

# **Bistabilité moléculaire, transition de spin et traitement de l'information : une aventure scientifique**

par Olivier KAHN  
Laboratoire des Sciences Moléculaires,  
Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux,  
UPR CNRS n° 9048 - 33608 Pessac

---

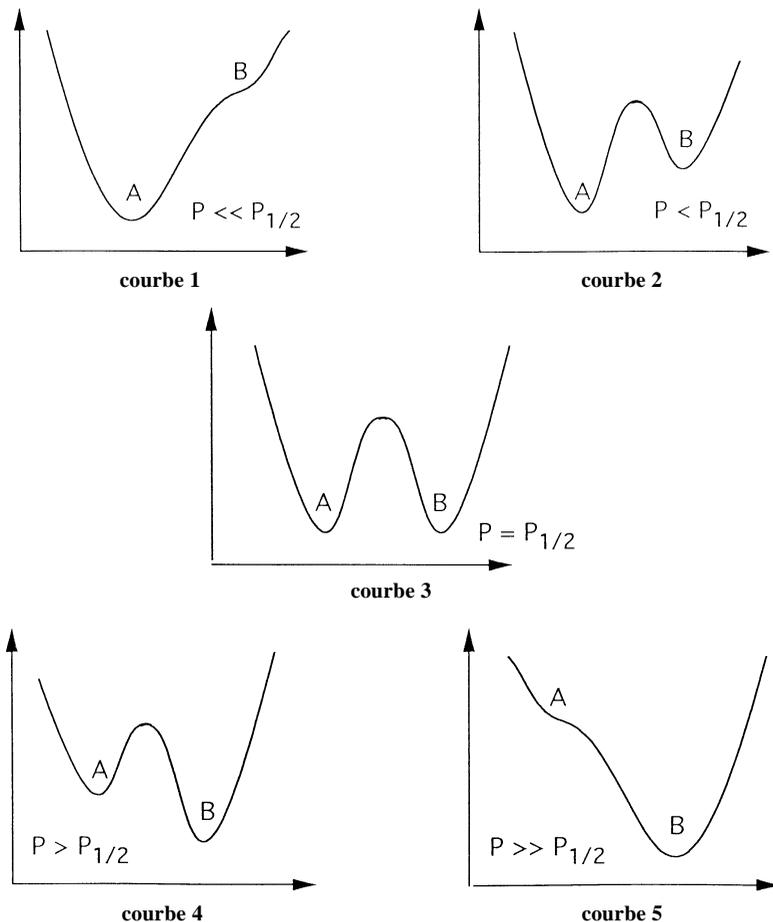
Nous voudrions raconter une histoire, une histoire de nature scientifique, mais cependant une histoire commençant comme beaucoup d'histoires par «il était une fois». Il était une fois, voici un peu plus d'une dizaine d'années un petit groupe de chercheurs en chimie moléculaire qui avaient décidé d'aborder un nouveau sujet de recherche à l'interface entre leur discipline et le traitement de l'information. Plus précisément, ils se sont demandés si, en utilisant toutes les potentialités de synthèse de la chimie moléculaire, il serait possible d'obtenir des composés originaux susceptibles de jouer le rôle d'éléments actifs dans des dispositifs de traitement de l'information. Nous ne raconterons bien sûr pas cette histoire dans ses moindres détails. Nous voudrions plutôt en saisir quelques moments, en préciser l'esprit, en dégager quelques résultats.

## **BISTABILITÉ MOLÉCULAIRE**

Nous avons un but, à la fois ambitieux et ouvert, qui nous laissait une certaine marge de manœuvre. A ce but au contenu encore vague, il fallait dans un premier temps associer un concept plus précis ; ce sera le concept de bistabilité moléculaire.

Cette bistabilité moléculaire est définie comme la propriété pour un système moléculaire de présenter deux états électroniques stables dans un certain domaine d'environnement extérieur ; l'un des deux états est en général le véritable état stable, de plus basse énergie, et l'autre un état métastable dans lequel le système peut rester piégé. Définissons par A et B ces deux états ; dans le domaine d'environnement considéré, le système sera dans l'état A ou l'état B selon son histoire, donc selon l'information qui lui aura été fournie. Cette situation peut mieux se comprendre si l'on admet que la variation de l'énergie du système en fonction d'une variable interne est représentée par des courbes du type de celles de la figure 1. Ces courbes correspondent à différentes valeurs d'une perturbation externe P décrivant l'environnement du

