable. Pour calculer l'orbite d'un point x pour F , c'est très simple en théorie : considérez le développement décimal $x=x_0, x_1x_2x_3\dots x_n\dots$. Alors le point $F^n(x)$ est





obtenu en supprimant les n premières décimales et en décalant la virgule $F^n(x)=x_n, x_{n+1}, \dots$.

Cependant, considérons la racine carrée $x=\sqrt{2}$. Vous me direz que c'est environ 1,414. Sur le cercle cela correspond au point 0,414. Donc le point $F(x)$ est environ 14,14 ce qui correspond au point 0,14 ; le point $F^2(x)$ correspond en gros à 0,4. Quant au quatrième point de l'orbite, $F^3(x)$, je n'ai plus aucune information sur sa position sur le cercle.

En fait, la moindre erreur sur la donnée initiale est multipliée par dix à chaque itération par F , et quand cette erreur atteint l'ordre de grandeur de 1 c'est que l'on n'a plus la moindre idée de où se trouve le point sur le cercle.

Comment se comportent les orbites ? De façons très diverses ! Par exemple :
- il existe une infinité d'orbites périodiques. Tout nombre $x=x_0, x_1x_2x_3x_4\dots x_n\dots$ est approché par des points périodiques : le point $x_0, x_1x_2x_3x_0x_1x_2x_3x_0x_1x_2x_3\dots$ est un point périodique de période 4 qui approche x à 10^{-3} près.

- L'orbite de tout nombre décimal se stabilise sur le point 0 après un certain temps.

- L'orbite de tout nombre rationnel finit par être périodique, après un certain temps.

- Pour beaucoup de points x (en fait presque tous au sens des probabilités) l'orbite de x parcourt indéfiniment tout le cercle.

Ce système déterministe chaotique est très bien décrit par les probabilités : il se comporte comme le tirage au sort, de façon indépendante, de chiffres entre 0 et 9. Et cela permet de retrouver un peu de prédictibilité, c'est-à-dire de faire des prévisions fiables avec calcul de risques d'erreur : prenons un nombre x au hasard. Si vous me demandez où sera $F^n(x)$ pour un n précis et grand, je vais devoir dire que je n'en sais rien. Par contre, si vous choisissez une région du cercle, par exemple l'intervalle $[0,3 \ 0,8]$, je vous dirai que l'orbite de x y passe la moitié du temps et que,

à tout moment, il suffit d'attendre 10 itérations pour que l'orbite y passe, avec moins d'une chance sur 1000 comme risque d'erreur.

Si la dynamique de la multiplication par 10 sur le cercle est très sensible aux conditions initiales, elle reste par contre globalement inchangée par petites modifications de la loi d'évolution F : on dit que F est *structurellement stable*. Cela veut dire que, si on choisit une loi d'évolution $G : S^1 \rightarrow S^1$ qui est proche de F , alors la dynamique de G est identique à celle de F .

Plus précisément :

Théorème de Shub (1969) : Soit $F : S^1 \rightarrow S^1$ une application continue, différentiable, et dont la dérivée F' est en tout point strictement supérieure à 1. Alors il existe un entier $k > 1$ et un changement de paramétrage du cercle S^1 tel que, dans ce nouveau paramétrage, F soit l'application $x \rightarrow k \cdot x$ (multiplication par k).

La multiplication par 10 sur le cercle est bien sûr une évolution très particulière. Mais une large classe de systèmes dynamiques, en toutes dimensions, possède ce comportement chaotique, bien décrit par les probabilités et structurellement stable. Ce sont les dynamiques *hyperboliques*, dont la théorie s'est développée dans les années 60 autour du mathématicien américain Smale et du Russe Anosov. Pour les dynamiques hyperboliques, l'espace des phases M est divisé en un nombre fini de bassins d'attraction (comme dans le cas des dynamiques non chaotiques). Dans chaque bassin, les orbites convergent vers un *attracteur*, qui peut être un ensemble très compliqué.

L'hyperbolicité est caractérisée par le fait que, sur chacun des attracteurs, F agit en dilatant certaines directions (c'est-à-dire que dans ces directions F agit comme la multiplication par un nombre > 1) et en contractant dans les autres directions (c'est-à-dire que F agit comme la division par un nombre > 1). La dynamique de F , en restriction à

chacun des attracteurs, ressemble alors par bien des côtés à la multiplication par 10 sur le cercle. Sinaï, d'une part, et Ruelle et Bowen, d'autre part, ont montré qu'à chacun des attracteurs correspond une loi de probabilité qui régit le comportement statistique de presque tout point dans le bassin de l'attracteur.

Initialement, Smale pensait que les lois d'évolution chaotiques non-hyperboliques étaient exceptionnelles et qu'elles correspondaient à une situation de bifurcation entre deux comportements hyperboliques. Il pensait ainsi qu'on arriverait à une description globale de l'ensemble des systèmes dynamiques. Cet espoir s'est effondré quand Smale lui-même avec Abraham a mis en évidence en 1970 des systèmes « robustement non-hyperboliques » c'est-à-dire qu'aucun système voisin n'est hyperbolique.

Enjeux de la recherche actuelle

Les systèmes hyperboliques ont montré qu'il n'y a pas de division entre déterminisme et comportement aléatoire, et pour beaucoup de physiciens, un « état d'équilibre » est désormais une loi de probabilité qui décrit la statistique des orbites.

Le problème, c'est qu'il y a de nombreux exemples (mathématiques) de systèmes chaotiques qui sont très mal décrits par les probabilités : si on essaye de faire des statistiques sur une orbite, par exemple en considérant la proportion de temps que l'orbite passe dans une certaine région de M , alors cette proportion va osciller entre plusieurs valeurs, si bien que si l'on attend mille ans on a l'impression que l'orbite passe souvent dans la région mais que si l'on attend 100000 ans, on pense en fait qu'elle n'y va jamais, mais cela va encore changer si on considère une plus grande échelle de temps.

Jusqu'à présent ce phénomène est purement théorique et n'a pas été rencontré dans les autres sciences. L'un des enjeux de la recherche actuelle est de décider si les systèmes « réels », je veux dire décrivant l'évolution d'un système physique, sont bien décrits par les probabilités⁹.



Systèmes chaotiques universels

Passons à présent directement à la recherche actuelle, faisant ainsi un bond de 30 années.

Nous avons vu des dynamiques non-chaotiques, puis des dynamiques chaotiques suffisamment simples pour être bien décrites. Voici à présent les dynamiques les plus complexes que l'on puisse inventer. Dans un article paru en 2003 aux *Publications Mathématiques* de l'IHES¹⁰, Lorenzo Diaz et moi définissons la notion de *Systèmes Dynamiques Universels*. Comme je l'ai dit de façon informelle en introduction, ces systèmes « contiennent » tous les systèmes correspondant à la dimension d de l'espace des phases M . Laissez moi être un peu plus précis.

Imaginez un écoulement, comme celui d'un fleuve qui se heurte au pilastre d'un pont, créant ainsi de nombreuses turbulences, des tourbillons, au milieu d'autres zones plus calmes. Combien peut-on distinguer de tourbillonnements ? Il y en a des gros, des petits, des vraiment minuscules ; plus on regarde précisément et plus on en voit, de plus en plus petits : leur nombre est en fait infini. Concentrons nous à présent sur un petit tourbillon : pour y voir clair on augmente l'image (comme au microscope) et on ralentit le mouvement. Dans le cas des systèmes universels, ce que l'on voit dans un tourbillon n'a rien à voir avec ce que l'on voit dans les autres. Dans certains tourbillons l'écoulement semble non-chaotique, dans d'autres il sera chaotique hyperbolique, dans d'autre enfin il sera lui-même un système chaotique universel avec une infinité de petits « sous-tourbillons », les uns simples, les autres chaotiques, etc... L'adjectif « universel » recouvre une réalité mathématique : il signifie que, si l'on considère l'ensemble des sous-dynamiques contenues dans ces tourbillons, la collection ainsi obtenue contient l'ensemble de tous les systèmes possibles.

On considère une loi d'évolution F sur l'espace des phases M et le disque D de rayon r centré en un point $o \in M$, c'est-à-dire l'ensemble des points de M à distance inférieure à r de o . On suppose que tous les points de D ont leurs orbites qui reviennent dans D , toutes en même temps : pour un certain temps t , quelque soit le point x_0 de D , le point $F(x_0)$ est le premier retour dans D de l'orbite de x_0 . On dit que le disque D est périodique de période t , et on appelle application de premier retour dans D l'application R de D dans D qui à un point x de D associe le point $F(x)$.

Pour un système sauvage, il existe une infinité de disques disjoints $D_1, D_2, \dots, D_i, \dots$ qui sont périodiques (chaque pour sa période t_i), et pour tout i on considère l'application R_i de premier retour dans D_i . Pour chaque disque D_i , on choisit des coordonnées dans lesquelles D_i est le disque unité de \mathbb{R}^d , que l'on notera D^d . Dans ces coordonnées¹¹, l'application R_i est vue comme un difféomorphisme du disque D^d , que l'on note F_i . Autrement dit, le difféomorphisme F contient comme sous-dynamiques les difféomorphismes F_i du disque unité D^d de dimension d .

On dit qu'un système sauvage F est universel si tout difféomorphisme $G : D^d \rightarrow D^d$ est approché, aussi bien qu'on le veut, par des applications F_i qui sont des sous-dynamiques de F . Un système dynamique universel contient donc tous les phénomènes robustes (de dimension d) comme sous-dynamiques.

Il est facile à un mathématicien construire des exemples d'applications F continues qui soient des systèmes universels. C'est déjà plus délicat si l'on veut que F et F^{-1} soient dérivables¹², cependant quel est l'intérêt de construire de tels exemples ? Il ne s'agit pas d'un exercice de virtuosité mathématique.

- Nous avons été amené à découvrir ces systèmes universels au cours d'une longue réflexion collective sur les propriétés robustes des systèmes dynamiques, et notre découverte a modifié en profondeur cette réflexion.

- Les systèmes universels ne sont pas robustes, mais « presque » : ils ne résistent pas à toutes les perturbations mais à « presque toutes ». On dit qu'ils sont localement génériques.

- Ils sont créés par une configuration très simple, si simple qu'il est clair que cette configuration existe dans des systèmes intéressant la physique ou d'autres sciences : il suffit qu'existent un petit nombre de points d'équilibres, dynamiquement reliés deux à deux, de telle façon que les directions dilatées ou contractées en ces points ne soient pas organisables de façon cohérente (voir l'encadré ci-dessous)

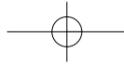
En dimension 3, considérons une loi d'évolution F possédant 4 points d'équilibres x_0, x_1, x_2 et x_3 de type col, qui soient « dynamiquement reliés » c'est-à-dire que certaines orbites vont de x_0 à x_1 d'autres de x_1 à x_2 , etc.

On suppose qu'au voisinage de x_0 et de x_1 , l'application F dilate deux directions et contracte la troisième, et qu'au contraire au voisinage de x_2 et de x_3 , l'application F dilate une seule direction et en contracte deux.

On suppose que les directions dilatées de x_1 et les directions contractées de x_3 présentent en outre une composante de rotation (mathématiquement parlant, cela signifie que la partie linéaire de F en ces points possède une valeur propre complexe). Nous avons montré que :

1. par une petite perturbation de F , cette situation peut être rendue robuste¹³.

2. cette situation implique (génériquement) l'existence d'une infinité de disques périodiques disjoints (autrement dit, F est sauvage). La raison en est qu'il existe alors des orbites qui restent longtemps près de x_0 , puis vont, par exemple près de x_3 , vont alors près de x_2 etc.. Le terme de rotation près de x_1 et de x_3 fait que une direction initialement contractée par F sera ensuite dilatée pour être peut-être contractée à nouveau plus tard. Au lieu d'avoir une organisation cohérente du phénomène de dilatation contraction, comme dans le cas des systèmes hyperboliques, on a



ici un mélange de toutes les directions contractantes et dilatantes. Ceci crée de petites régions de M où l'action de contraction ou celle de dilatation domine, engendrant une infinité de sous-dynamiques indépendantes, caractéristique du comportement sauvage¹⁴. Ajoutons encore une hypothèse sur les points x_0 et x_1 : nous demandons que le phénomène de dilatation domine en x_0 et que la contraction domine en x_1 (mathématiquement parlant, nous demandons que le jacobien de F soit plus grand que 1 en x_0 et plus petit que 1 en x_1). Nous avons alors montré¹⁵ que cette situation de mélange des directions de contractions et de dilatations, et de régions principalement dilatante ou contractante engendre « n'importe quoi » ou plutôt une coexistence de toutes les dynamiques possibles comme sous-dynamiques de F : ces systèmes sont donc universels.

Notre recherche poursuit plusieurs pistes :
- d'abord nous cherchons à caractériser les systèmes sauvages (nous n'avons pour l'instant que certains procédés les engendrant).

- Pour les autres (dit *apprivoisés*) nous cherchons à donner une description précise de leur dynamique, en particulier nous cherchons s'ils sont bien décrits par les probabilités.

- Pour les systèmes sauvages, nous cherchons à diviser l'espace des phases M en régions où la dynamique est simple, et d'autres où la dynamique est sauvage. Les régions où la dynamique est sauvage contiennent des sous-régions où la dynamique est simple : ceci permet de diminuer les régions de dynamique sauvages. Nous cherchons à comprendre s'il est possible ainsi de réduire autant que l'on veut les régions de dynamique sauvage, si bien que celles-ci seront négligeables.

- Nous cherchons également s'il existe des dynamiques sauvages mal décrites par les probabilités. L'existence de tels systèmes signifierait soit que l'on est arrivé aux limites du modèle mathématique et qu'il faut donc adapter le modèle (en considérant par exemple les systèmes dynamiques avec un petit *bruit* aléatoire), soit qu'il existe vraiment des systèmes physiques mal décrits par les probabilités. Il faudrait alors faire appel à de nouvelles théories pour les décrire. ■

Conclusion

Nous venons de voir qu'une configuration relativement simple d'états d'équilibre de type col engendre les dynamiques universelles qui sont les plus complexes imaginables. La simplicité de la configuration les engendrant ainsi que la robustesse de cette configuration assurent que cette configuration va être rencontrée dans les évolutions de systèmes physiques. Ceci ne veut pas dire que les systèmes universels vont être « vus » par les physiciens : rien ne dit en effet que les systèmes physiques soient génériques. De plus, même si certains systèmes physiques sont universels, il est possible que les régions de M contenant les sous-dynamiques aient une taille si petite que les physiciens ne verront qu'un nombre fini d'entre elles, l'aspect sauvage de la dynamique étant « négligeable ».

Notes

¹ Nous verrons que ce n'est pas un vrai exemple de situation chaotique, mais juste un point d'équilibre instable.

² Question posée en 1972 par le météorologue E. Lorenz.

³ Cela signifie que le but principal de mes recherches est un théorème de mathématique (peut-être en relation avec la physique ou d'autres sciences) et non pas un contrat avec une industrie.

⁴ Ce travail de May a été publié dans la revue *Nature* en 1976.

⁵ On peut dire à présent que l'on comprend bien la famille f_a pour « presque toutes » les valeurs du paramètre a .

⁶ On dit que F est un « difféomorphisme ».

⁷ Ceci est une version simplifiée du théorème de Sharkovsky.

⁸ Ce résultat n'est vrai que sur \mathbf{R} ou sur un intervalle : une rotation d'angle $1/3$ de tours sur le cercle a toutes ses orbites périodiques de période 3, mais n'a aucun point fixe.

⁹ Du point de vue du mathématicien, il n'est pas facile de savoir quel système dynamique décrira un jour l'évolution d'un système physique ayant un intérêt pratique. Une idée communément admise est qu'une propriété sera vue par les systèmes physiques si cette propriété résiste aux petites perturbations du système (on dit que la propriété est robuste).

¹⁰ Institut des Hautes Etudes Scientifiques, situé à Bures-sur-Yvette, au sud de Paris. Leurs Publications Mathématiques sont la plus prestigieuse revue française de mathématiques.

¹¹ On appelle renormalisation le procédé qui consiste à considérer l'application de premier retour sur un disque et à changer de coordonnée sur le disque pour que celui-ci devienne le disque unité.

¹² Il n'est pas connu à ce jour s'il existe des systèmes universels plus réguliers (par exemple 2 fois dérivables, ou mieux analytiques). Le problème est que de mettre des dynamiques compliquées dans de tout petits disques a tendance à faire exploser la dérivée seconde.

¹³ Ce résultat a fait l'objet de nombreuses publications, l'une des clefs étant un travail de Diaz et moi-même, publié aux *Annals of Mathematics* (meilleure revue américaine) qui explicite un procédé reliant dynamiquement de façon robuste des points d'équilibres.

¹⁴ Ceci est un résultat de Diaz, Pujals et moi-même, récemment paru lui aussi aux *Annals of Mathematics*.

¹⁵ Dans notre article aux *Publications Mathématiques de l'IHES*.



Le Rayonnement synchrotron :

un outil performant pour les recherches

■ Bruno DOMENICHINI

(Laboratoire de Recherches sur la Réactivité
des Solides, UMR 5613 CNRS-Université de
Bourgogne)

Voir pour comprendre

Depuis toujours, l'Homme a eu besoin de la lumière pour comprendre le monde qui l'entoure. Ainsi, la compréhension de l'univers a découlé, durant des millénaires, de l'observation directe de la lumière que nous envoient les étoiles, celle-ci pouvant être amplifiée par un télescope. De même, la découverte des micro-organismes vivants a simplement résulté de leur mise en lumière à travers les lentilles d'un microscope.

Cependant, une loi simple de la physique veut que l'on ne puisse pas distinguer un objet d'une taille inférieure à celle de la longueur d'onde de la lumière utilisée pour l'observer. Or, la lumière visible est comprise dans une gamme restreinte comprise entre 400 et 700 nm (400 à 700 milliardièmes de mètre). En d'autres termes, une vision optique directe, même amplifiée par un système complexe de lentilles, se limitera à des objets d'environ la taille d'une bactérie.

Pour voir des structures plus petites, telles que les molécules ou les atomes qui composent la matière, il faut disposer de rayonnements de longueurs

d'onde beaucoup plus courtes, par exemple de rayons X. Ces radiations, découvertes en 1895 par G.C. Röntgen qui fut le premier prix Nobel de physique, sont de simples ondes électromagnétiques au même titre que la lumière visible. Cependant, leurs longueurs d'onde sont comparables aux distances entre les atomes. Ils constituent donc un rayonnement de choix pour celui qui veut explorer le nano-monde, c'est-à-dire le monde des briques élémentaires qui composent notre univers. Ainsi, dès 1912, M. von Laue et P. Knipping obtinrent le premier diagramme de diffraction par rayons X d'un cristal permettant de déterminer la position respective de chacun des atomes qui le composaient.