système. Lorsque  $P$  est suffisamment petit, on a un état stable  $A$  et un état instable  $B$  (courbe 1). Lorsque  $P$  augmente, l'état  $A$  reste d'abord l'état stable, mais l'état  $B$  est moins haut en énergie, et présente un minimum secondaire (courbe 2). Pour une certaine valeur de  $P$ , notée  $P_{1/2}$ , les deux états  $A$  et  $B$  ont la même énergie (courbe 3). Pour toute valeur de  $P$  supérieure à  $P_{1/2}$  l'état  $B$  est maintenant plus bas en énergie. L'état excité  $A$  présente d'abord un minimum secondaire (courbe 4), puis ce minimum secondaire disparaît, et  $A$  devient un état instable (courbe 5).



**Figure 1** : Variation de l'énergie en fonction d'une coordonnée interne, pour différentes valeurs d'une perturbation externe, dans le cas d'un système bistable.

Imaginons maintenant que, pour quelque raison que ce soit, le système ne puisse franchir la barrière d'énergie entre un minimum secondaire et le minimum minimorum, donc peut rester piégé dans un minimum secondaire. S'il en est ainsi, le comportement du système dépend du sens dans lequel la perturbation  $P$  est appliquée. Si  $P$  augmente, les états du système associés aux courbes  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$  seront A-A-A-A-B. Si  $P$  diminue, lorsque l'on passe progressivement de la courbe 5 à la courbe 1, les états du système sont B-B-B-B-A. En particulier pour la valeur  $P_{1/2}$  de la perturbation, l'état du système est A ou B selon que  $P_{1/2}$  est atteint en augmentant ou diminuant la perturbation. Cet état du système en  $P_{1/2}$  renseigne sur l'histoire de ce système. Cette bistabilité permet donc de stocker une information binaire, et si les états A et B se distinguent aisément par certaines propriétés physiques, en particulier optiques, de lire cette information.

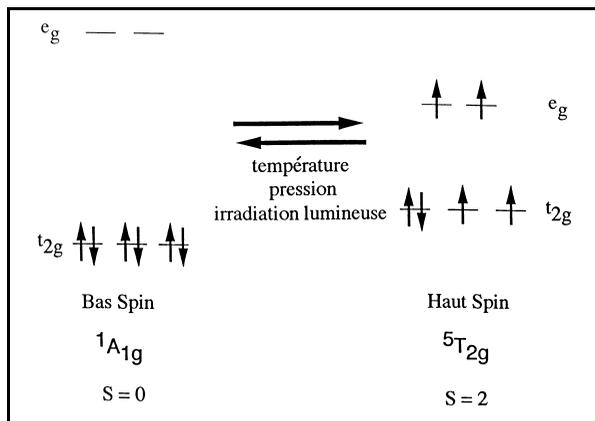
Notons tout de suite une difficulté dans ce qui précède, à savoir que nous n'avons pas précisé si notre système consistait en une seule molécule, il s'agit alors d'un système microscopique régi par la mécanique quantique, ou en une assemblée de molécules, il peut s'agir alors d'un système macroscopique, régi par la thermodynamique. N'allons pas plus loin dans l'analyse de cette difficulté, et retenons que ce dont nous avons besoin, ce sont non seulement des courbes énergétiques à double puits, comme représentées sur la figure 1, mais aussi d'une impossibilité pour le système de franchir la barrière de potentielle entre les états A et B, de sorte que la transition entre ces deux états ne s'effectue que lorsque le minimum secondaire disparaît.

## PHÉNOMÈNE DE TRANSITION DE SPIN

Quelle est la pertinence du concept de bistabilité moléculaire ? En d'autres termes, existent-ils des systèmes moléculaires bistables ? La réponse, on l'aura deviné, est oui. L'exemple le plus spectaculaire de bistabilité moléculaire est offert par le phénomène de transition de spin. Introduisons ce phénomène de façon simple. Nous considérons un ion  $\text{Fe}^{2+}$  entouré de six groupements chimiques appelés ligands situés aux six sommets d'un octaèdre régulier. Cet ion  $\text{Fe}^{2+}$  possède six électrons de valence occupant les orbitales 3d au nombre de cinq. Ces cinq orbitales 3d ont toutes la même énergie lorsque l'ion  $\text{Fe}^{2+}$  est libre. Par contre dans l'édifice octaédrique, elles se distribuent en deux niveaux ; trois d'entre elles, appelées  $t_{2g}$ , sont plus stables que les deux autres, appelées  $e_g$ . L'écart d'énergie  $e_g - t_{2g}$  est noté  $\Delta$ . Le plus souvent, cet écart est suffisamment faible pour que l'état fondamental obéisse à la règle de Hund. Le composé possède alors quatre électrons célibataires, donc un spin électronique  $S = 2$ . Dans quelques cas,  $\Delta$  est plus grand, et l'état fondamental est issu de la configuration électronique dans laquelle les six électrons forment trois paires occupant les orbitales

$t_{2g}$ . Il n'y a plus d'électron célibataire. Le spin électronique est  $S = 0$ . Ces deux états,  $S = 2$  et  $S = 0$ , sont dits haut-spin (HS) et bas-spin (BS), respectivement. En plus des composés dont l'état fondamental est HS ou BS, il existe quelques dizaines de composés pour lesquels en quelque sorte la nature hésite entre ces états HS et BS. En fait, l'état dépend de l'environnement, et une faible variation de cet environnement peut engendrer une transition entre les états HS et BS. Cette transition peut être induite par une variation de température, de pression, ou par une irradiation lumineuse. Nous nous intéresserons uniquement par la suite aux transitions de spin thermiquement induites, se produisant à l'état solide.

Le processus microscopique est représenté dans la figure 2. La transition de spin correspond au transfert de deux électrons entre les orbitales  $t_{2g}$  et  $e_g$ , accompagné du renversement des spins. Une information importante émane de cette figure 2, à savoir que dans l'état HS, les orbitales les moins stables  $e_g$  sont doublement occupées, ce qui entraîne un affaiblissement et un allongement des liaisons entre l'atome de fer et les six ligands. Cet allongement peut être vu aussi comme une dilation de la sphère de coordination dans l'état HS par rapport à l'état BS.



*A l'échelle moléculaire, la transition de spin correspond à un transfert d'électrons intraionique, accompagné d'un renversement des spins*

*Dans l'état haut-spin, les orbitales antiliantes  $e_g$  sont peuplées, ce qui conduit à un allongement des distances Fe-ligand.*

**Figure 2 :** Configuration électronique et états fondamentaux d'un composé octaédrique du  $Fe^{2+}$ .

## INTERACTIONS INTERMOLÉCULAIRES ET COOPÉRATIVITÉ

A l'état solide, on a à faire, non pas à une molécule isolée, mais à une assemblée de molécules, et l'approche macroscopique conduit à considérer l'équilibre physique  $BS \rightleftharpoons HS$  et son déplacement en fonction de la température  $T$  qui jouera le rôle de la perturbation. Cet équilibre est régi par la variation d'enthalpie libre  $\Delta G^\circ$  entre les états HS et BS. A pression constante, on a  $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$  où  $\Delta H^\circ$  réfère à la variation d'enthalpie et  $\Delta S^\circ$  à la variation d'entropie.  $\Delta G^\circ$  est nulle à la température  $T_{1/2}$  pour laquelle on a 50 % de molécules HS et 50 % de molécules BS.  $T_{1/2}$  est donc égal à  $\Delta H^\circ/\Delta S^\circ$ . La variation d'entropie  $\Delta S^\circ$  entre les états HS et BS est nécessairement positive. En effet, le désordre, tant de nature électronique (la dégénérescence de spin) que de nature nucléaire (l'affaiblissement des liaisons Fe-ligand) est plus élevé dans l'état HS. On en déduit que  $\Delta H^\circ$  est également positif. De ce raisonnement très simple, on déduit une conséquence essentielle. A basse température, en deçà de  $T_{1/2}$ ,  $\Delta G^\circ$  est positif et les molécules BS sont en plus grand nombre, et cela d'autant que la température est plus basse. A  $T = T_{1/2}$ , on a par définition 50 % de molécules HS et 50 % de molécules BS. A haute température, au-dessus de  $T_{1/2}$ , les molécules HS dominent, et cela d'autant que la température est plus élevée.