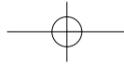
Malgré ces résultats remarquables, les sources à rayons X classiques, encore utilisées aujourd'hui dans tous les laboratoires, présentent de nombreuses limites : la lumière est émise dans toutes les directions de l'espace, ce qui rend délicat sa focalisation et elle n'est intense que sur des longueurs d'onde particulières, ce qui en restreint considérablement l'utilisation. Le besoin de sources polychromatiques (c'est-à-dire composées d'un ensemble continu de

longueurs d'onde), très intenses et possédant une unité directionnelle était donc d'une haute importance. De telles sources apparurent à la fin des années 1960. Elles émettent un rayonnement qui fut longtemps considéré comme une simple émission parasite des premiers accélérateurs de particules.

Et la lumière synchrotron fut ...

Les cyclotrons constituèrent les premiers accélérateurs de particules. Ils ont été construits par les physiciens dans les années 1930, leur vocation étant de scinder le noyau des atomes grâce à des processus de collisions de très haute énergie de façon à en déduire les lois fondamentales de la physique. C'est dans un accélérateur d'un type peu différent que le rayonnement synchrotron fut observé pour la première fois en 1947. Ce rayonnement, qui est caractéristique de toute particule chargée soumise à une accélération, fut immédiatement considéré comme une nuisance puisqu'il faisait perdre de l'énergie aux particules étudiées.

Cependant, vingt ans plus tard, les scientifiques de la matière comprirent



qu'il s'agissait en fait d'une source de photons, autrement dit, de lumière, aux propriétés exceptionnelles : domaine spectral continu de l'infrarouge aux rayons X, faible divergence, polarisation, cohérence, structure temporelle... Rapidement l'idée selon laquelle ce rayonnement pouvait être utilisé spécifiquement pour sonder la structure et les propriétés de la matière fit son chemin et des installations dédiées à sa production virent le jour tant en Europe qu'en Amérique ou en Asie. Aujourd'hui, une quarantaine de sources de rayonnement synchrotron apportent des informations inestimables dans de très nombreux domaines de recherche en tentant de répondre aux besoins toujours croissants des scientifiques.

Comment est produite la lumière synchrotron ?

Le rayonnement synchrotron est généralement émis à partir de l'accélération d'électrons relativistes, c'est-à-dire dotés d'une très grande énergie et se déplaçant de ce fait à une vitesse proche de celle de la lumière. Pour cela, les particules sont tout d'abord produites à partir d'un canon à électrons classique, peu différent, dans le principe, de celui que l'on trouve dans sa télévision. Leur énergie (c'est-à-dire leur vitesse) est ensuite augmentée dans un accélérateur linéaire puis dans un accélérateur circulaire où leur énergie atteint progressivement quelques GeV (milliards d'électrons-volts) avant d'être transférés dans un anneau de stockage. Celui-ci est constitué de sections courbes et droites au sein desquelles les électrons tournent à énergie constante pendant des heures à l'intérieur d'une chambre maintenue sous vide. La trajectoire des électrons est définie par les champs magnétiques qu'ils traversent et, lorsque les électrons passent dans une section courbe, ils sont déviés de plusieurs dizaines de degrés. Cette déviation, qui peut être assimilée à une accélération centripète, conduit les électrons à émet-

tre, tangentiellement, de la lumière dite synchrotron. L'énergie perdue par les électrons est alors compensée par des cavités radiofréquence qui réinjectent de l'énergie aux particules. De petites structures magnétiques (onduleurs ou wigglers) formées d'aimants juxtaposés et insérées au sein de l'anneau permettent d'obtenir un faisceau de lumière beaucoup plus intense et plus concentré.

Le rayonnement produit dans les aimants de courbures, les onduleurs ou les wigglers est dirigé ensuite, à l'aide de systèmes optiques complexes, vers des stations expérimentales appelées « lignes de lumière ». Chacune est un véritable laboratoire ouvert aux chercheurs du monde entier par l'intermédiaire de comités de programmes qui sélectionnent les expériences qui seront réalisées. Pour les dispositifs de dernière génération, la lumière synchrotron ainsi produite est mille milliard de fois plus intense que celle d'un tube à rayons X classique et dix mille fois plus intense que la lumière solaire.

Aussi, l'organisation des recherches autour d'un centre de rayonnement synchrotron obéit-elle à des règles particulières : les anneaux modernes sont conçus pour assurer le fonctionnement simultané de plusieurs dizaines d'expériences, fonctionnent nuits et jours et sont ouverts à une large communauté d'utilisateurs, nationaux ou internationaux. Ils constituent des lieux d'échanges privilégiés entre les chercheurs, favorisant les projets pluridisciplinaires.

Chaque centre synchrotron possède des caractéristiques qui lui sont propres. Ainsi, l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) à Grenoble a été conçu spécifiquement pour des expériences nécessitant de hautes énergies, c'est-à-dire des rayons X durs ayant de courtes longueurs d'onde. Ces rayonnements sont notamment destinés à des analyses de matériaux massifs. À l'inverse, l'anneau du laboratoire ISA (Institut for Synchrotron radiation at Aarhus), situé dans la seconde ville du

Danemark, a été optimisé pour la production de lumières de grandes longueurs d'onde (rayons X mous ou rayons ultra-violet) permettant de nombreuses applications sur des systèmes biologiques ou en phase gazeuse. Cependant, la plupart des machines construites récemment (HASYLAB (Hamburger SYNchrotronstrahlungs-LABor) à Hambourg, ELLETRA à Trieste, SLS (Swiss Light Source) à Villigen, ...) ou en cours de construction (SOLEIL (Source Optimisée de Lumière d'Énergie Intermédiaire du LURE) sur le plateau de Saclay, DIAMOND près d'Oxford ou ALBA à Barcelone) sont extrêmement brillantes dans de vastes gammes de longueurs d'onde et autorisent tout type d'analyses.

La Lumière synchrotron : un outil inestimable pour les chercheurs du LRRS

Les techniques d'analyses les plus simples qui utilisent la lumière synchrotron mettent en jeu deux formes caractéristiques d'interactions rayonnement/matière : les interactions élastiques et les interactions inélastiques.

Dans le premier cas, la lumière qui arrive sur l'échantillon est simplement détournée : on parle alors de diffusion. Lorsque celle-ci a lieu dans toutes les directions de l'espace, elle est, par exemple, utilisée pour déterminer la répartition et la taille de particules ou des grains de matière lorsqu'ils sont dispersés dans une solution. Lorsque la diffusion est cohérente et résulte d'une interaction avec des plans ou des lignes d'atomes organisés à longue distance, on parle de diffraction. L'analyse des processus apparaissant permet alors de déterminer, avec précision, l'organisation des atomes responsables du phénomène de diffraction.

Une interaction inélastique correspond à une perte, partielle ou totale, de l'énergie de la lumière incidente. C'est notamment le cas lors d'un effet photo-électrique, quand une particule compo-



sant la lumière est absorbée par la matière et conduit à l'émission d'un électron. C'est l'énoncé de ce principe par Einstein en 1905 qui lui valut le prix Nobel seize ans plus tard. Les processus annexes liés à ces processus d'absorption et/ou d'émission sont extrêmement complexes puisqu'ils mettent en jeu à la fois les structures géométrique, électronique et magnétique des atomes. Ainsi, ces processus sont à la base d'un grand nombre de techniques spectroscopiques dont les noms ou acronymes semblent souvent barbares aux profanes (dichroïsme, spectroscopie de génération de fréquence-somme, EXAFS, XANES ...) qui permettent d'obtenir des informations chimiques, structurales et magnétiques sur un grand nombre de composés.

De tels outils, susceptibles de trouver leurs applications dans des disciplines aussi diverses que la physico-chimie des matériaux, la chimie moléculaire, la radiocristallographie, la géologie... ne pouvaient que passionner les chercheurs du LRRS, les objectifs de ce laboratoire étant, depuis sa création, d'appréhender le comportement de matériaux lors leur élaboration, de leur utilisation ou de leur dégradation. En effet, rapidement, ils comprirent tout le bénéfique qu'ils pourraient tirer des caractéristiques du rayonnement synchrotron, notamment le libre choix de la longueur d'onde de travail et une intensité du rayonnement sans égale. Ceci est d'autant plus vrai que l'Université de Bourgogne occupe une place privilégiée en Europe (figure 1) puisque l'ensemble des centres synchrotron de l'Union Européenne se situe à moins de 1500 kilomètres de Dijon. Aussi, plusieurs équipes du LRRS ont-elles aujourd'hui complètement intégré l'utilisation du rayonnement synchrotron dans leurs recherches, les premières utilisations ayant eu lieu au début des années 1990, non pas en Europe mais au NSLS (National Synchrotron Light Source) de Brookhaven (USA, état de New York).

Ces premières expériences avaient pour



Figure 1 : Répartition des machines synchrotron européennes montrant la position centrale occupée par Dijon. LURE (Orsay), SOLEIL (Saclay), l'ESRF (Grenoble) et l'anneau SLS du Paul Scherrer Institut (à Villigen, entre Zürich et Bale) ne sont qu'à trois heures de voiture. Notons que les dispositifs du LURE (DCI et super ACO) ont fermé en décembre 2003, alors que les centres DIAMOND et SOLEIL ne délivreront leurs premiers photons qu'en 2006. La construction de l'anneau ALBA, à Barcelone vient de démarrer.

but la caractérisation structurale de cristaux de silicate de calcium partiellement hydratés. Cette étude, qui fut menée parallèlement à des expériences de diffraction de neutrons, participa à une bien meilleure compréhension des réactions mises en jeu lors de la fabrication du plâtre. Ce travail fondamental a eu des retombées industrielles énormes puisque ses conclusions permettent, aujourd'hui, d'éviter un nombre important de problèmes liés au stockage du plâtre. Il ne fut pourtant qu'une première étape dans l'utilisation de la lumière synchrotron dans le cadre de la compréhension des réactions mises en jeu lors de la fabrication et de l'utilisation des liants hydrauliques (plâtre, ciment, béton).

En effet, quelques années plus tard, des expériences de diffusion des rayons X au petits angles couplées à des analyses de résonance magnétique nucléaire permirent de suivre la distribution en taille et en structure, d'agrégats de silicates alcalins au cours d'une réaction pathogène du béton. Ces expériences,

qui furent menées sur l'anneau DCI (Dispositif de Collisions dans l'Igloo) du LURE (Laboratoire pour l'Utilisation de Rayonnement Electromagnétique) à Orsay ont grandement participé à la compréhension de l'alcali-réaction, une réaction chimique très lente, mieux connue sous le nom de « cancer du béton » et qui ronge nombre de grands ouvrages.

Des expériences similaires furent conduites récemment au LNLS (Laboratorio Nacional de Luz Sincrotron) sur le campus de Campinas au Brésil. Elles autorisèrent la détermination des caractéristiques granulométriques de suspensions de nano particules d'oxydes de titane ou d'étain obtenues à partir d'un mode de synthèse original mis au point au LRRS et assisté par un chauffage micro-ondes. La caractérisation de composés solides nouveaux ou sous une forme inhabituelle est une constante du laboratoire. Ainsi, au milieu des années 1990, une grande partie des expériences utilisant le rayonnement synchrotron dévelop-

pés par les chercheurs du laboratoire a concerné l'analyse structurale de fines particules d'oxydes élaborées selon des procédés de synthèses originaux tels que la chimie douce ou la mécano-synthèse. Ces caractérisations furent réalisées en grande partie par diffraction résonante des rayons X, c'est-à-dire en utilisant la flexibilité en longueur d'onde du rayonnement incident pour exalter ou non une partie du signal émis par la diffraction. Ces travaux ont été conduits sur l'anneau DCI du LURE puis à l'ESRF et furent complétés par des déterminations de l'organisation locale des atomes par absorption de rayons X. Les résultats de telles expériences sont très difficiles à interpréter. Cependant, cette technique est largement utilisée car elle seule permet de remonter à la position précise des atomes au sein d'un solide lorsque la structuration de celui-ci n'excède pas quelques unités atomiques.

Un travail original, initié par le même groupe de chercheurs, fut le suivi de réactions autoentretenues par diffraction de rayons X en temps réel. En effet, devant la rapidité des phénomènes mis en jeu lors de telles réactions (elles se déroulent à très haute température et ne durent que quelques dizaines de secondes) la détermination des phases et des composés intermédiaires doit se faire avec des temps d'acquisition extrêmement courts (de 30 à 100 millisecondes par diffractogramme). Ceci n'était possible qu'en utilisant des sources de rayons X extrêmement intenses, c'est-à-dire en mettant à profit la brillance inégalée du rayonnement synchrotron. Ainsi, en couplant la diffraction des rayons X sous lumière synchrotron et la thermographie infrarouge, il a été possible de définir les chemins réactionnels qui conduisent à la formation de divers composés intermétalliques. Un exemple caractéristique, relatif au système fer/aluminium, est présenté sur la figure 2.

Les expériences de diffraction de rayons X en temps réel mené sur l'anneau DCI, n'ont pu être réalisées que grâce à une véritable collaboration entre notre laboratoire et une équipe du LURE.

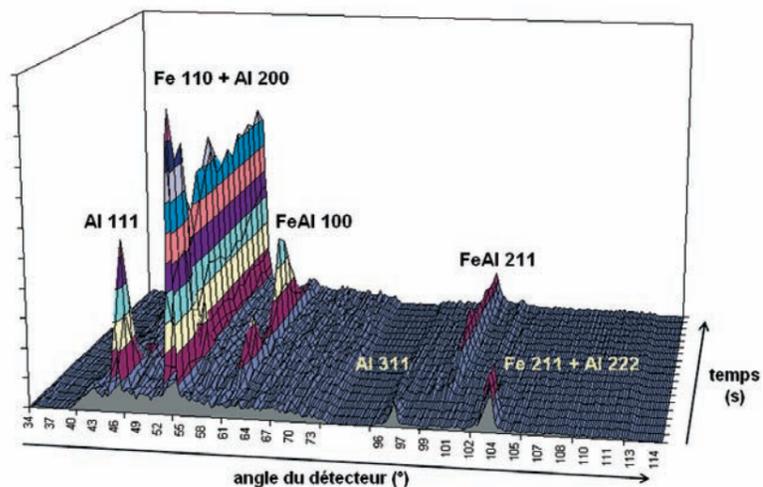


Figure 2 : Exemple d'un résultat de suivi d'une réaction autoentretenue à l'aide de la diffraction de rayons X en temps réel : des spectres de diffraction X sont enregistrés en continu lors de la réaction d'auto-combustion du fer (Fe) avec l'aluminium (Al). Cette réaction produit le composé FeAl mais passe par des phases intermédiaires qui sont mises en évidence grâce à cette technique. La réaction est très rapide puisqu'il se déroule moins de 40 secondes entre le début et la fin de la réaction.

La chambre réactionnelle utilisée lors de ces expériences a été, notamment, partiellement mise au point au sein des ateliers du LRRS. Ce dispositif sera installé sur une ligne de lumière du centre SOLEIL dès son ouverture fin 2006. D'une manière générale, au Laboratoire de Recherches sur la Réactivité des Solides, les plus grands utilisateurs de lumière synchrotron sont les groupes qui travaillent sur la conception ou l'utilisation de matériaux à l'échelle nanométrique. Un exemple illustrant ce

type de travaux concerne la préparation et la caractérisation de nano-objets supportés constitués de quelques atomes seulement (figures 3). Ces études, démarrées au milieu des années 1990, utilisent les caractéristiques propres de plusieurs centres : HASYLAB à Hambourg (Allemagne), ISA à Aarhus (Danemark), ELLETRA à Trieste (Italie) ainsi que les centres français du LURE (jusqu'en 2003) et de SOLEIL (à partir de 2006).

L'originalité de ces études réside avant

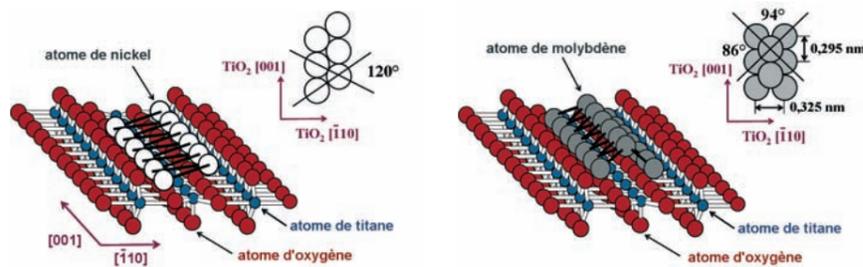


Figure 3 : Modèle de nano-objets (nano-bandes de nickel ou de molybdène) qu'il est possible d'élaborer à partir d'une surface d'oxyde sur laquelle on apporte des atomes métalliques. La caractérisation de ces objets a été réalisée par spectroscopie d'absorption des rayons X appliquée aux surfaces pour les bandes de nickel et par spectrométrie de photo-émission résonante associée à des analyses de diffraction de photo-électrons pour les bandes de molybdène. Du fait de leur taille réduite, ces structures présentent des propriétés exceptionnelles de réactivité qui en font des matériaux d'avenir en science des capteurs notamment.

tout dans la mise en synergie d'un ensemble de techniques expérimentales qui, pour certaines, restèrent longtemps la chasse gardée des physiciens du solide et ne furent donc que progressivement mises au service de la compréhension de dynamiques réactionnelles. Ce long travail allie ainsi la mise au point de nouvelles techniques de caractérisation des solides et leur utilisation. Encore une fois, cela ne peut être réalisé qu'au travers de longues collaborations, à tous les niveaux (technique et théorique), avec des chercheurs des centres synchrotrons.

A ce titre, un résultat majeur est la localisation des défauts au sein de cristaux de dioxyde de titane. Ce point présente des applications multiples, tant du point de vue fondamental qu'appliqué, par exemple dans les domaines des revêtements autonettoyants ou de la dépollution des effluents liquides et gazeux. Pour cette problématique, les réponses ont pu être apportées par des expériences de diffraction de photoélectrons réalisées en résonance (figure 4). Elles ont permis de localiser l'excès de charge créé par les défauts dans une zone précise du cristal. Ces expériences furent les premières de ce type à être réalisées dans un centre synchrotron. Conduites sur l'anneau ELETTRA en juillet 2003 et en juin 2004, elles serviront de références dans les années à venir. Il faut néanmoins préciser que cette technique d'analyse nouvelle, mise au point avec deux équipes du LURE, est l'aboutissement de longues expériences préliminaires réalisées les années précédentes sur la même machine et à HASYLAB.

Et Demain ?

Les techniques synchrotrons mises à la disposition des scientifiques sont extrêmement diversifiées. Elles sont notamment une aide inestimable pour le développement futur des nanotechnologies, l'extrême brillance de ces faisceaux alliée à leur flexibilité ouvrant des champs d'application complètement nouveaux, en rendant possible la résolution des problèmes à l'échelle de l'atome.