Le phénomène de transition de spin a été observé pour la première fois voici quelques soixante ans. Ce n'est cependant qu'à partir du début des années 1970 que quelques laboratoires de physique du solide se sont penchés sur ce phénomène pour chercher à mieux le comprendre. Presque tous ont fait porter leurs efforts sur un composé type, à savoir  $Fe(phen)_2(NCS)_2$  avec phen = *ortho*-phénantroline, dont la structure est représentée sur la figure 3. Cette structure a été résolue tant à la température ordinaire pour l'état HS qu'à 100 K pour l'état BS. La dilatation des liaisons Fe-N entre les deux états BS et HS est en moyenne de 0,18 Å. L'étude des propriétés magnétiques et calorimétriques révèle qu'une transition du premier ordre entre les états paramagnétique et diamagnétique se produit à 176 K. Le comportement est coopératif ; les molécules ne peuvent être considérées comme étant isolées dans le réseau cristallin. Cependant, les interactions intermoléculaires, du type interactions de van der Waals, restent faibles. La coopérativité est insuffisante pour engendrer une hystérésis thermique. Que l'on chauffe ou refroidisse le matériau, la transition se produit à la même température ; Le système ne présente pas d'effet mémoire, du moins en utilisant la température comme perturbation.

Sans doute est il nécessaire à ce stade de dire un mot du mécanisme de la coopérativité. Nous avons vu que cette coopérativité était liée aux interactions entre les sites actifs, mais n'avons pas précisé le mécanisme microscopique de ces interactions. En fait, les choses ne sont pas encore claires à cet égard. Il semble acquis que les interactions élastiques résultant de la modification de la taille des molécules entre les états BS et HS jouent un rôle important. Il a été suggéré que les interactions

électrostatiques entre molécules pouvaient être également impliquées dans cette coopérativité. La répartition de la densité électronique est certainement modifiée entre les états BS et HS. La coopérativité pourrait alors résulter de ce que l'interaction entre une molécule BS et une molécule HS est plus répulsive que la moyenne des interactions entre molécules de même spin.

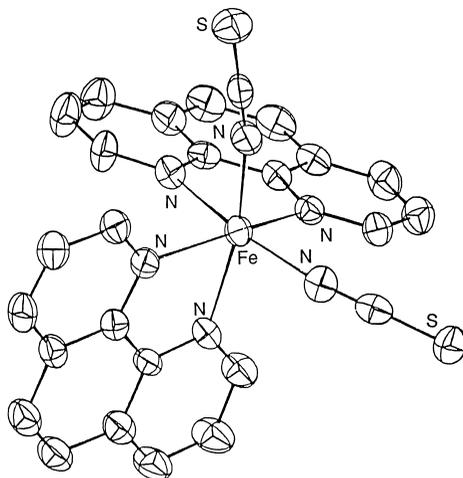
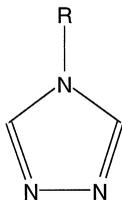


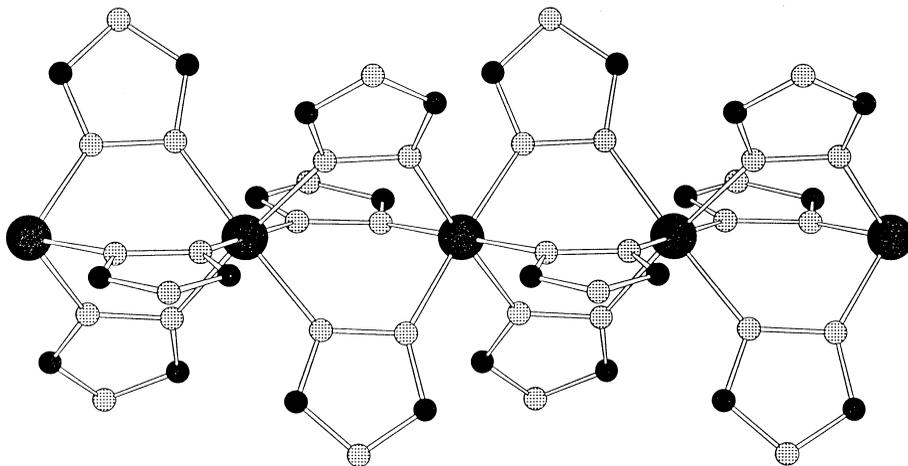
Figure 3 : Structure moléculaire de  $\text{Fe}(\text{phen})_2(\text{NCS})_2$ .

### MATÉRIAUX POLYMÉRIQUES À TRANSITION DE SPIN

C'est à la fin de la décennie 80 que nous sommes demandés s'il était possible d'accroître la coopérativité, et qu'il nous est apparu que cela pouvait être réalisé en remplaçant les cristaux moléculaires du type  $\text{Fe}(\text{phen})_2(\text{NCS})_2$  par des composés polymériques au sein desquels les sites actifs seraient reliés les uns aux autres par des ponts chimiques à travers lesquels un dialogue entre ces sites pourrait s'établir. Cela nous a conduit à étudier de façon approfondie le système  $\text{Fe}^{2+}/4\text{-R-1,2,4-triazole}$  où 4-R-1,2,4-triazole est une molécule représentée ci-dessous possédant un groupe R attaché à l'atome d'azote en position 4.



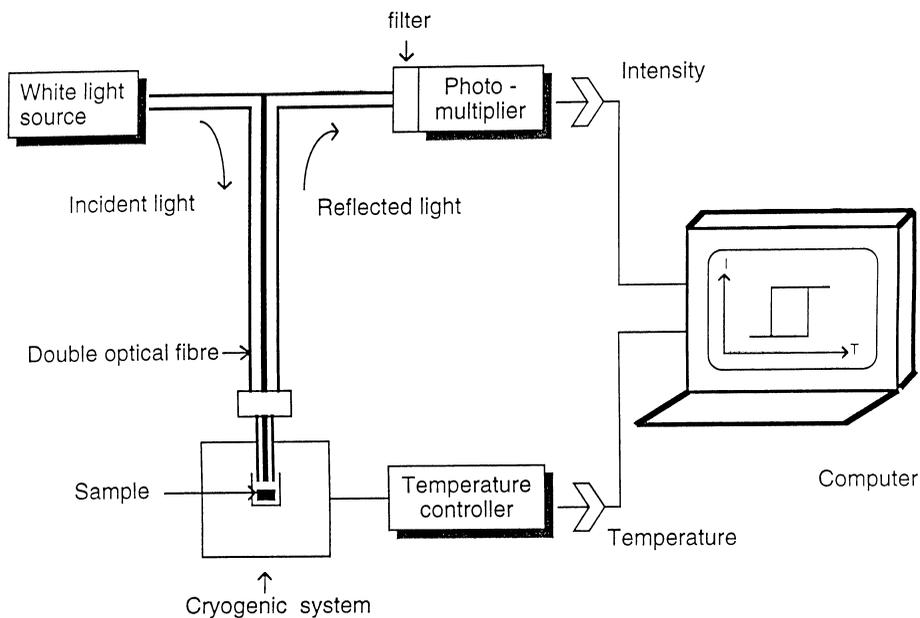
Les molécules de ce type sont susceptibles de jouer le rôle de ponts entre deux ions  $\text{Fe}^{2+}$  en se fixant sur ces ions par les atomes d'azote en position 1 et 2. L'action d'un sel de  $\text{Fe}^{2+}$  sur Rtrz conduit en général à un composé de formule  $[\text{Fe}(\text{Rtrz})_3]\text{A}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ , où  $\text{A}^-$  note un contre-anion monovalent. La structure de ces composés, représentée sur la figure 4, est celle d'une chaîne d'ions  $\text{Fe}^{2+}$  triplement pontés par des groupes triazole, les groupements R, omis dans cette figure 4, étant situés à la périphérie de la chaîne. Notons que les atomes de fer d'une chaîne sont strictement alignés dans l'état BS mais ne le sont probablement plus dans l'état HS. Dans ces composés, les groupes triazole jouent un double rôle. D'une part, ils créent un écart d'énergie  $\Delta$  entre orbitales  $e_g$  et  $t_{2g}$  correspondant à ce dont on a besoin pour obtenir une transition de spin ; d'autre part, de par leur caractère pontant, ils permettent un dialogue fort entre les ions  $\text{Fe}^{2+}$  le long de la chaîne, donc confèrent de la coopérativité au composé.



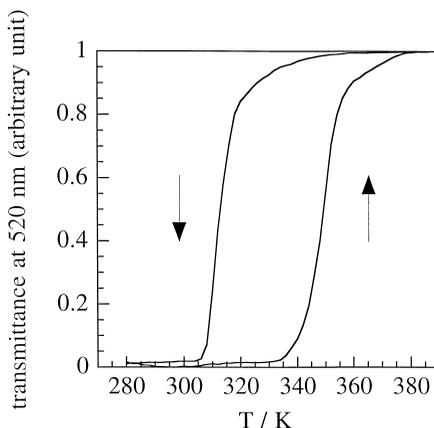
**Figure 4 :** Structure des composés polymériques  $[\text{Fe}(\text{Rtrz})_3]\text{A}_2$ .