Les perspectives offertes par le rayonnement synchrotron sont donc multiples et concernent des secteurs aussi variés que la pharmacie, le médical, les cosmétiques, l'agroalimentaire, le bâtiment, la microélectronique, la métallurgie, l'environnement, le nucléaire,

l'industrie automobile, la papeterie, l'industrie chimique, etc. Il est important de préciser que, depuis plusieurs années, la plupart des centres synchrotrons européens pratiquent une politique volontariste d'ouverture vers les applications pour l'industrie. Dans ce contexte, les projets du laboratoire en termes d'utilisation du rayonnement synchrotron sont divers et concernent tant des recherches ayant un aspect académique fort que des collaborations avec des partenaires aussi divers que le CEA ou des PME européennes.

Par ailleurs, le développement récent et spectaculaire des méthodes de microanalyse ouvre de nombreuses perspectives en imagerie. Il existe aujourd'hui plus d'une dizaine de techniques permettant d'imager de façon sélective un paramètre

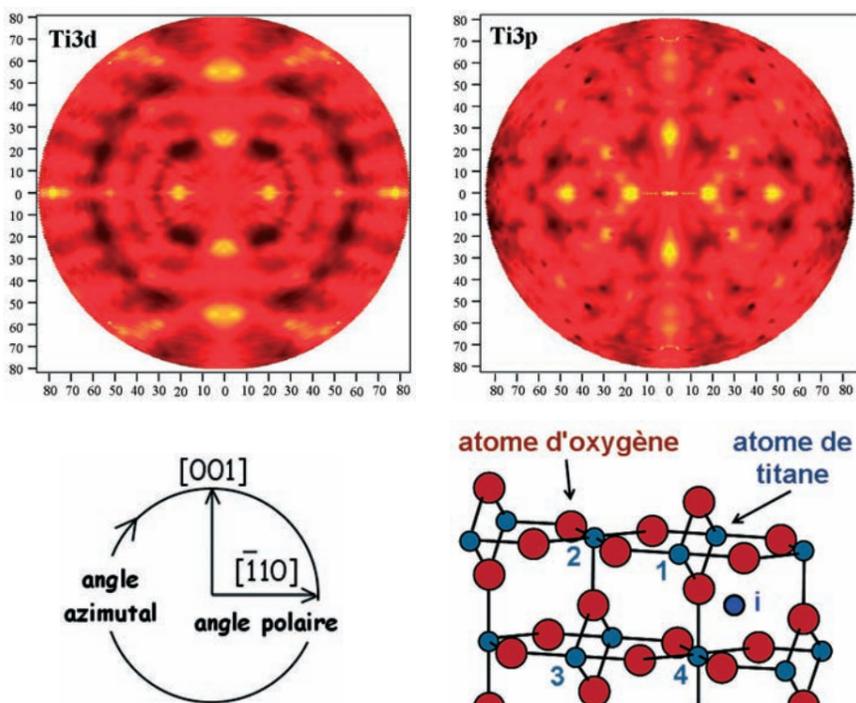


Figure 4 :

Problème du positionnement de l'excès de charge dû aux défauts dans le dioxyde de titane : quatre positions standard étaient possibles (notées de 1 à 4) plus une position interstitielle (notée i). La position exacte de l'excès de charge a été située autour de l'atome de titane n°3.

Ce résultat a été obtenu en comparant les diffractogrammes collectés dans une demi-sphère autour de l'échantillon (principe de la diffraction de photoélectrons) à partir des pics de photoémission Ti2p et Ti3d. Le signal Ti3d étant extrêmement faible, il a été exalté par résonance en choisissant une longueur d'onde précise du rayonnement incident.



chimique, magnétique, électrique ou structural d'un matériau. Les domaines d'application de ces techniques sont très variés. De plus en plus, celles-ci permettent de s'affranchir de toute préparation d'échantillons et donc d'observer leurs comportements dans des conditions proches de leur environnement naturel.

Enfin, un défi des plus exaltant que se sont lancé les scientifiques des centres synchrotron est de développer des procédés capables d'accéder à des temps de réaction de l'ordre de la nanoseconde, voire même de la picoseconde (mille fois plus rapide). Ces techniques sont basées sur la structuration temporelle du rayonnement synchrotron. En effet,

en injectant les électrons par « paquets » (il s'agit du terme effectivement utilisé par les physiciens des particules) au sein de l'anneau de stockage, la lumière peut être émise sous forme de flashes extrêmement courts qui structurent temporellement le rayonnement. Nul doute que des méthodes dérivant de ce concept seront utilisées dans le futur par les chercheurs du LRRS. ■

Note

¹ Dans quelques cas très particuliers, ce sont des positrons qui sont utilisés.

Cet article est dédié à la mémoire du Professeur Pierre Barret qui créa le Laboratoire de Recherches sur la Réactivité des Solides de l'Université de Bourgogne en 1965. Il en fut le directeur jusqu'en 1986 et en resta un membre actif jusqu'à sa disparition le 29 octobre 2004.



Masquer l'objet pour mieux le reconnaître

■ Lew F.C. LEW YAN VOON
 ■ Olivier AUBRETON
 ■ Benaïssa BELLACH
 ■ Bernard LAMALLE
 ■ Patrick GORRIA
Laboratoire LE2I, IUT Le Creusot
 ■ Guy CATHÉBRAS
Laboratoire LIRMM, Université Montpellier II

Introduction

L'évolution des technologies de pointe a repoussé les limites des domaines d'application de l'imagerie numérique de sorte que les capteurs d'images sont aujourd'hui omniprésents dans beaucoup d'applications, que ce soit des applications scientifiques ou des applications liées au divertissement et à un usage grand public. Ces capteurs fournissent en général une image qui est par la suite traitée par un ordinateur ou des circuits électroniques spécialisés. La course vers la miniaturisation et vers des systèmes autonomes compacts et légers nécessite aujourd'hui des capteurs d'images de plus en plus petits et de faible consommation. De plus, il existe des applications pour lesquelles il n'est pas indispensable d'avoir accès à l'image de la scène observée. On peut alors envisager de remplacer une partie du capteur – celle qui est destinée à conditionner et sérialiser l'image acquise pour la transmettre – par une électronique de traitement permettant de s'affranchir, partiellement ou totalement, de l'usage d'un ordinateur ou

d'un circuit de traitement spécialisé. De ce constat est né le concept de rétine électronique ou rétine artificielle qui a fait l'objet de nombreux travaux de recherche dans le monde entier depuis plus de quinze ans. Il peut être défini comme un circuit intégré, une puce, qui contient à la fois un capteur d'images et des circuits électroniques de traitement des images acquises afin de fournir, soit des images prétraitées, soit des informations caractéristiques des images.

Contexte

C'est dans cet axe de recherche que travaille l'une des équipes de recherche basée sur le site du Creusot du Laboratoire Electronique, Informatique et Image (LE2I), une unité mixte de recherche du CNRS (UMR 5158) et de l'Université de Bourgogne dont les activités sont toutes tournées vers l'image depuis son acquisition jusqu'à la prise de décision en passant par le traitement. Fort d'un potentiel de plus de 60 enseignants-chercheurs, 7 agents techniques et administratifs et 35 doctorants, le

laboratoire LE2I développe, depuis plusieurs années, des activités de recherche dans le domaine de l'image en collaboration avec des laboratoires français ou étrangers, ainsi que des industries françaises, dans le cadre de co-encadrements de thèses et de transferts technologiques. Les travaux de recherche du LE2I sont régulièrement publiés dans des revues et présentés dans des conférences de renommée internationale, et donnent lieu à plusieurs soutenances de thèses chaque année.

Ce texte fait un état des travaux de recherche menés, depuis plus d'une dizaine d'années, par l'équipe travaillant sur l'étude, la conception et la réalisation de rétines électroniques. Ces travaux concernent essentiellement les rétines dédiées à des applications de reconnaissance d'objets. Il s'agit d'un domaine de recherche transdisciplinaire qui allie la théorie de la reconnaissance de formes et la conception de circuits micro-électroniques. Comme les procédés de fabrication ne permettent pas d'intégrer la puissance de calcul d'un

ordinateur conventionnel dans un imageur, il est nécessaire d'adapter les algorithmes à la technologie cible. Nos travaux nous ont conduit à la fabrication de plusieurs prototypes de circuits intégrés au cours des six dernières années. Chaque circuit a permis de tester et de valider un nouveau concept, puis de mettre en évidence des problèmes à résoudre afin d'améliorer les techniques et méthodes mises en oeuvre. Nous proposons de décrire le principe de fonctionnement des différentes rétines que nous avons réalisées en commençant par la toute première. Celle-ci validait le concept de reconnaissance d'un objet par la mise en correspondance de deux images afin de déterminer leur degré de ressemblance par la mesure du coefficient de corrélation. L'une est l'image de référence qui est gravée sur le circuit sous la forme d'un masque binaire, l'autre est l'image observée qui est projetée sur la surface photosensible du circuit. L'image gravée sur le circuit fut ensuite remplacée par un masque programmé en intégrant des éléments mémoires dans le circuit de sorte que l'image de l'objet à reconnaître, que nous appellerons par la suite image de référence, puisse être modifiée à tout instant conférant ainsi au circuit une plus grande flexibilité. Plus récemment, nous avons mis au point une méthode permettant de s'affranchir du problème de la position de l'objet dans l'image conduisant ainsi à une nouvelle et troisième version de l'architecture de notre rétine électronique. Les derniers résultats obtenus sont très prometteurs et ouvrent de nouvelles perspectives dans la reconnaissance et le suivi d'un objet dans une scène.

Rétine électronique de reconnaissance d'objet

La première rétine que nous avons réalisée, et que nous avons baptisée « Coq », a été fabriquée afin de tester le principe de la mesure du degré de ressemblance entre deux images par la mesure du coefficient de corrélation. Le

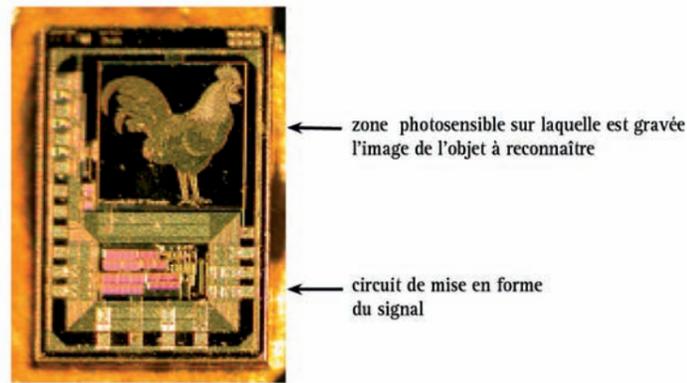


Figure 1: Rétine « Coq »

circuit est représenté sur la Figure 1. Il est constitué d'une zone sensible à la lumière sur laquelle est gravé un coq qui constitue l'objet à reconnaître. Il s'agit d'un dépôt métallique destiné à masquer partiellement la zone photosensible. On distingue également dans la partie inférieure des circuits de mise en forme du signal issu de la zone photosensible afin de le rendre disponible à la sortie du circuit. Un masque est en général binaire (transparent ou opaque), laissant passer la lumière sur certaines zones de la surface photosensible et occultant la lumière dans les zones masquées. Or l'image de l'objet que

nous souhaitons graver sur le circuit est une image en niveau de gris. Nous avons donc dû trouver une méthode pour convertir l'image à niveaux de gris en une image binaire (noir et blanc) sans que l'image résultante soit très différente de l'image initiale. La méthode qui a été retenue est une méthode couramment utilisée dans le domaine de l'impression : la génération d'images en demi-ton. Elle consiste à transformer une image en niveau de gris en une image binaire constituée de points noirs dont la densité spatiale permet de créer une sensation de niveau de gris.

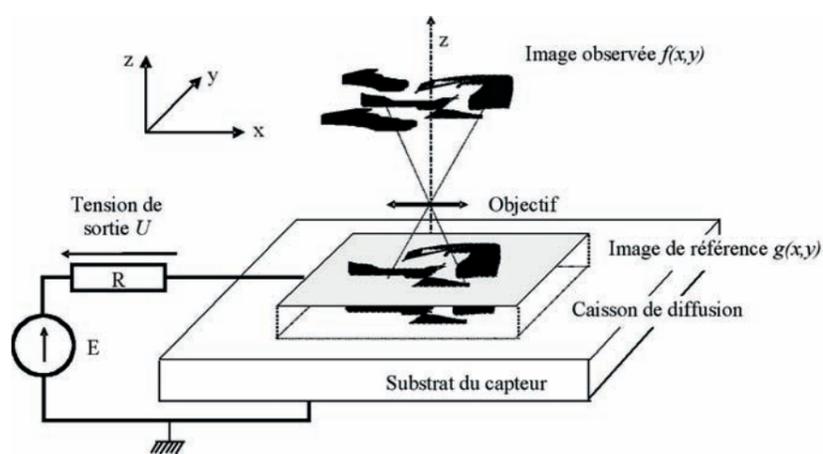


Figure 2 : Mesure expérimentale de la corrélation

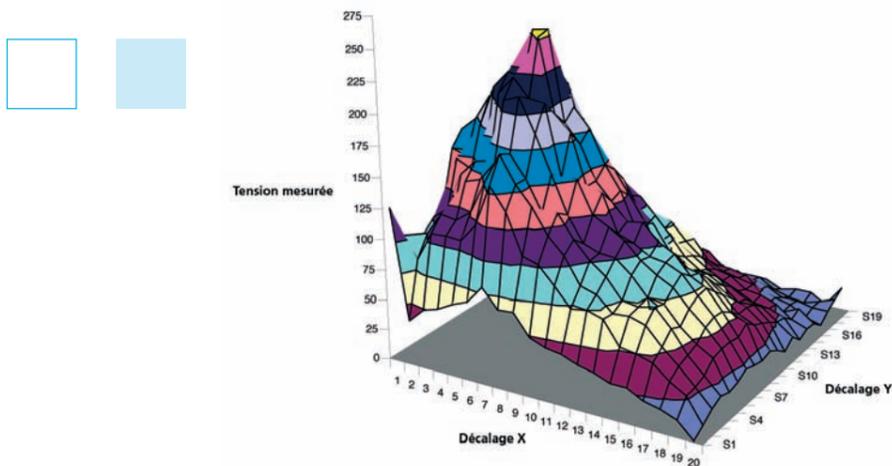


Figure 3 : Tension de sortie en fonction du décalage de l'image

Lorsque l'image d'un objet est projetée sur la partie photosensible au moyen d'un objectif, le capteur fournit, de façon instantanée, une tension traduisant le degré de ressemblance entre l'image gravée et l'image projetée. Par nature, il s'agit du principe même de la corrélation entre une fonction analogique (l'image projetée) et une fonction binaire (le masque gravé). Cette tension est maximale lorsque les deux images sont identiques et coïncident parfaitement. Ceci est mis en évidence par l'expérience que nous avons menée et qui est représentée sur la Figure 2

Nous avons projeté sur la zone photosensible du capteur une image identique à l'image dont le masque est gravé sur le circuit, c'est-à-dire l'image d'un coq, tout en s'assurant que les deux images sont de tailles identiques. Puis nous avons mesuré la valeur de la tension délivrée en sortie du circuit. Au cours de la mesure, l'image projetée balaye la totalité de la surface photosensible du capteur avec un pas constant dans les deux directions x et y. Pour chaque position de l'image projetée, la valeur de la tension est relevée et les données recueillies sont représentées sur la Figure 3. La valeur maximale de la tension est obtenue lorsque les deux images coïncident parfaitement, comme dans l'étude théorique.

Bien que, le capteur que nous venons de décrire soit, de par sa conception, limité à la reconnaissance d'un objet particulier dont le masque est gravé sur le circuit. Il nous a néanmoins permis de valider le concept de reconnaissance d'un objet à partir de masques binaires. Ce concept étant validé, nous avons cherché à pallier le manque de flexibilité de la méthode et à nous affranchir d'une gravure définitive en proposant une nouvelle architecture programmable. La nouvelle rétine est organisée sous la forme d'un damier de petites cellules photosensibles (réseau matriciel de pixels). Chacun des pixels est constitué par un élément photosensible sous la forme d'une photodiode associée à une unité logique dont le rôle est de mémoriser l'état du pixel correspon-

dant de l'image à reconnaître (transparent ou opaque) comme le ferait un masque.

Le schéma fonctionnel d'un pixel de la rétine programmable est représenté sur la Figure 4. L'opérateur électronique intégré au niveau du pixel permet de reconnaître une forme au moyen de deux phases successives. Dans une phase d'apprentissage préliminaire, l'image de référence est mémorisée sous forme binaire au niveau du pixel. La luminosité de chacun des pixels (niveau de gris ou signal I_{lum}) est comparée à la luminosité moyenne de l'image (niveau de gris moyen ou signal I_{seuil}), et le résultat de la comparaison est stocké dans un point mémoire. On réalise ainsi un masque constitué de deux zones distinctes classées selon leur luminosité dans l'image à reconnaître. Ensuite, au cours de la phase d'analyse, la rétine calcule un produit de corrélation entre l'image, en niveaux de gris, observée et une fonction binaire matérialisée par le masque. L'opération est réalisée en aiguillant tous les courants fournis par les pixels appartenant à une même zone du masque vers une des deux sorties. La sortie correspondant à la zone la plus lumineuse (zone blanche) est appelée I_{blanc} (corrélation positive), l'autre correspondant à la zone la plus sombre (zone noire) est appelée I_{noir} (corrélation négative). Le résultat de l'opération est donc disponible en sortie

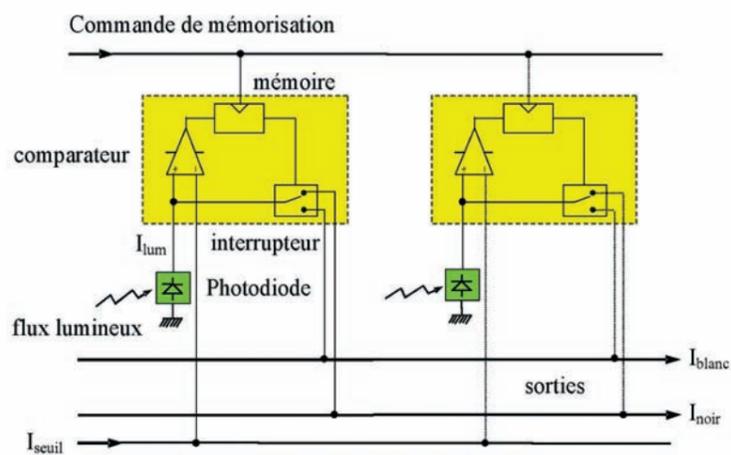


Figure 4 : Schéma fonctionnel du pixel



sous la forme de deux signaux caractéristiques du degré de ressemblance de l'image de référence et de l'image analysée. La mise en correspondance est effectuée par un procédé purement optique, le temps de traitement de l'information est donc extrêmement court, ce qui autorise même les applications ayant des contraintes temps réel les plus strictes. Il faut souligner également que l'extrême simplicité de l'analyse des signaux fournis assure au circuit une grande autonomie car il ne nécessite aucun système informatique ou électronique externe.

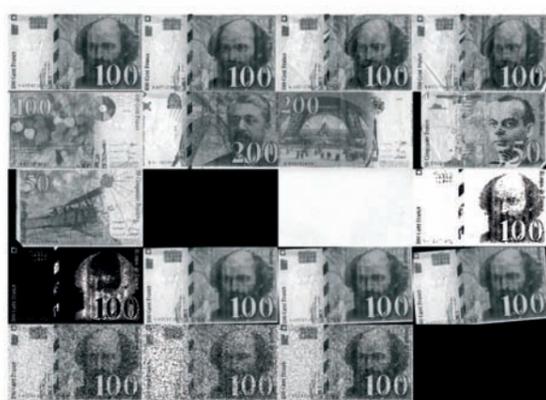
Nous avons testé le fonctionnement de cette rétine en utilisant les images de billets de banque représentées sur la Figure 5.a). Pour une image de référence (la première image, un billet de 100FF) mémorisée dans les éléments mémoires du circuit, la rétine fournit instantanément en sortie, les courants I_{blanc} et I_{noir} convertis en tension (V_{blanc} et V_{noir}) qui correspondent respectivement à la corrélation positive et à la corrélation négative entre les images observées et cette image de référence. La Figure 5.b) représente la distribution des valeurs normalisées entre 0 et 1 des tensions V_{blanc} et V_{noir} . Nous remarquerons que cette distribution est telle que tous les billets de 100 FF (représentés par X) sont isolés des autres billets (numérotés de 5 à D). A

noter que les images sont numérotées de 1 à 9 puis par les lettres de l'alphabet. Dans l'espace de représentation des tensions V_{blanc} et V_{noir} les numéros des billets de 100FF ont été remplacés par un X pour mieux les distinguer des autres billets.

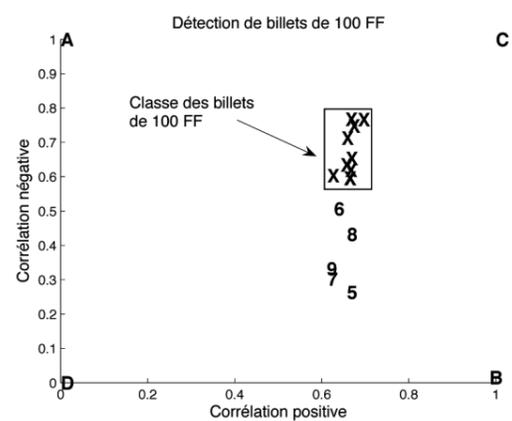
La mesure de corrélation positive (en abscisse) et négative (en ordonnée) montre qu'il est possible d'isoler tous les billets de 100 FF des autres billets, même en présence de bruit ou de déformation dans le cas de billets dégradés. Après avoir résolu le problème de la programmabilité de l'image de l'objet à reconnaître, nous nous sommes ensuite intéressés au problème de la position de l'objet dans la scène ainsi qu'à son orientation. En effet, comme la méthode de reconnaissance d'objet que nous avons intégrée au sein de la rétine électronique consiste à déterminer le degré de ressemblance de deux images en les superposant, il est évident que, si les deux images ne coïncident pas parfaitement, en raison d'un décalage ou d'une différence d'orientation, l'objet risque de ne pas être reconnu. Aussi, nous avons envisagé une solution qui consiste à déterminer dans un premier temps la position et l'orientation de l'objet analysé puis à, soit positionner la rétine, soit programmer le masque de sorte que le masque de l'objet à reconnaître et l'objet analysé coïncident

parfaitement. Comme la rétine fonctionne sur le principe de masques, il était souhaitable de pouvoir déterminer la position et l'orientation de l'objet à partir de masques.

Considérons par exemple un masque permettant de cacher toute la moitié gauche de l'image à analyser. Si l'objet que l'on cherche à localiser est situé dans la moitié gauche de l'image alors il sera masqué et par conséquent non-visible. Par contre, s'il est dans la moitié droite de l'image alors il sera visible. L'utilisation d'un masque simple tel que nous venons de le décrire nous permet donc de localiser l'objet horizontalement, soit dans la partie droite, soit dans la partie gauche, soit encore dans la partie centrale de l'image s'il n'est que partiellement visible. En appliquant le même raisonnement dans le sens vertical, nous pouvons de la même façon localiser l'objet verticalement. Par cet exemple très simple nous montrons qu'il est possible de déterminer avec plus ou moins de précision la position d'un objet dans une image. La précision de la localisation dépend du masque choisi et l'on peut remarquer que l'utilisation d'un masque à plusieurs degrés de masquage dans le sens horizontal (respectivement vertical) permet de localiser précisément l'objet dans l'image en déterminant son degré de visibilité. Mathématiquement la



a) images utilisées pour le test



b) Distribution des valeurs de corrélation normalisées

Figure 5 : Un exemple de reconnaissance de billets de banque



M_{00}						
	S	92106	92106	92106	92106	92106
M_{10}						
	S_x	33860	41361	48879	55928	63376
M_{01}						
	S_y	32492	39525	46954	54496	61470
	X_0	23,52	28,73	33,96	38,86	44,04
	Y_0	22,57	27,46	32,62	37,87	42,71

Figure 6 : Masquage de l'objet et détermination de la position

détermination des coordonnées x et y de l'objet dans l'image correspond aux calculs de corrélation entre l'image de objet à localiser et deux images représentant un dégradé de niveau de gris (l'un dans le sens horizontal et l'autre dans le sens vertical). Ensuite, connaissant la valeur moyenne de l'image – obtenue par un calcul de corrélation entre un masque totalement transparent et l'image à analyser – et le nombre de pixels en hauteur et en largeur de l'image, il est facile de déterminer les coordonnées du centre de l'objet dans l'image. Ces calculs de corrélation sont tout à fait compatibles avec l'architecture des rétines que nous avons conçues. Il suffit de mémoriser les images de dégradé de niveau de gris sur le circuit après les avoir transformées en des images binaires en utilisant un algorithme de génération d'image en demi-ton. Le principe de la localisation d'objet dans une image est illustré par un exemple sur la Figure 6.

Nous avons représenté sur cette figure les masques utilisés ainsi que les valeurs du coefficient de corrélation

pour différentes positions de l'objet. La valeur moyenne notée S de l'image est obtenue à partir d'un masque correspondant à une image totalement blanche (masque transparent). Nous remarquons que cette valeur moyenne est indépendante de la position de l'objet dans l'image. Puis nous calculons les coefficients de corrélation de l'image de l'objet en utilisant des masques avec des degrés de masquage différents suivant les sens horizontal et vertical. Nous pouvons remarquer ici que la valeur des coefficients de corrélation S_x

et S_y est fonction de la position de l'objet dans l'image. S_x (respectivement S_y) augmente progressivement à mesure que l'objet se déplace vers la droite (respectivement vers le bas). Sachant que le nombre de pixels de l'image en hauteur et en largeur est de 64 nous obtenons les valeurs données dans la Figure 6 pour les positions horizontale et verticale du centre de masse de l'objet dans l'image.

Le principe de localisation que nous venons de décrire ne fonctionne que si l'objet est clair sur un fond noir et uniforme. Ceci est dû au fait que si le fond n'est pas noir et uniforme, il interviendra dans le calcul du coefficient de corrélation, et par conséquent, influencera sur la précision de la localisation. Le cas idéal correspondant à un fond complètement noir est impossible à obtenir pratiquement en raison des limites technologiques des capteurs d'images et des conditions d'éclairage. Néanmoins, un étalonnage préalable du capteur permet de s'affranchir des problèmes liés au fond.

Concernant l'orientation de l'objet, elle est obtenue comme pour la position en utilisant un jeu de masques binaires issues d'images représentant des dégradés de niveau de gris par application d'un algorithme de génération d'images en demi-ton. Cinq types de dégradés de niveau de gris sont nécessaires pour la détermination de l'orientation : quatre dégradés de niveau de gris (2 horizontaux et 2 verticaux) de degrés de masquage différents et un dégradé de gris diagonal.

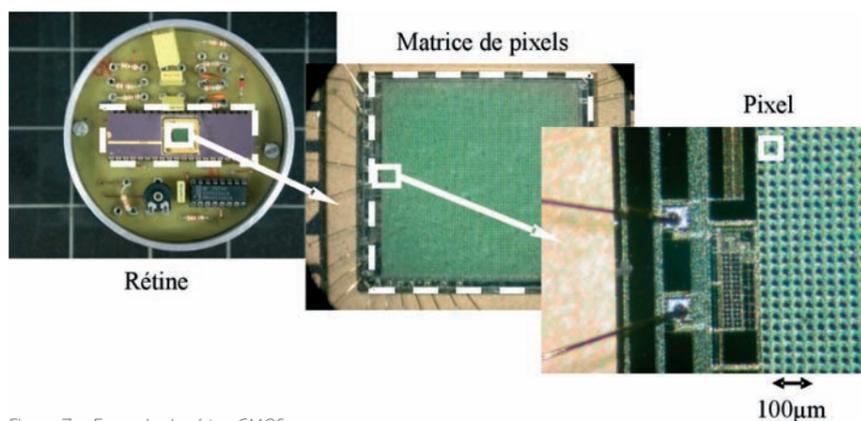
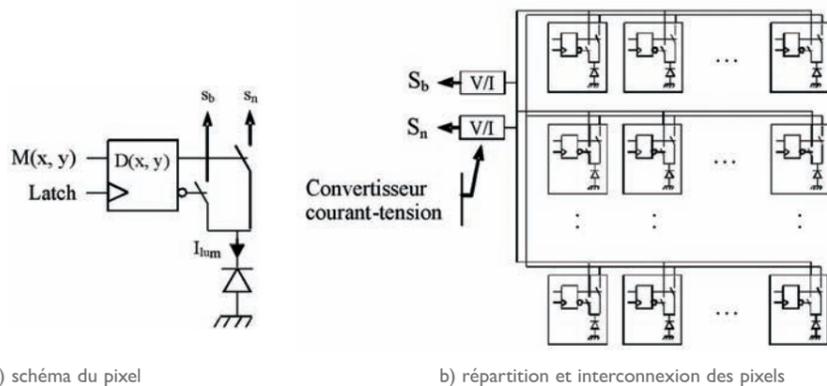


Figure 7 : Exemple de rétine CMOS



a) schéma du pixel

Figure 8 : Architecture électronique du pixel

Architecture électronique du circuit

Les différents prototypes de rétine que nous avons réalisés dans le cadre de cette thématique de recherche ont été conçus dans la technologie CMOS en collaboration avec le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM).

La technologie CMOS est une technologie planaire, destinée au développement de systèmes à très haute échelle d'intégration (VLSI). Elle est aujourd'hui très répandue et trouve des applications dans de nombreux domaines grand public : micro-ordinateurs, téléphonie, audio, vidéo... Elle est particulièrement adaptée aux types de circuits que nous souhaitons réaliser car elle permet d'intégrer des éléments photosensibles et des fonctions logiques sur une même puce. La Figure 7 représente un exemple de rétine réalisée en technologie CMOS.

Le principe de reconnaissance de forme décrit dans les paragraphes précédents a conduit à la réalisation de plusieurs rétines et nous nous proposons de décrire les architectures des deux dernières rétines qui diffèrent principalement dans la façon dont les masques sont programmés. Sur la Figure 8.a) nous avons représenté un schéma très simplifié de l'architecture électronique constituant chaque pixel. Rappelons que le but est de mesurer le coefficient de corrélation entre ce que « voit » la rétine,

c'est-à-dire l'image qui y est projetée, et une famille de masques binaires.

Chaque pixel est constitué d'une photodiode. Son niveau d'éclairement est mesuré sous la forme d'un courant I_{lum} , appelé photocourant. Une bascule interne à chaque pixel permet la mémorisation d'une valeur binaire, notée $M(x, y)$ (0 ou 1), au sein du pixel de coordonnées (x, y) . La mémorisation est réalisée par l'application de la valeur $M(x, y)$ à l'entrée de l'élément mémoire (une bascule D) et par un front montant appliqué sur l'entrée « Latch ». La valeur mémorisée aiguille le photocourant I_{lum} vers une des deux sorties du pixel, ce qui peut s'exprimer par les relations suivantes :

$$s_b(x, y) = M(x, y) \times I_{lum}(x, y)$$

$$s_n(x, y) = \bar{M}(x, y) \times I_{lum}(x, y)$$

Toutes les sorties de la matrice de pixels sont connectées suivant le schéma de la Figure 8.b) de sorte que tous les courants s_b (respectivement s_n) issus de tous les pixels sont sommés.

Les sommes résultantes sont converties en tension. La rétine fournit ainsi deux signaux S_b et S_n définis par :

$$S_b = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M M(x, y) \times I_{lum}(x, y)$$

$$S_n = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M \bar{M}(x, y) \times I_{lum}(x, y)$$

S_b (respectivement S_n) correspond donc au produit de corrélation entre le mas-

que M (respectivement \bar{M} , son complémentaire) et l'image projetée sur la rétine.

La Figure 9.a) représente le dessin des masques de fabrication d'un pixel de la première rétine que nous avons conçue. Ce capteur, d'une résolution de 100 par 100 pixels, a été réalisé en technologie CMOS 0,6 μm et occupe une surface totale de 9 mm^2 . La programmation du masque se fait de manière optique. Avant d'entamer le processus de reconnaissance d'un objet, la scène de référence, projetée sur la rétine, est seuillée : chaque pixel compare la quantité de lumière qu'il reçoit par rapport à la luminosité moyenne de l'image et stocke le résultat dans son point mémoire. Le pixel est un carré de 25 μm de côté dont 30% de la surface est consacré à la photodiode, tandis que le reste est occupé par les transistors réalisant la génération et la mémorisation du masque M ainsi que l'aiguillage du courant.

Le temps de réponse dépend de l'intensité de l'éclairage de la scène. Sa valeur est comprise entre 1 ms et quelques ms pour la puissance des éclairages que nous avons choisis. La mise en œuvre nécessite seulement des composants passifs externes, ce qui en fait un système particulièrement compact et autonome.

Un second capteur, de résolution 180 par 180 pixels, a été réalisé en technologie CMOS 0,35 μm . Le passage à une technologie plus fine a permis d'implanter plus de fonctionnalités : la rétine mémorise deux masques, ce qui lui permet de calculer quatre corrélations simultanément, et intègre une fonction d'imageur APS (Active Pixel Sensor) afin de pouvoir transmettre l'image vue par la rétine. L'architecture a été légèrement modifiée afin de permettre la mémorisation des masques via une unité externe telle qu'un FPGA (Field Programmable Gate Array) ou un microcontrôleur plutôt que de manière optique. Chaque pixel dont le dessin des masques de fabrication est représenté sur la Figure 9.b) fait 15,5 μm de côté. La surface photosensible occupe 20 % du pixel.

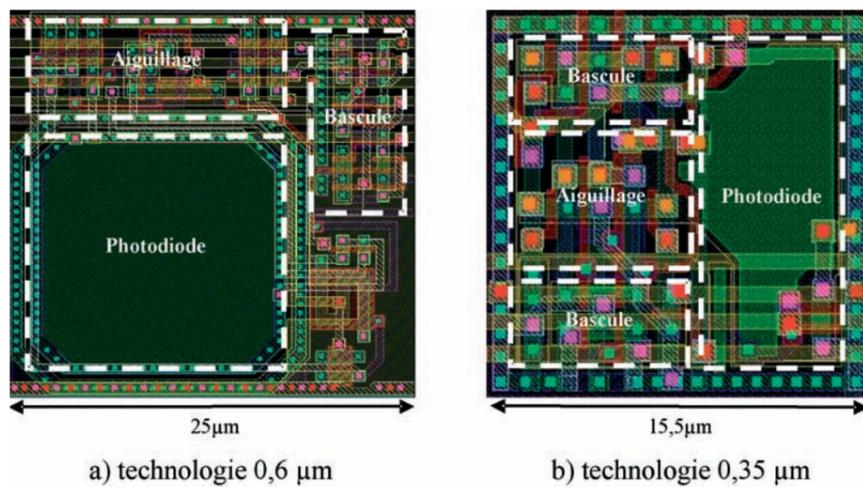


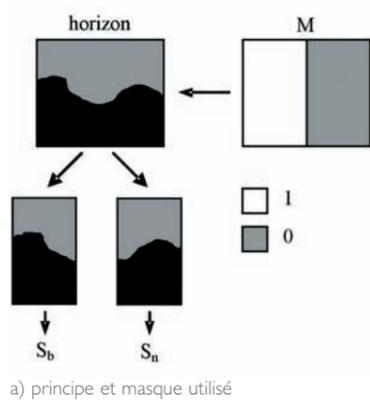
Figure 9 : Dessins des masques de fabrication des pixels des deux dernières rétines

Les Applications de la rétine

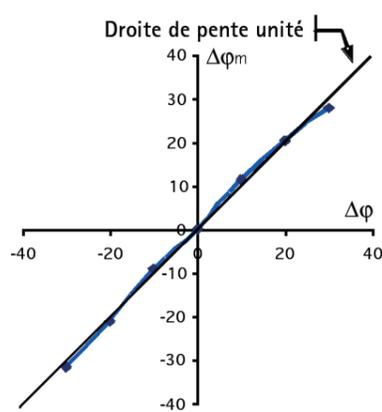
La rétine de reconnaissance d'objet que nous avons développée présente les avantages suivants : autonomie de fonctionnement, temps de réponse extrêmement court et faible encombrement. Elle est donc particulièrement adaptée à des applications industrielles et des applications embarquées où la place disponible pour loger la caméra est critique, ainsi que le temps de réponse du système.

L'utilisation de masques binaires particuliers permet de localiser la position et l'orientation d'une forme ou d'un objet. Ainsi une étude menée au cours de ces

dernières années a permis de montrer qu'il est possible de définir des masques binaires permettant de déterminer les valeurs de tangage et de roulis d'un drone à partir de l'analyse d'un horizon contrasté. Le masque M partage verticalement l'image analysée en deux (voir Figure 10.a). A partir des valeurs de S_b et S_n il est possible de déterminer les valeurs de tangage et de roulis de l'appareil avec une erreur faible (expérimentalement inférieure à 5 %). La Figure 10.b est un exemple illustratif de l'erreur de tangage représentée par l'écart entre la courbe de l'angle de tangage mesuré ($\Delta\varphi_m$) en fonction de l'angle théorique ($\Delta\varphi$) et la droite de pente unité.