Dans ces composés  $[\text{Fe}(\text{Rtrz})_3]\text{A}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  le régime de transition de spin dépend de trois facteurs chimiques, à savoir la nature du groupe R de Rtrz, la nature du contre-anion  $\text{A}^-$ , et la présence éventuelle de molécules d'eau dans la maille cristalline, qui en créant des liaisons hydrogène entre les chaînes accroissent encore le comportement coopératif du système. Par ailleurs, la transition de spin est toujours accompagnée d'un spectaculaire changement de couleur. Dans l'état BS, les composés sont violets ; ils absorbent la lumière à 520 nm. Cette longueur d'onde est associée à la transition

électronique entre l'état fondamental  $S = 0$  et le premier état excité de même spin. Par contre, dans l'état HS les composés sont blancs ; ils n'absorbent pas dans le domaine visible. La transition permise de spin de plus basse énergie est située à la limite de l'infrarouge, vers 800 nm. Plusieurs composés présentent des transitions très abruptes, avec une hystérésis thermique de plusieurs dizaines de degrés. Il en est ainsi, par exemple, du composé  $[\text{Fe}(\text{NH}_2\text{trz})_3](\text{NO}_3)_2$ , avec  $\text{NH}_2\text{trz} = 4\text{-amino-1,2,4-triazole}$ . Les températures de transition sont  $T_c \uparrow = 348 \text{ K}$  en mode chauffage et  $T_c \downarrow = 313 \text{ K}$  en mode refroidissement. Entre ces deux températures, le composé est violet ou blanc, selon qu'on entre dans l'hystérésis thermique en chauffant ou en refroidissement. Ce thermochromisme permet de détecter l'hystérésis par une méthode optique, et non plus magnétique. Pour ce faire, nous avons mis au point le dispositif représenté dans la figure 5 qui permet de tracer la variation de la transmittance du matériau à 520 nm en fonction de la température, en chauffant et refroidissant. Dans le cas de  $[\text{Fe}(\text{NH}_2\text{trz})_3](\text{NO}_3)_2$ , la boucle d'hystérésis obtenue est représentée dans la figure 6.



**Figure 5 :** Dispositif permettant la détection optique des transitions de spin dans les composés pour lesquels un changement de couleur est associé à la transition entre les états HS et BS.



**Figure 6 :** Boucle d'hystérésis thermique pour  $[\text{Fe}(\text{NH}_2\text{trz})_3](\text{NO}_3)_2$ .

A ce stade, nous pouvons nous demander dans quelle mesure le composé  $[\text{Fe}(\text{NH}_2\text{trz})_3](\text{NO}_3)_2$  peut être utilisé dans un processus d'affichage, par exemple en blanc sur un fond violet. Pour ce faire, il faut chauffer une couche mince du composé sur une surface correspondant à ce que l'on veut afficher, et cela à une température supérieure à  $T_c^- = 348 \text{ K}$ , puis revenir à une température située au milieu de la boucle d'hystérésis et conserver cette température. Pour effacer ce qui est affiché, on refroidira la même surface en deçà de  $T_c^+ = 313 \text{ K}$ . On conçoit immédiatement qu'une telle utilisation n'est pas idéale, en ce que le domaine de bistabilité du composé, définie par sa boucle d'hystérésis, n'englobe pas la température ordinaire. Un des objectifs de notre travail était donc de synthétiser un composé pour lequel la température ordinaire tomberait au milieu de la boucle d'hystérésis. Plusieurs voies peuvent être explorées pour atteindre ce but, par exemple travailler par essais et erreurs, en jouant sur les trois paramètres chimiques, le groupe R, le contre-anion, et la présence de molécules d'eau non coordonnées, ou bien trouver une approche plus subtile, moins soumise aux aléas de l'expérience scientifique. Nous avons trouvé une telle approche, basée sur le concept d'alliage moléculaire.

## ALLIAGES MOLÉCULAIRES

Précisons comment sont obtenus les alliages moléculaires. Dans un premier temps nous synthétisons un triazole  $R_1\text{trz}$ , puis le composé  $[\text{Fe}(R_1\text{trz})_3]A_2$  présentant une boucle d'hystérésis autour de la température  $T_1$ , au-dessus de la température ordinaire.