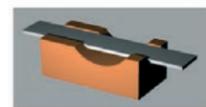
a) principe et masque utilisé



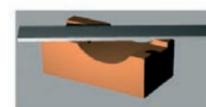
b) angle de tangage mesuré ($\Delta\varphi_m$) en fonction de l'angle théorique ($\Delta\varphi$)

Figure 10 : Détermination des valeurs de tangage d'un drone

Le procédé de masquage est également adaptable à la résolution de contraintes industrielles. Ainsi, nous avons étudié une application de la rétine dans le cas d'un système de production de pièces métalliques par emboutissage. Les contraintes de ce procédé industriel font qu'il nécessite un système de détection de position compact et rapide (quelques millisecondes) qui correspond tout à fait aux avantages de notre rétine. Les scènes à différencier sont représentées sur la Figure 11. Il s'agit en fait de détecter si la pièce qui arrive sur la matrice d'emboutissage est correctement positionnée ou non. Dans le cas où la pièce est incorrectement positionnée, le système de détection doit envoyer immédiatement un ordre d'arrêt à la machine pour éviter une usure prématurée de la matrice d'emboutissage. Pour cette application le temps de réponse du capteur est inférieur à 1 ms avec une précision de détection inférieure au millimètre. Notre étude montre donc que notre rétine est tout à fait adaptée à ce type d'applications industrielles.



pièce correctement positionnée



pièce décalée

Figure 11 : Exemple d'application industrielle de détection de la position d'une pièce

D'autres applications sont actuellement à l'étude. Suivant les masques mémorisés (Legendre, Zernike...) ce capteur est à même de fournir très rapidement des informations vectorielles à un système de classification ou à tout autre automate ou système d'asservissement.

Conclusion

La technique que nous avons développée pour reconnaître un objet est basée sur le calcul du coefficient de corrélation entre l'image de l'objet à reconnaître et une famille de masques binaires. Aussi paradoxal que cela puisse sembler à première vue, un masque ne sert pas forcément à masquer des informations. Nous démontrons dans notre recherche que par un choix judicieux des masques, on peut faire ressortir des informations pertinentes parmi toutes les informations présentes dans une image. En fait notre technique exploite à la fois les informations issues du masquage et les informations contenues dans les masques pour reconnaître l'objet. En conclusion, contrairement à ce que l'on aurait pu penser, le masquage nous a permis finalement de mieux reconnaître l'objet.

Les travaux décrits dans cet article ont fait l'objet d'un dépôt de brevet, et de plusieurs publications dans des revues et conférences internationales. D'autre part, parmi toutes les rétines que nous avons conçues et fabriquées, celle permettant de déterminer le degré de ressemblance entre l'image observée et une image de référence programmée de manière optique a été récompensée par le prix du meilleur circuit opérationnel universitaire lors de la conférence « Design Automation and Test in Europe – DATE'2002 » à Paris. Le prix été décerné par le Circuit Multi-Projets (CMP), organisation centralisant toutes les demandes de fabrications de circuits en faible nombre. ■

Remerciements

La conception et la fabrication de circuits intégrés demandent des investissements en matériels et en coût de fabrication importants. Nous tenons à remercier le Conseil Régional de Bourgogne et le Fond Européen de Développement Régional (FEDER) pour leurs participations financières qui nous ont permis de mener à bien ces travaux.

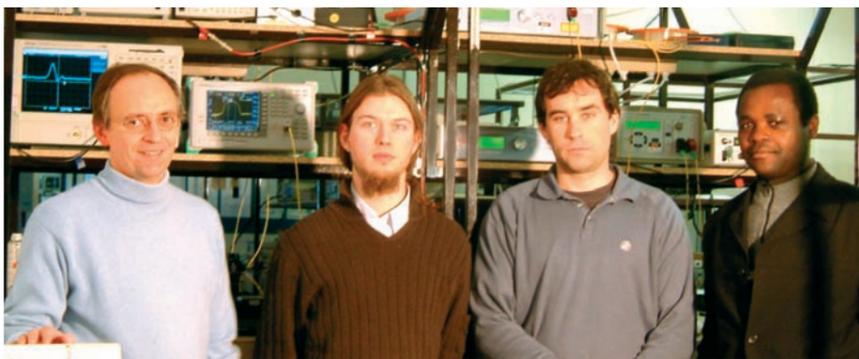
Bibliographie

- P. GORRIA, B. LAMALLE et G. CATHEBRAS, « Dispositif d'intercorrélation d'une image », Brevet No. 9900008, 04 Janvier 1999.
- L.F.C. LEWYAN VOON, G. CATHEBRAS, B. LAMALLE, P. GORRIA, B. BELLACH et O.AUBRETON, « 100-x100- Pixel CMOS Retina for Real-Time Binary Pattern Matching », *Optical Engineering Letters, SPIE*, Vol. 41, No. 5 (Mai 2002) : 924-925.
- O.AUBRETON, B. BELLACH, L.F.C. LEWYAN VOON, B. LAMALLE, P. GORRIA et G. CATHEBRAS, « Retina for Pattern Matching in Standard 0.6- μ m Complementary Metal Oxide Semiconductor Technology », *SPIE Journal of Electronic Imaging*, Vol. 13, No. 3 (juillet 2004) : 559-569.
- O. AUBRETON, L.F.C. LEWYAN VOON, B. LAMALLE, T. SLIWA, M. ROY et G. CATHEBRAS, « Hardware Implementation of Geometric Moment Functions in a CMOS Retina », *2004 Optics East Conference, Proceedings of SPIE*, Vol. 5603 (octobre 2004) : 225-233.
- J.C. DEVAUX, *Segmentation par approche région des images couleur : application aux images aériennes des milieux naturels*, thèse de doctorat, Le2i, Université de Bourgogne, janvier 2000.
- J.B. VIOIX, *Conception et réalisation d'un dispositif d'imagerie multispectrale embarqué : du capteur aux traitements pour la détection d'adventices*, thèse de doctorat, Le2i-ENESAD, Université de Bourgogne, juillet 2004.
- O. AUBRETON, L.F.C. LEWYAN VOON, B. LAMALLE, G. CATHEBRAS et F. MONIOT, « A CMOS Retina for Zernike Moments Estimation », *2005 Electronic Imaging conference, Proceedings of SPIE*, Vol. 5677 (mars 2005) : 119-128.

Récompense

- L.F.C. LEWYAN VOON, G. CATHEBRAS, B. LAMALLE, P. GORRIA, B. BELLACH and O.AUBRETON, *CMP Design Contest Award – Operational Design Category, Design Automation and Test in Europe 2002 - DATE02, Paris, 04-08 March 2002.*

Communications ultra-rapides à longue distance



■ Guy MILLOT (Médaille d'argent CNRS 2004)
 ■ Julien FATOME
 ■ Stéphane PITOIS
 ■ Patrice TCHOFO-DINDA
 (Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne [LPUB], UMR CNRS 5027)

Introduction

Les fibres optiques sont à l'origine d'une révolution technologique en matière de télécommunications sous-marines et terrestres car elles sont capables de guider la lumière sur plusieurs milliers de kilomètres.

L'augmentation explosive du trafic électronique attendue dans les prochaines années est essentiellement liée à l'exploitation d'Internet et des nouvelles technologies multimédia qui sont fortement stimulées par des connexions domestiques de plus en plus rapides, exigeant ainsi des débits de transmission des informations de plus en plus élevés. C'est pour répondre à cette formidable croissance du trafic que nous menons des recherches fondamentales, théoriques et expérimentales dans le domaine des télécommunications par fibres optiques. L'un des principaux enjeux est de relever le défi de la transmission dans les fibres optiques sur de grandes distances (plusieurs milliers de km) et à des débits supérieurs de deux ordres de grandeur à l'état de l'art

actuel (>100 Gbit/s par canal). De tels débits nécessitent inévitablement l'utilisation d'impulsions lumineuses de plus en plus courtes, environ une picoseconde pour un débit de 160 Gbit/s. La propagation de telles impulsions sur plusieurs milliers de kilomètres et sans déformation demeure aujourd'hui un défi majeur que de nombreux chercheurs du monde entier cherchent à relever.

La piste que nous avons choisie d'explorer pour relever ce défi repose sur le concept innovant de ligne à gestion de la dispersion qui se caractérise par la juxtaposition de tronçons de fibres à dispersion alternativement positive puis négative. Nous avons ainsi développé une ligne expérimentale de transmission à gestion de la dispersion fonctionnant à un débit de 160 Gbit/s. La mise en œuvre de cette ligne de transmission a nécessité trois étapes clés :

- Le développement d'un générateur d'impulsions à 1550 nm délivrant des impulsions picosecondes à une cadence de 160 GHz. Ce générateur a été conçu grâce à une méthode originale de com-

pression temporelle non linéaire d'un battement sinusoïdal de deux longueurs d'ondes voisines.^{1,2}

- La mise au point d'une technique originale de caractérisation de ces impulsions spécialement adaptée à des trains d'impulsions de très haute cadence.³⁻⁷
- La réalisation d'une boucle à recirculation des impulsions qui représente un tronçon de ligne réelle de transmission dans laquelle les impulsions sont réinjectées un grand nombre de fois afin de simuler la propagation de l'information sur des distances transocéaniques.^{8,9}

Une invention révolutionnaire : la fibre optique

Les fibres optiques sont des fils de verre très fins, à peine de la taille d'un cheveu. De manière générale, une fibre se compose d'une région centrale, le cœur, de 10 microns de diamètre entouré d'une gaine de 125 microns constituée d'un verre légèrement différent dont l'indice de réfraction est inférieur à celui du cœur. Le tout est finalement

protégé par une gaine en matière plastique (voir Fig.1). Dans ces conditions, comme le montre la figure 1, un faisceau lumineux entrant à l'extrémité de la fibre restera piégé dans son cœur par réflexion totale à l'interface cœur-gaine et pourra ainsi voyager très loin en suivant la fibre. Finalement, de par leurs caractéristiques exceptionnelles, très faibles pertes et insensibilités aux parasites électromagnétiques, les fibres optiques permettent d'utiliser la lumière pour transmettre des informations sur de très longues distances.

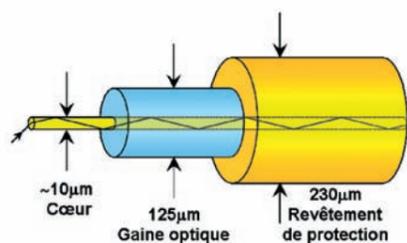


Figure 1 : Schéma d'une fibre optique.

Un cadeau de la nature : le soliton

La transmission des informations dans une fibre optique s'effectue sous la forme d'impulsions optiques ultracourtes, c'est à dire sous la forme de bouffées de lumière ultra-brèves. La propagation de ces impulsions dans la fibre optique est alors assujettie à trois phénomènes physiques majeurs :

- Les pertes, dues à la présence inévitable de défauts au sein de la fibre optique et qui entraînent une atténuation de l'impulsion lors de sa propagation. La figure 2a représente l'évolution du profil temporel de l'impulsion en fonction de la distance de propagation et montre que les pertes dans une fibre optique sont remarquablement faibles puisque après une distance de propagation de 50 km, l'impulsion initiale reste encore clairement visible. Cependant, pour des distances plus grandes, il faudra nécessairement amplifier l'impulsion périodiquement.

- Le second phénomène physique qui intervient lors de la propagation est la dispersion chromatique. En effet, une impulsion lumineuse est constituée obligatoirement de plusieurs couleurs (ou longueurs d'ondes) qui se propagent dans le verre à des vitesses différentes. De même, à l'instar d'un groupe de coureurs qui va s'étirer car n'avançant pas tous à la même vitesse, la dispersion chromatique induit un étalement inexorable de l'impulsion lors de sa propagation. Le phénomène d'étalement est clairement visible sur la figure 2b.

- Le troisième phénomène physique qui joue un rôle majeur est la non linéarité qui se manifeste lorsque l'intensité de l'impulsion devient importante. La vitesse de propagation dépendant de la puissance initiale, les différentes parties de l'impulsion ne se propagent pas à la même vitesse entraînant ainsi une forte distorsion de l'impulsion, schématisée ici sur la figure 2c.

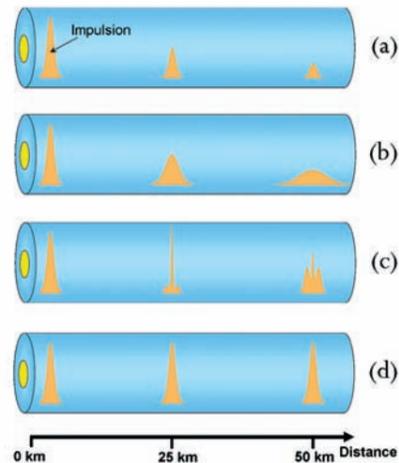


Figure 2 : (a) Phénomène de pertes optiques (b) Phénomène de dispersion chromatique (c) Phénomène de non linéarité (d) Soliton optique.

Les effets de dispersion et de non linéarité, lorsqu'ils agissent séparément, modifient fortement le profil des impulsions. Ce sont donc des effets particulièrement néfastes pour transmettre des informations sous forme d'impulsions lumineuses. Mais d'une façon

tout à fait remarquable, pour une valeur particulière de la puissance de l'impulsion initiale, les deux effets néfastes de dispersion et de non linéarité peuvent se compenser exactement.^{10,11} Comme le montre la figure 2d, l'impulsion peut alors se propager sans déformation: c'est un véritable cadeau de la nature, appelé « soliton ».

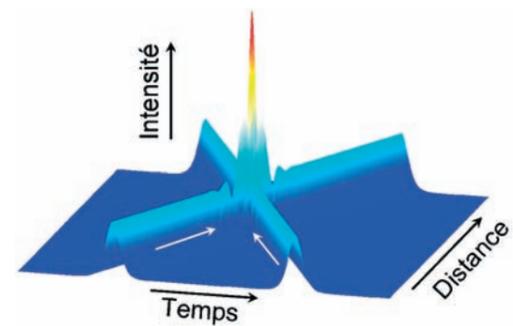


Figure 3 : Collision de deux solitons.

Comme le montre la figure 3, d'un point de vue général, un soliton est une onde localisée qui se propage sans déformation et conserve toutes ses caractéristiques (forme et vitesse) même après collision avec un autre soliton. Il est alors tout à fait remarquable de noter que, malgré de fortes interactions lors de la collision, les solitons se retrouvent intacts après le point de rencontre. Les solitons sont donc des impulsions particulièrement robustes qui pourront se propager sur de très grandes distances.

D'un point de vue historique, les solitons ont été découverts en hydrodynamique par un ingénieur écossais, John Scott Russell en 1834. Pour l'anecdote, il est à noter que la seconde observation du soliton hydrodynamique fut ensuite réalisée à Dijon par Henri Bazin en 1863.



Principe et intérêt des communications optiques

Les communications optiques s'effectuent sous forme numérique en utilisant les impulsions optiques comme véhicule de transport. Tout signal analogique, tel un signal vidéo ou audio, peut être converti sous forme digitale par un échantillonnage à intervalle régulier (voir Fig.4).

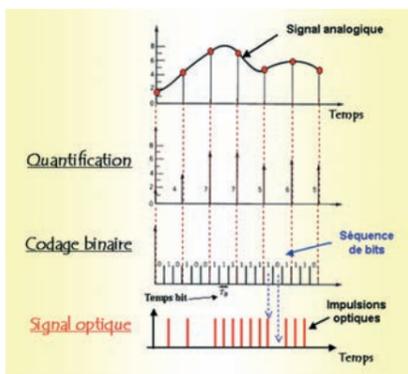


Figure 4 : Codage d'une information analogique sous forme numérique puis optique.

A chaque instant, on associe alors un nombre proportionnel à l'amplitude du signal, nombre qui est ensuite traduit sous forme binaire à l'aide d'une suite constituée uniquement de 1 et de 0. Ces séries de 1 et de 0 sont ensuite transcrites sous forme optique grâce à une source laser modulée. Chaque 1 ou 0 est appelé bit d'information, l'intervalle de temps séparant deux bits consécutifs correspond au temps bit. Le débit d'information est alors défini par le nombre de bits par seconde. Il s'exprime en général en Gbit/s ou en Tbit/s (1 Gbit/s = 1 milliard de bits par seconde, 1 Tbit/s = 1000 milliards de bits par seconde). En pratique, un bit 1 correspond à la présence d'une impulsion lumineuse durant un temps bit, alors qu'un zéro correspond à l'absence de lumière durant un temps bit.

La figure 5 représente le spectre électromagnétique s'étalant des ondes radio aux rayons X. Les communications par

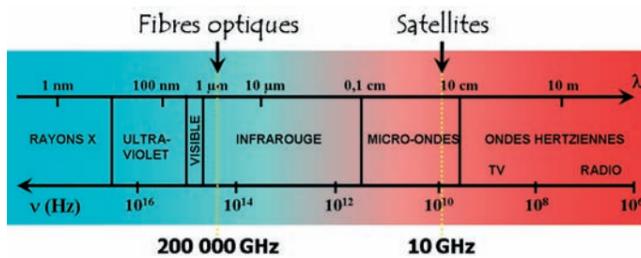


Figure 5 : Spectre électromagnétique.

satellites utilisent des micro-ondes à une fréquence environ égale à 10 GHz, tandis que les communications par fibres optiques utilisent des ondes situées dans le proche-infrarouge à une fréquence de l'ordre de 200 000 GHz, qui correspond à une longueur d'onde de 1,55 micron. Les communications optiques autorisent donc des débits 20 000 fois supérieurs à ceux des liaisons satellites. Les communications optiques à ultra hauts débits (plusieurs dizaines de Gbit/s) nécessitent des impulsions ultracourtes de durées comprises entre quelques dixièmes de picoseconde à quelques picosecondes. Une picoseconde (10⁻¹² s) représente le temps mis par la lumière pour parcourir trois dixièmes de millimètre dans l'air ! (en une seconde la lumière parcourt environ la distance Terre-Lune). Aujourd'hui l'essentiel des communi-

cations intercontinentales passe par des câbles de fibres optiques sous-marins qui, déposés sur le fond des océans, tissent une véritable toile sous les mers (Fig.6). Les fibres actuellement installées permettent finalement le transport d'informations à des débits de 2,5 Gbit/s et 10 Gbit/s pour une longueur d'onde de transmission donnée.

La figure 7 montre le principe d'une communication numérique par fibre optique. Un signal électrique, par exemple une conversation téléphonique, est tout d'abord convertie à l'aide d'un codeur sous la forme d'une séquence d'impulsions électriques, transcrite à son tour en une séquence équivalente d'impulsions optiques à l'aide d'une source laser et d'un modulateur de lumière.



Figure 6 : Réseau optique sous-marin : Une véritable toile sous les mers.