Dans un second temps, nous synthétisons un triazole  $R_2\text{trz}$ , puis le polymère  $[\text{Fe}(R_2\text{trz})_3] A_2$  présentant une boucle d'hystérésis autour de  $T_2$ , au-dessous de la température ordinaire. Un mélange mécanique des deux composés  $[\text{Fe}(R_1\text{trz})_3] A_2$  et  $[\text{Fe}(R_2\text{trz})_3] A_2$  présentera évidemment les deux transitions, autour de  $T_1$  et de  $T_2$ , avec des intensités relatives dépendant de la composition du mélange. Un tel mélange n'a bien sûr aucun intérêt. Par contre, il est possible de préparer des alliages de composition  $\text{Fe}(R_1\text{trz})_{3-3x} (R_2\text{trz})_{3x} A_2$  présentant un régime unique de transition de spin, autour d'une température définie de façon non ambiguë par la seule composition de l'alliage. On peut se demander ce qui différencie le mélange de l'alliage de même composition chimique. En fait, les structures chimiques ne sont pas du tout identiques. Dans le mélange, les chaînes contiennent toutes soit  $R_1\text{trz}$ , soit  $R_2\text{trz}$ . Dans l'alliage, par contre, chaque chaîne contient à la fois  $R_1\text{trz}$  et  $R_2\text{trz}$ , et cela dans des proportions définies par la composition de l'alliage.

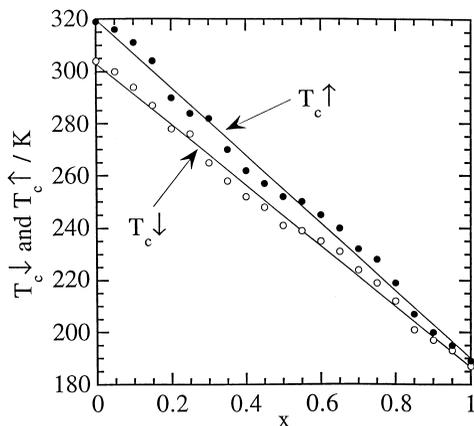
La première famille d'alliages étudiée répond à la formule :



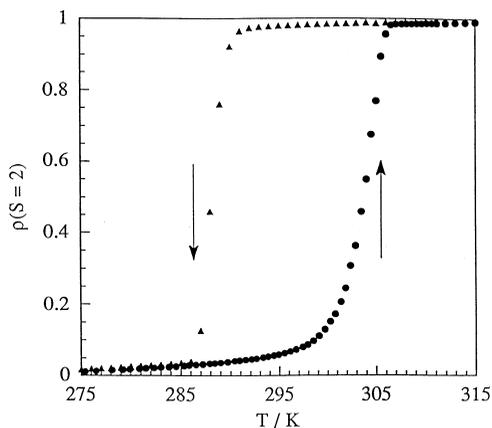
Les composés purs  $[\text{Fe}(\text{Htrz})_3] (\text{ClO}_4)_2$  et  $[\text{Fe}(\text{Htrz})_3] (\text{ClO}_4)_2$  présentent des transitions de spin, au-dessus de 293 K pour le premier, en-dessous pour le second. La figure 7 montre les évolutions de  $T_c^-$  et  $T_c^\circ$  en fonction de la composition de l'alliage. Les variations  $T_c^- = f(x)$  et  $T_c^\circ = f(x)$  sont quasiment linéaires. Pour une certaine composition, définie par  $x = 0,15$ ,  $T_c^-$  et  $T_c^\circ$  sont situées de part et d'autre de 293 K. Cet alliage est tel que la température ordinaire tombe au milieu de la boucle d'hystérésis, comme il est montré dans la figure 8.

## DES MATÉRIAUX À TRÈS LARGES HYSTÉRÉSIS APPARENTES

En fait, nous ne nous sommes pas limités à cette stratégie d'alliages moléculaires. Nous avons aussi systématiquement exploré le système  $\text{Fe}^{2+}/\text{Rtrz}/\text{A}^-/\text{H}_2\text{O}$ , et avons découvert des composés présentant des comportements tout à fait particuliers. Certains des composés, par exemple, sont préparés dans l'état BS ; ils sont de couleur violette. L'analyse révèle la présence de molécules d'eau dans le réseau cristallin. A une certaine température au-dessus de l'ambiante, ces molécules d'eau sont éliminées et de façon concomitante le composé passe dans l'état HS. Il devient blanc, et cela d'une façon extrêmement abrupte, en une fraction de degré. Une fois déshydratée, le composé présente un régime de transition de spin totalement différent. La transition  $\text{HS} \rightarrow \text{BS}$