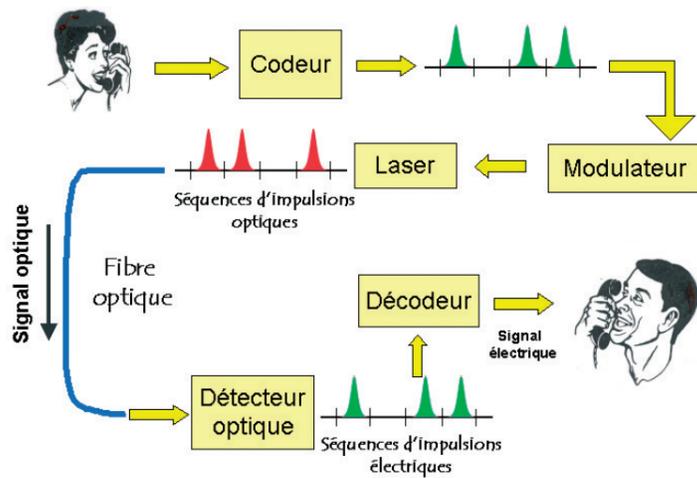


Figure 7 : Principe des télécommunications par fibres optiques.

Après une longue propagation dans la fibre optique, la séquence d'impulsions optiques est finalement reconvertie en séquence d'impulsions électriques à l'aide d'un détecteur et d'un décodeur. Dans une expérience de laboratoire, le signal à transmettre est synthétisé à l'aide d'un générateur qui délivre simplement une séquence aléatoire d'impulsions électriques. A la sortie de la ligne de transmission optique, le détecteur est relié à un système qui compare le signal transmis au signal initial et mesure ainsi le nombre d'erreurs (une erreur revient à détecter un 1 au lieu d'un 0 ou réciproquement). Les phénomènes de dispersion

et de non linéarité qui déforment fortement les impulsions peuvent entraîner un chevauchement des impulsions voisines et par conséquent quelques erreurs de détection voire un brouillage total de l'information. En pratique, les opérateurs tolèrent une seule erreur de bit pour un milliard de bits transmis.

Boucle à recirculation des impulsions lumineuses

En laboratoire, pour des raisons de complexité et de coût, il est impossible de réaliser une ligne de transmission

réelle de plusieurs milliers de kilomètres (distance nécessaire pour les transmissions transocéaniques). Afin de pallier cet inconvénient, la ligne optique est remplacée par une boucle à recirculation des impulsions (voir Fig. 8)8,9. Un jeu d'interrupteurs optiques permet d'injecter au sein de la boucle un train d'impulsions, de le laisser circuler un certain nombre de fois, puis de l'analyser après un nombre de tours donné. Une telle boucle à recirculation permet ainsi de reproduire une distance de propagation quasi-infinie. La longueur d'une boucle est de quelques dizaines de kilomètres seulement et correspond en général à la distance au bout de laquelle il est nécessaire de ré-amplifier les impulsions.

Gestion de la dispersion, clef du haut débit ?

Compte tenu de l'augmentation considérable du trafic Internet, il est nécessaire de pouvoir transmettre des débits d'information de plus en plus importants. Il existe deux moyens d'augmenter les débits de communication. La première méthode consiste à injecter simultanément dans la fibre optique plusieurs longueurs d'ondes distinctes, appelés canaux de transmission (Fig. 9a). Cette technique nécessite un grand nombre de sources laser, puisque chaque canal requiert sa propre source. Par exemple, pour atteindre un débit de 160 Gbit/s, il suffit d'utiliser 16 canaux à 10 Gbit/s. Cette méthode est particulièrement onéreuse, mais est actuellement utilisée par les opérateurs car la technologie à bas débit, tel que le 10 Gbit/s, est bien maîtrisée. La seconde méthode pour élever les débits de transmission consiste à augmenter le débit par canal, en passant par exemple de 10 Gbit/s à 40 Gbit/s voire 160 Gbit/s (Fig. 9b). Mais les impulsions utilisées deviennent alors de plus en plus courtes, par exemple, un débit de 160 Gbit/s nécessite des impulsions de l'ordre de une à deux picosecondes.

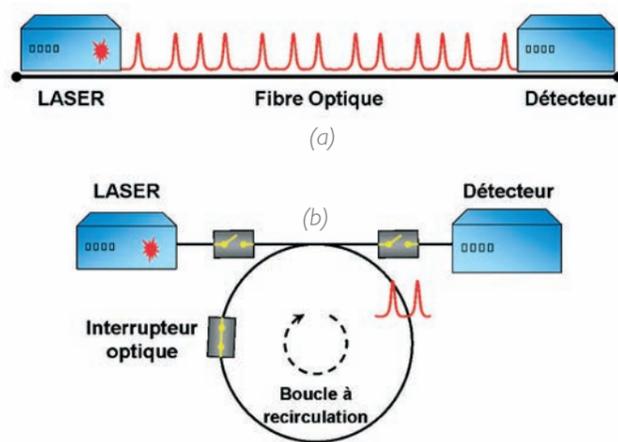


Figure 8 : (a) Système réel (b) Principe de la boucle à recirculation.

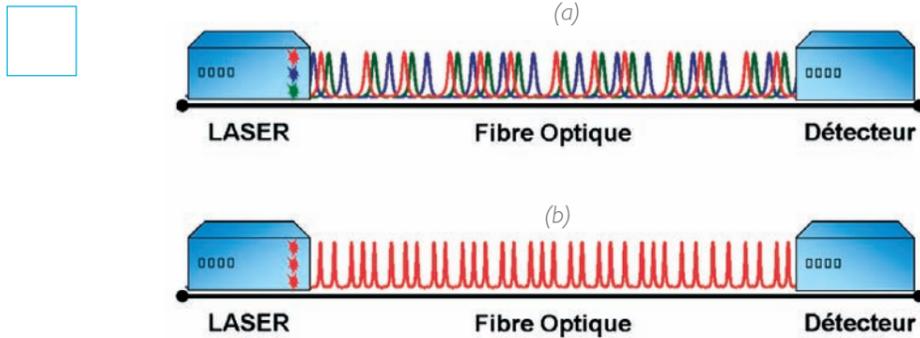


Figure 9 : (a) Principe du multiplexage en longueur d'onde (b) Principe du multiplexage temporel.

Signalons ici que les phénomènes de dispersion et de non linéarité sont d'autant plus importants que les impulsions sont courtes. Par conséquent, plus le débit est élevé, plus les impulsions sont courtes et plus les distances de propagation seront limitées. Ainsi, atteindre des distances de transmission de plusieurs milliers de kilomètres avec des impulsions d'environ une picoseconde est un véritable défi technologique qui nécessite le développement de recherches très importantes en amont. Nous avons cherché à relever ce défi en étudiant la propagation à 160 Gbit/s sur un seul canal.

La piste que nous avons explorée repose sur le concept innovant de ligne à gestion de la dispersion.¹²⁻¹⁶ Une ligne à gestion de la dispersion est constituée par la juxtaposition de tronçons de fibres différentes, à dispersion alternativement positive puis négative (Fig. 10a). La figure 10b permet d'observer la propagation d'une impulsion sur le début de la ligne de transmission. Dans la première fibre à dispersion positive, l'impulsion s'étale avec séparation des différentes longueurs d'ondes constituant l'impulsion. Les plus grandes longueurs d'onde se propagent alors plus vite que les plus basses longueurs d'onde. Dans la seconde fibre à dispersion opposée, la situation est ensuite inversée de sorte que les différentes longueurs d'onde se superposent à nouveau et l'impulsion retrouve sa forme initiale. Ce phénomène d'élargissement et de compression se reproduit

ainsi périodiquement et tout se passe comme si l'impulsion respirait ; on dit alors que l'impulsion est un soliton à respiration.¹²⁻¹⁶

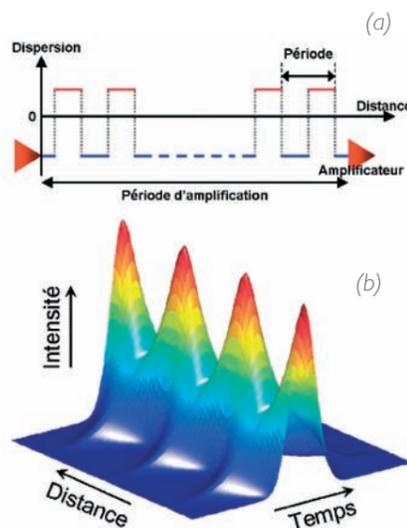


Figure 10 : (a) Principe de la gestion de la dispersion (b) Phénomène de respiration d'une impulsion.

Choix de la ligne de transmission ?

Une ligne à gestion de la dispersion est un système complexe qui met en jeu un grand nombre de paramètres dont les principaux sont, les longueurs des deux types de fibres et la puissance des impulsions injectées à l'entrée de la ligne. Optimiser la ligne consiste donc à rechercher les meilleurs paramètres permettant d'atteindre la plus grande

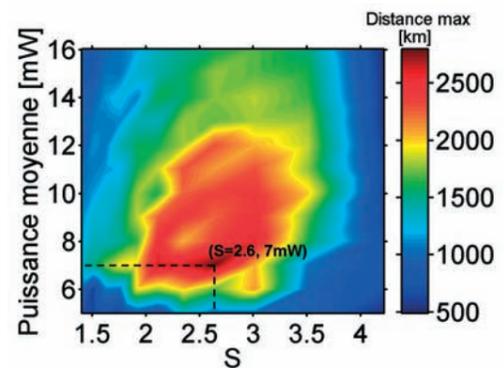


Figure 11 : Carte des performances.

distance de propagation. Cette optimisation ne peut se faire qu'à l'aide d'un modèle complexe qui régit la propagation non linéaire des impulsions dans la ligne à gestion de la dispersion. Le modèle que nous utilisons est une équation à dérivées partielles, appelée équation de Schrödinger non linéaire.¹²⁻¹⁶ Cette équation complexe n'étant pas résoluble mathématiquement, il nous faut donc avoir recours à des simulations sur ordinateur qui permettent de la résoudre numériquement. Ces simulations numériques nous permettent finalement de trouver la distance de propagation maximale en fonction de deux paramètres, d'une part la puissance des impulsions initiales, et d'autre part un paramètre noté S qui détermine les longueurs des deux types de fibre. La figure 11 montre le résultat des simulations. La zone la plus rouge correspond aux distances de propagation les plus élevées dont le maximum de 2800 km est atteint pour des longueurs des deux types de fibre de l'ordre du kilomètre.

Techniques expérimentales

La figure 12 montre le schéma de notre dispositif expérimental.^{8,9}

L'expérience est constituée de trois parties principales: le générateur d'impulsions à 160 Gbit/s, visible sur la partie supérieure de la figure 12, la boucle à recirculation des solitons à respiration (en bas à gauche) et un dispositif de

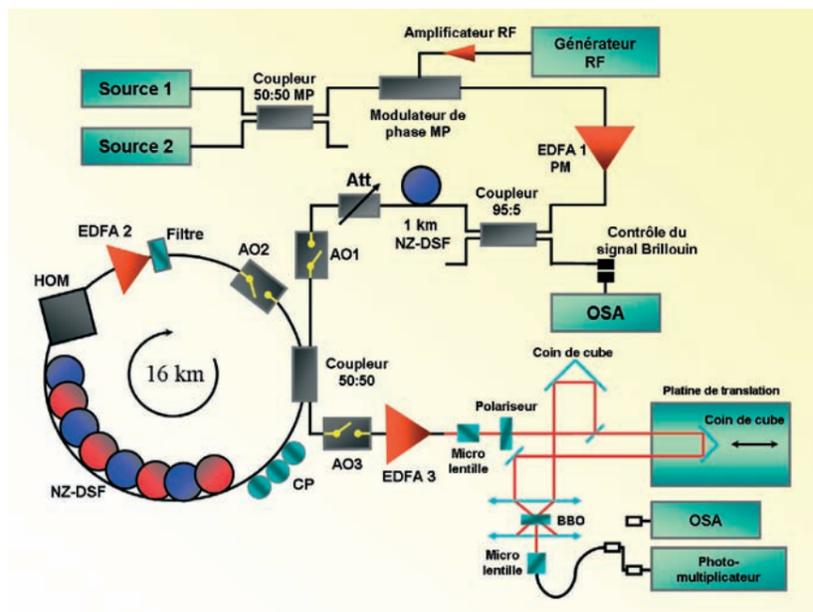


Figure 12 : Dispositif expérimental (AO : Acousto-optique, PM : Maintien de polarisation, CP : Contrôleur de polarisation, OSA : Analyseur de spectre optique, EDFA : Amplificateur, HOM : Module de compensation de la dispersion chromatique d'ordre 3, NZ-DSF : Fibre à dispersion décalée, BBO : Cristal non linéaire).

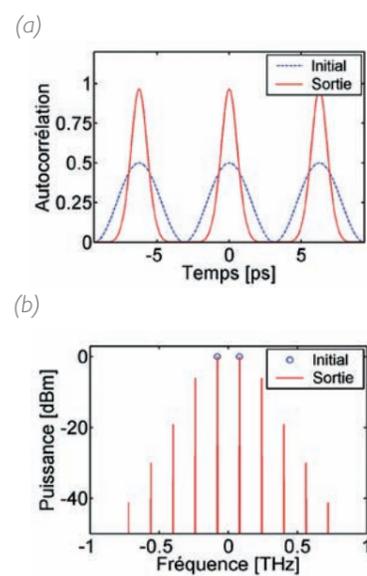


Figure 14 : (a) Compression du battement sinusoïdal (b) Spectre du train d'impulsions formé.



Figure 13 : Photos du dispositif expérimental (a) Générateur d'impulsions à 160-GHz (b) (c) et (d) Boucle à recirculation des solitons à respiration (e) Détecteur à autocorrélation.

caractérisation des impulsions qui joue le rôle de détecteur (en bas à droite). La figure 13 montre également les photos des différentes parties du dispositif expérimental réel.

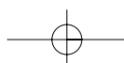
La réalisation du générateur d'impulsions picosecondes à 160 Gbit/s a constitué l'un des principaux défis. En effet il n'existe aucun dispositif commercial de ce type et il a donc fallu faire preuve d'originalité. C'est ainsi que nous avons mis à profit un effet non linéaire particulier dans la fibre optique (appelé mélange à quatre

ondes) pour comprimer temporellement le battement sinusoïdal induit par la superposition de deux ondes continues de fréquences voisines et délivrées par les sources lasers 1 et 2.

L'idée de notre générateur d'impulsions à 160 Gbit/s consiste à superposer deux faisceaux laser dont les fréquences sont séparées de 160 GHz. Cette superposition crée alors un battement sinusoïdal représenté sur la figure 14a. Ce battement est ensuite comprimé temporellement par élargissement de son spectre.

L'élargissement spectral est obtenu par l'effet non linéaire de mélange à quatre ondes qui permet de générer de nouvelles fréquences comme le montre la figure 14b. Il en résulte finalement une compression du battement sinusoïdal qui permet de générer un train d'impulsions d'environ une picoseconde, parfaitement séparées les unes des autres et sans piédestal (Fig.14a).1,2

La deuxième difficulté qu'il a fallu surmonter est liée à la détection des impulsions. En effet les capteurs de lumière les plus performants qui soient ne sont pas suffisamment rapides pour détecter des impulsions picosecondes. Il faut donc imaginer une technique qui permette de transposer un événement trop bref et donc impossible à observer directement, dans un autre espace temporel, « plus lent ». L'autocorrélation optique permet cette transposition (voir Fig. 12, en bas à droite). Elle consiste à créer deux répliques identiques de l'impulsion à mesurer, décalées l'une par rapport à l'autre d'un délai variable. Ces deux répliques interagissent ensuite non linéairement au sein d'un cristal. De cette interaction naît un nouveau



signal qui dépend du retard entre les deux répliques de l'impulsion. L'énergie du nouveau signal peut être mesurée pour différents délais par un détecteur lent, tel qu'un photo-multiplicateur. On enregistre ainsi l'autocorrélation de l'impulsion dont la forme temporelle est caractéristique de celle de l'impulsion. Une technique plus élaborée consiste à analyser le spectre du nouveau signal en fonction du délai entre les deux répliques. L'autocorrélation est alors résolue en fréquence, technique plus précise appelée FROG 3-7 qui permet de mesurer directement l'intensité et la phase des impulsions.

La figure 15a montre l'autocorrélation FROG mesurée à la sortie du générateur d'impulsions à 160 Gbit/s. Elle correspond à un empilement de spectres obtenus pour différents délais. À l'aide de techniques mathématiques et numériques adéquates appliquées au signal FROG 3-7 il est alors possible d'obtenir directement l'intensité et la phase du train d'impulsions à 160 Gbit/s. Conformément aux prédictions théoriques, les impulsions obtenues sont d'excellente qualité avec une phase constante et sans piédestal comme le montre clairement la figure 15b.

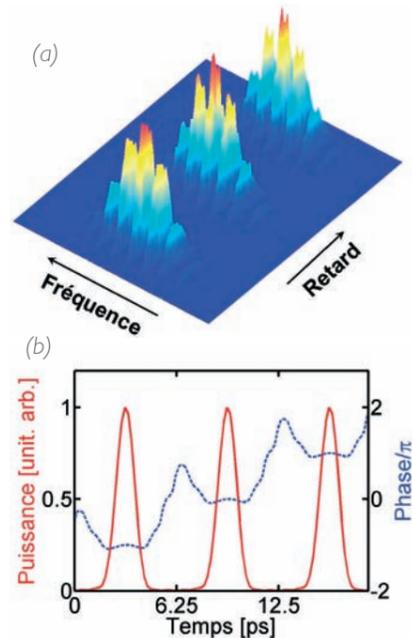


Figure 15 : (a) Enregistrement FROG (b) Train d'impulsions expérimental à 160-GHz.

Record de distance parcourue à un débit de 160 Gbit/s

Notre objectif est de rechercher la distance maximale que les solitons à respiration sont capables de parcourir dans la boucle à recirculation sans trop se déformer. Nous avons ainsi enregistré le signal d'autocorrélation pour différentes distances de propagation, distance contrôlée en ajustant le nombre de tours effectués par le train de solitons avant son extraction de la boucle. La figure 16 montre les résultats expérimentaux obtenus. Nous observons clairement sur cette figure que les solitons s'élargissent avec la distance de propagation jusqu'à disparaître totalement pour une distance d'environ 1400 km.

La transmission est considérée acceptable si la largeur des impulsions reste inférieure à la moitié du temps bit (limite en traits pointillés sur la figure 16). Ce critère assez sévère conduit alors à une distance de propagation maximale d'environ 900 km qui correspond à la meilleure performance jamais atteinte jusqu'à présent à un débit nominal de 160 Gbit/s 8 (notons que le précédent record était de 480 km obtenu avec des lignes conventionnelles). Signalons finalement que les performances expérimentales sont inférieures aux prédictions théoriques à cause des imperfections inévitables des fibres optiques.

En terme de performance, un débit de 160 Gbit/s permet la transmission simultanée de 2,5 millions de liaisons téléphoniques ou de 1600 canaux de télévision à haute résolution ! Notre performance a pu être réalisée grâce au concept de solitons à respiration, à une optimisation précise de la ligne par des modèles élaborés 12-16 et à la haute qualité des impulsions délivrées par notre générateur.¹

Nous avons fait la preuve que les lignes à gestion de la dispersion constituent une nouvelle technologie de transmission avec augmentation spectaculaire

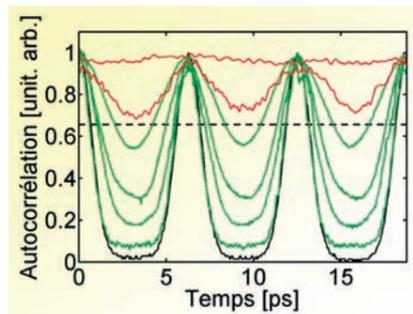


Figure 16 : Trace d'autocorrélation en fonction de la distance de propagation, respectivement à 0, 160, 624, 720, 896, 1104 et 1408km.

des débits pour les transmissions à longue distance. Cette nouvelle technologie représente une solution privilégiée pour répondre aux demandes croissantes des systèmes de télécommunications du futur.

Le développement considérable d'Internet, lié notamment à l'ADSL, laisse envisager pour le futur une croissance exponentielle des besoins. Il apparaît donc comme crucial de continuer à mener des recherches fondamentales en vue d'accroître les débits de transmission par fibres optiques. ■

Remerciements

Nous remercions vivement l'Université de Bourgogne, le Conseil Régional de Bourgogne, le Centre National de la Recherche Scientifique, le Ministère délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies, l'Institut Universitaire de France, France Télécom R&D à Lannion et Alcatel à Marcoussis, pour avoir soutenu ce travail. Nous remercions également tous les membres de notre équipe « Solitons et Communications Optiques » pour les fructueuses discussions que nous avons eues.



Bibliographie

- S. PITOIS, J. FATOME et G. MILLOT, *Optics Letters* 27 (2002) : 1729-1731.
- J. FATOME, S. PITOIS, and G. MILLOT, *Optics Communications* 234 (2004) : 29-34.
- F. GUTTY, S. PITOIS, Ph. GRELU, G. MILLOT, M.D. THOMSON et J.M. DUDLEY, *Optics Letters* 24 (1999) : 1389-1391.
- J.M. DUDLEY, M.D. THOMSON, F. GUTTY, S. PITOIS, Ph. GRELU et G. MILLOT, *Electronics Letters* 35 (1999) : 2042-2044.
- J.M. DUDLEY, F. GUTTY, S. PITOIS et G. MILLOT, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 37 (2001) : 587-594.
- Ph. GRELU, F. GUTTY et G. MILLOT, *IEEE Photonics Technology Letters* 14 (2002) : 672-674.
- J. FATOME, S. PITOIS et G. MILLOT, *Optical Fiber Technology* 10 : 73-78.
- J. FATOME, S. PITOIS, P.TCHOFO DINDA et G. MILLOT, *Optics Express* 11 (2003) : 1553-1558 .
- J. FATOME, S. PITOIS, P.TCHOFO DINDA, G. MILLOT, E. LE ROUZIC, B. CUENOT, E. PINCEMIN et S. GOSSELIN, *IEEE Photonics Technology Letters* 16 (2004) : 2365-2367.
- J.M. DUDLEY, A.C. PEACOCK et G. MILLOT, *Optics Communications* 193 (2001) : 253-259.
- G. MILLOT et P.TCHOFO DINDA, *Encyclopedia of Modern Optics*, vol. 12, Oxford : Elsevier (2004) : 56-65.
- P.TCHOFO DINDA, A.B. MOUBISSI et K. NAKKEERAN, *Physical Review E* 64 (2001) : 016608.
- K. NAKKEERAN, A.B. Moubissi, P.TCHOFO DINDA et S.WABNITZ, *Optics Letters* 26 (2001) : 1544-1546.
- A.B. MOUBISSI, K. NAKKEERAN, P.TCHOFO DINDA et S.WABNITZ, *IEEE Photonics Technology Letters* 14 (2002) : 1041-1043.
- K. NAKKEERAN, A.B. MOUBISSI et P.TCHOFO DINDA, *Physics Letters A* 308 (2003) : 417-425.
- P.TCHOFO DINDA, A. LABRUYERE, A. B. MOUBISSI, K. NAKKEERAN, J. FATOME, S. PITOIS et G. MILLOT, *Annales des Télécommunications* 58 (2003) : 1785.



Le Frittage « Flash » : une voie incontournable pour produire des nanomatériaux denses

- Frédéric BERNARD (LRRS UMR 5613 CNRS / Université de Bourgogne)
- Eric GAFFET (Nanomaterials Research Group, UMR 5060 CNRS / UTBM, Belfort)
- Sébastien PARIS (LRRS UMR 5613 CNRS / Université de Bourgogne, Nanomaterials Research Group, UMR 5060 CNRS / UTBM, Belfort)
- Sébastien CHEVALIER (LRRS UMR 5613 CNRS / Université de Bourgogne)
- Zuhair MUNIR (Department of Chemical Engineering and Materials Science - University of California - Davis)

Le terme « Nano » est un des préfixes les plus en vogue à ce jour dans le monde scientifique. Mais, parmi les nanotechnologies, les nanopoudres, l'accès à des techniques permettant de produire des objets denses et nanostructurés est encore limité. Cependant, grâce à l'effort conjoint de plusieurs chercheurs de l'Université de Bourgogne (Frédéric Bernard, Professeur - LRRS UMR 5613 CNRS), de l'Université Technologique de Belfort-Montbéliard (Eric Gaffet, Directeur de Recherche - UMR 5060 CNRS), et de l'Université de Californie (Zuhair Munir, Professeur - Directeur du laboratoire FACS, Davis), le domaine des nanomatériaux denses est maintenant accessible.

En effet, le procédé MAFAPAS (Mechanically Activated Field Activated Pressure Assisted Synthesis) désormais breveté (US Patent N° 6 200 515 B1 - 13 Mars 2001), qui

permet de produire des composés intermétalliques nanostructurés à taux de densification contrôlés, résulte de la combinaison de deux étapes principales :

(i) MA : une étape d'activation mécanique réalisée dans un broyeur planétaire conduit à la formation d'agglomérats micrométriques (0,2 à 200 μm) dans lesquels les cristallites des constituants élémentaires sont répartis à l'échelle nanométrique (Figure 1c) noté $n(\text{Mo}+2\text{Si})$.

(ii) FAPAS : une étape de synthèse-consolidation impliquant simultanément une activation par un courant électrique de forte intensité (1750 A) et une pression mécanique (70 MPa) permet la densification de la poudre sous la forme d'un disque

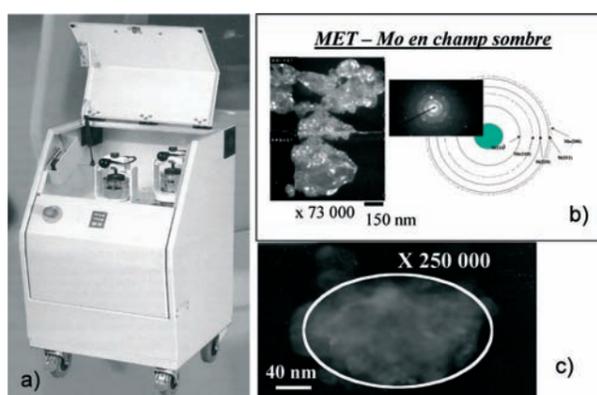


Figure 1 : Description de l'étape d'activation mécanique pour élaborer à partir d'un broyeur planétaire de type P4 (photo a) un mélange mécaniquement activé noté $n(\text{Mo}+2\text{Si})$. Ce traitement mécanique conduit à la formation d'agglomérats de taille micrométrique constitués de nanocristallites (photos b et c) sans former le composé désiré $n(\text{MoSi}_2)$.

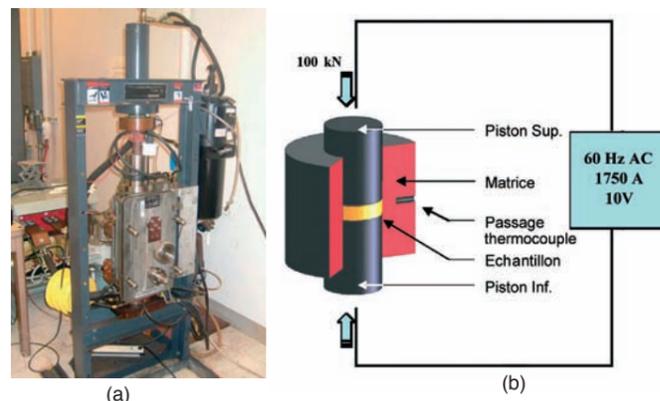


Figure 2 : Description de l'étape de synthèse - Consolidation. Vue d'ensemble du dispositif FAPAS comprenant une presse uniaxiale et une enceinte réactionnelle (photo a). Dans cette dernière, le mélange mécaniquement activé est placé dans un moule en carbone graphite (photo b). Le courant électrique qui passe au travers de la matrice et de l'échantillon permet d'initier la réaction $n(\text{Mo}+2\text{Si}) \rightarrow n(\text{MoSi}_2)$ dans tout l'échantillon. Simultanément, le contrôle de la pression pour atteindre une densification maximale est assuré.

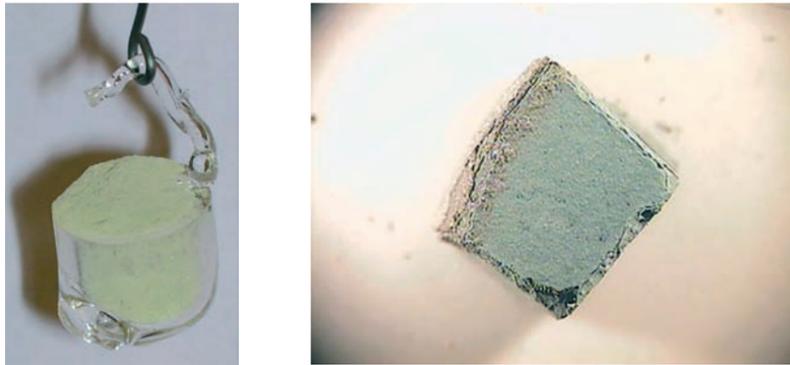


Figure 3 : Comparaison entre un MoSi₂ microstructuré oxydé sous air pendant 7 jours à 400 °C : le massif est totalement transformé en poudre (photo a) et un MoSi₂ nanostructuré oxydé sous air pendant 11 semaines à 400°C : le massif est peu affecté (photo b).

massif de 20 mm de diamètre et de 5 mm d'épaisseur et, ce, pendant une durée allant de 2 à 5 min (Figure 2). Ce procédé de frittage « flash » qui conduit à l'élaboration de matériaux à microstructure et à taux de densification contrôlés permet alors d'aller plus loin dans la compréhension du rôle de la dimension des grains sur les propriétés et, ainsi d'aller vers une maîtrise de ces dernières.

Les matériaux intermétalliques précédemment élaborés ont notamment été testés en conditions d'oxydation à haute température. Leur résistance à l'oxydation est spectaculaire puisque les vitesses de croissance des couches d'oxyde sont diminuées mais surtout l'adhérence des produits de corrosion au substrat sous-jacent est nettement améliorée. Les couches d'oxyde peuvent alors parfaitement jouer leur rôle de barrières protectrices, isolant ainsi le composé intermétallique sous-jacent de l'atmosphère gazeuse agressive. Enfin, la désintégration en poudre de certains composés intermétalliques lors de leur oxydation à basse température ($400 < T < 600$ °C) (figure 3-a) est inhibée lorsque les composés de départ sont nanostructurés, comme l'illustre la figure 3-b. La nanostructure de ces composés permet par conséquent d'envisager leur utilisation dans des gammes de températures non utilisables avec les intermétalliques classiquement élaborés. ■

Bibliographie

- Brevet international : US Patent N° 6 200 515 B1 - 13 Mars 2001 : « One-Step Synthesis and Consolidation of Nano-phase Materials » - Pr. Z.A. MUNIR (Université de Californie, Davis), E. GAFFET (UMR 5060 CNRS- UTBM Sévenans), F.CHARLOT et F.BERNARD (LRRS - UMR 5613 CNRS - Université de Bourgogne).
- S. PARIS, F. BERNARD, E. GAFFET, Z.A. MUNIR. « Spark Plasma Synthesis from Mechanically Activated Powders: a Versatile Route for Producing Dense Nano-Aluminides » *Scripta Materiala* 50 (5) (2004) : 691-696.
- O. EL KEDIM, S. PARIS, C. PIGHINI, E. GAFFET, Z.A. MUNIR, F. BERNARD, « Electrochemical Behaviour of Nanocrystalline Iron Aluminide Obtained by Mechanically Activated Field Activated Pressure Assisted Synthesis », *Materials Science and Engineering A* 369 (2004) : 49-55.
- S. PARIS, C. VALOT, F. BERNARD, E. GAFFET, Z.A. MUNIR, « Investigation of MAFAPAS Processing Parameters for Producing Dense Nanostructured Materials », *Journal of Materials Research* 18 (2003) : 2331-2338.
- Ch. GRAS, F. BERNARD, F. CHARLOT, E. GAFFET, Z.A. MUNIR, « Simultaneous Synthesis and Consolidation of Nanostructured MoSi₂ », *Journal of Materials Research* 17 (3) (2002) : 542-549.
- F. BERNARD, F. CHARLOT, E. GAFFET, Z.A. MUNIR, « One-Step Synthesis and Consolidation of Nanoaluminides », *Journal of the American Ceramic Society* 84 (5) (2001) : 910-914.
- V. GAUTHIER, F. BERNARD, E. GAFFET, Z.A. MUNIR, J.P. LARPIN, « Synthesis of Nanocrystalline NbAl₃ by Mechanical and Field Activation », *Intermetallics* 9 (2001) : 571-580.
- S. PARIS, C. PIGNINI, S. CHEVALIER, O. EL KEDIM, E. GAFFET, Z.A. MUNIR, F. BERNARD, « Properties of a Dense Nanostructured FeAl Produced by MAFAPAS », *International Journal of SHS*, 12 (2003) : 137-148.
- S. CHEVALIER, J.P. LARPIN, E. GAFFET, Z.A. MUNIR, F. BERNARD, « Low and High Temperature Corrosion Resistance of a Dense Nanostructured MoSi₂ Produced by MAFAPAS », *International Journal of SHS* 12 (2003) : 333-341.

Chimie et développement durable

■ Igor TKATCHENKO, *Laboratoire de Synthèse et Electrosynthèse Organométalliques UMR 5188 CNRS-Université de Bourgogne*

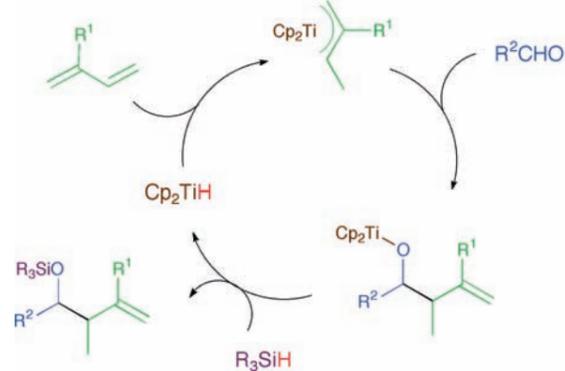
Une chimie « propre », par la suppression des effets préjudiciables à l'environnement et « économe », par son souci d'employer au mieux les molécules de base et l'énergie, est clairement un objectif majeur, qu'il faut associer au concept du développement durable. La réalisation de cet objectif implique une symbiose entre trois domaines de la chimie moléculaire : la chimie organique, la chimie organométallique et la chimie de coordination, et en conséquence un développement important de la catalyse, l'utilisation de méthodes d'activation spécifiques et la mise en œuvre de nouveaux milieux réactionnels.

Dans cet esprit le LSEO développe des activités, centrées sur l'emploi des métaux de transition, pour répondre aux défis suivants :

Comment rendre catalytique une réaction stœchiométrique ?

La chimie organométallique fournit des réactifs très spécifiques pour induire la formation de composés employés dans l'élaboration de médicaments, produits phytosanitaires, arômes, parfums, etc. Ces réactifs sont détruits lors des transformations chimiques qu'ils induisent. L'étude des mécanismes de ces transformations permet de résoudre ces difficultés par le recours à différents moyens.

Ainsi, l'emploi de co-réactifs judicieusement choisis, en l'occurrence le polyméthylhydrosiloxane, noté R₃SiH dans le cycle ci-dessous, permet de rendre catalytique une réaction d'allyltitanation : le réactif organométallique est recyclé et devient ainsi un catalyseur.



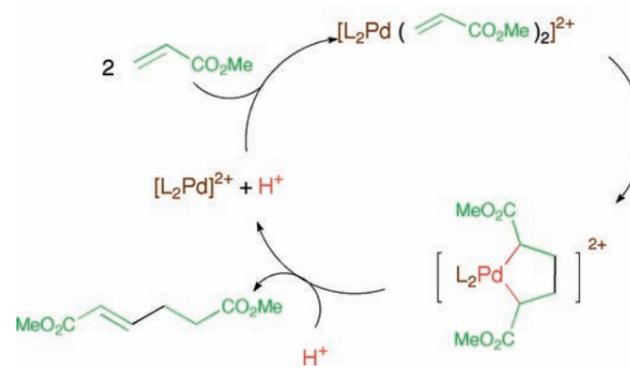
Réaction d'allyltitanation catalytique

Comment remplacer les solvants usuels ?

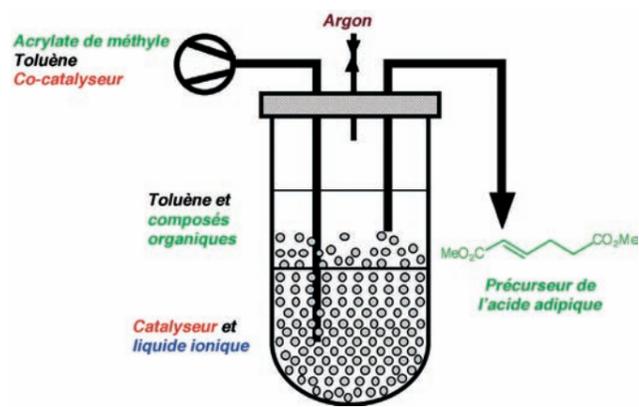
La majorité des réactions de synthèse nécessite l'emploi d'un solvant. Pour éviter leur rejet dans l'atmosphère, le chimiste a recours à de nouveaux solvants comme les liquides ioniques ou le dioxyde de carbone supercritique.

Les liquides ioniques sont non volatils et favorisent des réactions où apparaissent des charges de manière transitoire. En associant des catalyseurs ioniques à ces solvants particuliers il devient possible de conduire des réactions en milieu biphasique. Ainsi la dimérisation de l'acrylate de méthyle en un des précurseurs du nylon 6,6 est réalisée avec une excellente sélectivité en ce précurseur tout en stabilisant le système catalytique.

Le dioxyde de carbone est un gaz relativement inerte. Sous certaines conditions de température et de pression, il passe à l'état supercritique et se comporte comme un solvant aux propriétés étonnantes. Son emploi offre de nombreux avantages par rapport à un solvant organique : facilement accessible, peu réactif, recyclable, non toxique, il est souvent employé en combinaison avec un liquide ionique pour des réactions catalytiques en milieu biphasique. Associé au système catalytique précédent, il permet l'extraction des produits organiques avec une bonne efficacité.



Réaction de dimérisation de l'acrylate de méthyle



Dispositif pour la dimérisation en continu de l'acrylate de méthyle



Autoclave à fenêtres en saphir pour l'étude des réactions en milieu supercritique

Comment concevoir des réactions catalytiques respectant l'environnement ?

De nombreux réactifs employés en synthèse et catalyse organique sont dangereux et de plus en plus bannis par les réglementations. La préparation des carbonates et polycarbonates organiques fait appel au phosgène ou au monoxyde de carbone, gaz hautement toxiques. Malgré sa faible réactivité, le dioxyde de carbone, en combinaison avec un alcool et au contact de catalyseurs appropriés, conduit à ces produits aux nombreuses applications (verres organiques, disques compacts, etc.). L'approche prometteuse développée au LSEO utilise en outre le dioxyde de carbone en conditions supercritiques et conduit à la formation du carbonate de diméthyle par réaction du méthanol avec le dioxyde de carbone et de l'eau comme sous-produit. ■



Nanosciences : fils et boîtes quantiques fabriqués par phase vapeur à l'uB

■ Marco SACIOTTI - FR 2604 : équipe couches minces et nanostructures

Les nitrures d'éléments chimiques de la colonne III, AlN, GaN et InN sont des semi-conducteurs de type III-V dont la bande interdite varie de l'ultraviolet au rouge. Ils ont ouvert la voie à la réalisation de dispositifs optoélectroniques émettant dans l'UV, le bleu et plus largement dans le visible avec les diodes électroluminescentes et les lasers. Un des axes de recherche lié à ces matériaux est la mise au point d'une diode blanche d'une efficacité et brillance suffisante pour concurrencer la lampe à incandescence. Le rendement de la transformation d'énergie électrique en énergie lumineuse (par incandescence ou fluorescence 20 à 40 %) sera dans le futur concurrencée (environ 80 %) par la transformation opto-électronique des composés de la famille des nitrures et éventuellement d'autres matériaux II-VI. Ces matériaux de la famille GaN nécessitent d'être fabriqués en dimensions micro et nanométrique pour être plus efficaces, en forme de plans, fils ou point (dot) quantiques. La propriété quantique se manifeste lorsque les charges, l'électron par exemple, se trouvent piégées entre deux barrières (électriques). Les dimensions de ces pièges sont entre 1 à 10 nm dans les dispositifs actuels. La « rencontre » entre deux charges (+ et -) dans le semi-conducteur peut donner naissance à un photon (ou de la lumière).

La fabrication de structures micro et nanométriques à 3 dimensions déposées par phase vapeur avec des précurseurs organométalliques (MOCVD), composées de nitrures d'éléments III, avec des propriétés quantiques est un défi technologique pour ces applications citées en optoélectronique. Il reste encore très difficile de construire de telles structures avec un nombre limité de processus de fabrication.

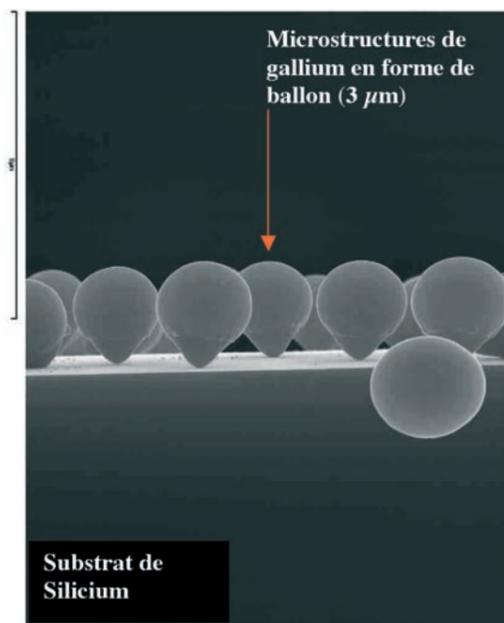
Notre équipe « Couches Minces et Nanostructures » (FR 2604) à l'Université de Bourgogne a développé des méthodes originales pour l'obtention de structures micro et nanostructurées dans les alliages du type (Ga, Al, In)N, GaInP,

GaCuO₂... (cf. figures ci-jointes, avec des images faites par microscopie électronique: SEM et TEM et leurs émissions de la lumière dans le visible).

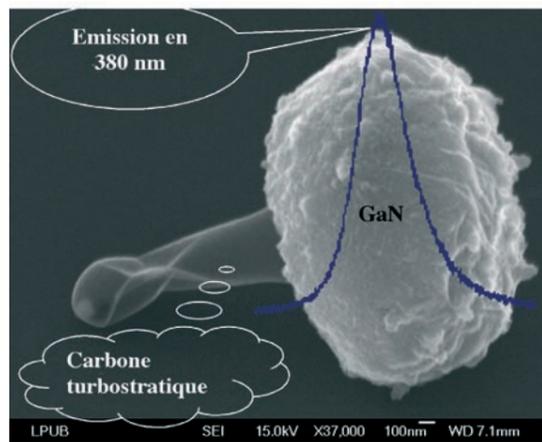
Ces résultats ont été obtenus en collaboration avec les laboratoires et industries tels que: LSP-Université J. Fourier et Les Rubis RSA (Grenoble), Opto+-Alcatel et LPN-CNRS (Marcoussis), LDRX-Unicamp-Brésil, LRRS et LPUB: (FR 2604 UB-Dijon). Ces résultats sont présentés dans les figures ci-contre. ■

Bibliographie

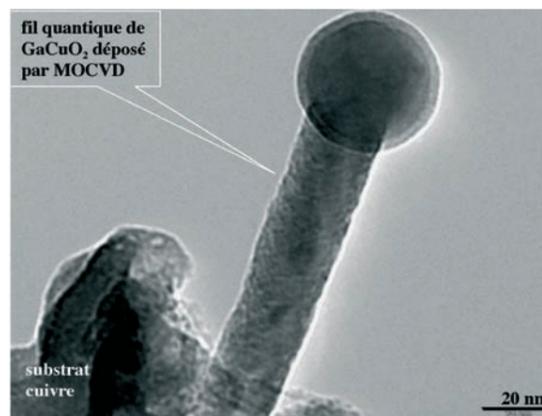
- M. SACIOTTI, L. IMHOFF, S. BOURGEOIS, C. DUMAS, J. DECOBERT, P. BALDECK, J. COLOMBIER, « MOVPE Growth of Ga 3D Structures for Fabrication of GaN Materials », *Crystal Growth* 261 (2004) : 253.
- L. IMHOFF, M. SACIOTTI, C. JOSSE COURTY, M. MESNIER, M.C. de LUCAS, S. BOURGEOIS, « Structural Characterization of Original 3D Gallium Structures Grown by LP-MOCVD », *Phys. Stat. Sol. (c)* 1 (2004) : 388.
- P.VISTE, I. COLOMBIER, F. DONATINI, J.C. VIAL, P. BALDECK, R. HERINO, A. DUC-MAUGÉ, J. GODFROY, Y. LACROUTE, M. SACIOTTI, « Optical and Structural Studies of GaN 3D Selectively Grown by MOCVD », *Journal of Crystal Growth* 272 (2004) : 466.
- M. SACIOTTI, L. IMHOFF, P.VISTE, C. DUMAS, J. C. VIAL, P. BALDECK, I. COLOMBIER, F. DONATINI, *Japanese Journal of Applied Physics* 43 (2004) L698.
- *Structural studies of nano/micrometric semiconducting GaInP wires grown by MOCVD*
M. SACIOTTI, J. DECOBERT, H. SICK, G. POST, P.VISTE, C. DUMAS, G. PATRIARCHE, *Journal of Crystal Growth* 272 (2004) 198.



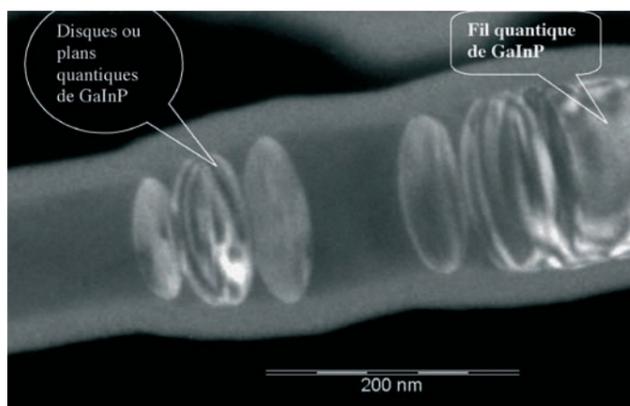
Structures du type montgolfières (gallium métallique), déposées par la technique MOCVD de l'UB FR 2604 (figure prise au MEB-LRRS-Dijon)



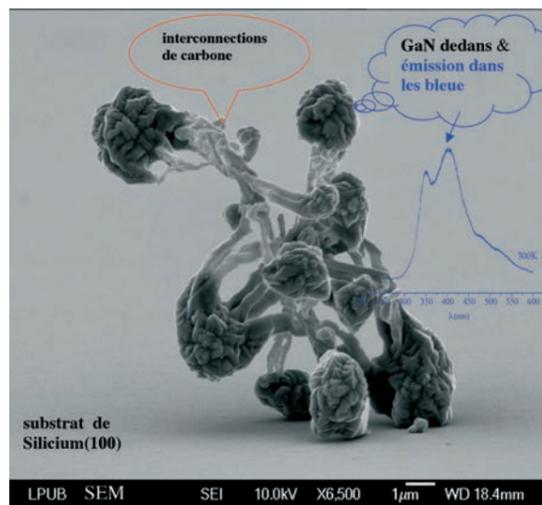
Emission de la lumière (385 nm) par excitation électronique MEB d'une structure du type mongolfière, recuite et transformée en nanocristaux (≈ 10 nm) de GaN. (LPUB-Dijon et LSP-Grenoble)



Structures du type "fil quantique", déposées sur des substrats métalliques (cuivre), par la technique MOCVD à l'UB - FR 2604 (Figure prise au microscope électronique (HRTEM) faite au LPN-CNRS-Marcoussis par G. Patriarche).



Structure du type fil quantique de GaInP, déposée sur InP par MOCVD à la FR 2604. Figure prise au microscope électronique (HRTEM) faite au LPN-CNRS-Marcoussis par G. Patriarche).



Structure du type "neurone" (Ga couvert par une membrane en carbone), déposée par la technique MOCVD et nitrurée (GaN) pour obtenir l'émission de lumière dans le visible (FR 2604-Dijon, LSP-Grenoble et LPUB-Dijon).

Crédit photographique : M. Yvon Lacroute, laboratoire de physique de l'UB : LPUB-Dijon Mme C. Josse-Courty, LRRS-Dijon M. Gilles Patriarche, LPN-CNRS-Marcoussis

Applications de la simulation numérique à la science des matériaux

■ Marcos SALAZAR et Olivier POLITANO
LRRS-UMR 5613 CNRS

Les supercalculateurs ont permis un développement important des modèles de simulation numérique qui décrivent avec réalisme l'évolution de systèmes complexes. Ces simulations, associées aux expériences, ont permis le développement de codes de simulations fiables, par exemple de « crash-tests » automobiles (pour la mise au point de véhicules plus sûrs), de modèles de simulation météorologique (prévisions à six jours) ou de modèles de simulation des réactions nucléaires (pour la conception de futurs réacteurs). Pour ce faire, la technique utilisée est la simulation par dynamique moléculaire [1]. Elle permet de reproduire le mouvement des atomes dans la matière (métal, céramique, plastique...).

La dynamique moléculaire décrit les atomes d'un matériau par des sphères dures reliées entre elles par des ressorts¹ qui sont caractéristiques du matériau étudié. L'utilisation d'un supercalculateur permet de déterminer le mouvement de plusieurs millions de ces sphères dont l'ensemble constitue un échantillon de quelques nanomètres². C'est grâce à de tels calculs que les propriétés physiques des matériaux (dureté, dilatation thermique, structure cristalline...) peuvent être déduites.

Dans de nombreuses applications, les expériences en laboratoire permettent de suivre l'évolution des systèmes, mais elles ne peuvent pas donner l'évolution en temps réel (in-situ) des mécanismes intervenant aux plus petites échelles de la matière (cf. l'Angström = $1.0 \cdot 10^{-10}$ m). L'étude de la corrosion qui se produit quand l'oxygène de l'air se lie à un métal pour former un oxyde³ en est une parfaite illustration. En laboratoire, on utilise une thermo-balance pour caractériser la vitesse de formation de la couche d'oxyde. L'échantillon obtenu est étudié a posteriori, mais nous ignorons comment la liaison entre l'oxygène et le métal se forme ou comment la migration de l'oxygène dans le métal se produit. La réponse à ces inconnues peut être apportée en utilisant les plus récents développements de la dynamique moléculaire. La figure 1 représente diverses étapes d'une oxydation

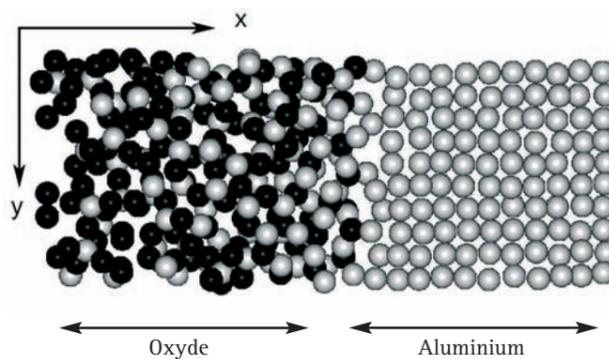


Figure 1
Film d'oxyde formé à la surface de l'aluminium après 384ps de simulations. La simulation est réalisée dans des conditions proches de celles qui sont rencontrées expérimentalement : la surface d'une plaque d'aluminium est soumise à une pression d'oxygène constante et l'on suit au cours du temps la formation du film d'oxyde à température constante. Les atomes d'aluminium sont représentés en gris et ceux d'oxygène en rouge. On peut ainsi observer l'évolution de la composition et de la structure du film (structure cristalline, présence de porosité,...) en fonction du temps. Ces films minces sont très largement utilisés dans de nombreuses applications (microélectronique, support de catalyseur, barrière anti-diffusion...) pour lesquelles la maîtrise de l'épaisseur et de la composition du film est primordiale.

« numérique »⁴ conduisant à la formation d'un film mince d'oxyde. Cette étude permet de décrire et d'analyser l'intrication des différents mécanismes atomiques qui déterminent les propriétés physico-chimiques du film d'oxyde [2].

D'autre part, la détermination précise des propriétés mécaniques des matériaux nano-structurés est un facteur essentiel dans leur conception et leur fabrication. De ces études dépend le développement des nouveaux matériaux⁵ qui façonneront le paysage technologique futur. Notre contribution scientifique dans ce domaine concerne les propriétés mécaniques des nanomatériaux. Nos simulations étudient les processus physiques qui confèrent à ces matériaux des propriétés novatrices. La figure 2 montre l'émission d'un défaut (dislocation) dans l'intérieur d'un des grains qui

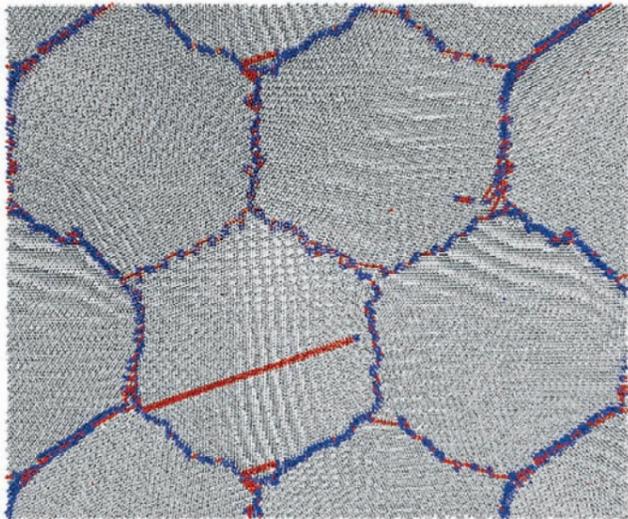


Figure 2
Cette figure montre un polycristal d'aluminium (Al). Les atomes en bleus représentent les joints de grain, ceux en gris les atomes d'Al dans leur position normale (cubique face centrée) et les atomes en rouge sont caractéristiques des défauts (dislocations). On peut observer comment les défauts (lignes rouges) cisailent les grains au cours de leur déplacement pendant la déformation.

constituent le matériau quand on applique une force externe. Ce mécanisme est supposé être un des principaux responsables de la déformation plastique des nanomatériaux [3].

Les deux dernières applications illustrent que simulation et expérience sont deux approches complémentaires. Elles se révèlent indispensables pour une maîtrise des processus physico-chimiques et pour le développement de matériaux qui seront d'usage courant dans les années à venir. ■

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la Région Bourgogne pour son soutien à l'ensemble de ces études et notamment le financement du postdoc de A. Hasnaoui.

Notes

- ¹ le potentiel inter-atomique.
- ² 10-9 m (1000 fois plus fin qu'un cheveu).
- ³ par exemple, la couche de rouille à la surface d'un morceau de fer.
- ⁴ Simulation réalisée sur les supercalculateurs du CRI de l'Université de Bourgogne.
- ⁵ Nano-tubes de carbones, nano-capteurs, nano-poudres.

Bibliographie

- 1) D. FRENKEL et B. SMIT, *Understanding Molecular Simulation*, 2^e édition, Academic Press, 2002.
- 2) A. HASNAOUI, O. POLITANO, M. SALAZAR, G. ARAL, A. NAKANO et P. VASHISHTA, à paraître dans *Surface Science* 2005.
- 3) V. YAMAKOV, D. WOLF, J.M. SALAZAR, S.R. PHILLPOT et H. GLEITER, *Acta Materialia* 49 (2001) : 2713-2722.