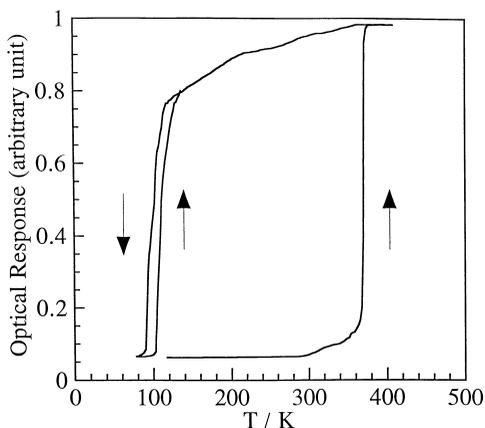
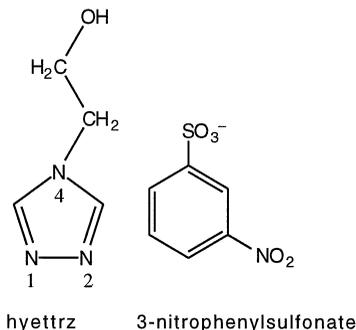
**Figure 7 :** Variation des températures de transition  $T_c^-$  et  $T_c^+$  pour les alliages moléculaires de composition  $[\text{Fe}(\text{Htrz})_{3-3x}(\text{NH}_2\text{trz})_{3x}](\text{ClO}_4)_2$ , en fonction de la composition de l'alliage.



**Figure 8 :** Boucle d'hystérésis thermique pour un alliage moléculaire  $[\text{Fe}(\text{Htrz})_{3-3x}(\text{NH}_2\text{trz})_{3x}](\text{ClO}_4)_2$  avec  $x = 0,15$  dont la composition a été définie afin que la température ordinaire tombe au milieu de l'hystérésis thermique.

se produit à une température beaucoup plus basse, parfois autour de 100 K, de sorte que l'ensemble du processus présente une hystérésis apparente très large. Une telle hystérésis apparente, de 270 K, est montrée dans la figure 9. Elle correspond au couple

$[\text{Fe}(\text{hyettrz})_3] (3\text{-nitrophenylsulfonate})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} - [\text{Fe}(\text{hyettrz})_3] (3\text{-nitrophenylsulfonate})_2$ .  
Les structures du triazole hyettrz et de l'anion sont représentées ci dessous :



**Figure 9** : Transitions de spin détectées optiquement pour le couple  $[\text{Fe}(\text{hyettrz})_3] (3\text{-nitrophenylsulfonate})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} - [\text{Fe}(\text{hyettrz})_3] (3\text{-nitrophenylsulfonate})_2$ , montrant une hystérésis apparent de 270 K.

L'intérêt d'un tel composé est qu'il peut être utilisé comme un capteur thermique donnant une réponse optique lorsque  $T_c$  a été atteint, par exemple comme une alerte lorsque la température dépasse une certaine limite. Des études sont en cours concernant l'utilisation comme détecteur de température limite dans le soin de certaines tumeurs par hyperthermie. On sait en effet que les cellules malades sont en général plus fragiles à l'hyperthermie que les cellules saines. Il est cependant crucial de ne pas dépasser une température seuil au-delà de laquelle une nécrose de toutes les cellules, malades

et saines, peut se produire. L'idée est de détecter la transition par imagerie de résonance magnétique (scanner RMN). Le composé est synthétisé de façon à présenter une transition de spin à la température seuil. En deçà de cette température, le composé est dans l'état BS diamagnétique, et ne perturbe pas les signaux RMN. Lorsque cette température seuil est atteinte, le composé est dans l'état HS paramagnétique et les signaux RMN sont immédiatement et profondément perturbés.

Un tel composé peut être également utilisé comme afficheur à usage unique, par exemple pour préciser le nombre d'unités restantes sur une carte téléphonique. A chaque fois que 10 % des unités seraient utilisées, 10 % d'une barre violette incorporée à la carte serait chauffée au-dessus de 370 K, ce qui conduirait à la transformation violet → blanc. Lorsque toutes les unités seraient utilisées, la barre serait entièrement blanche.

## CONCLUSION

Nous voici parvenu au terme de notre histoire. Il nous reste en quelque sorte à en tirer la morale, à tout le moins la philosophie. Celle-ci sera très subjective. Ce qui nous passionne dans cette histoire, c'est qu'elle combine toute la beauté de la chimie moléculaire, ses potentialités, avec les possibilités d'obtenir une physique tout à fait originale. Nous ne nous arrêtons pas à un stade contemplatif de la chimie. Nous créons de nouveaux objets dans un premier temps ; nous cherchons à faire de ces objets les sujets d'une aventure originale dans un second temps. Nous leur conférons de la citoyenneté. Notre conviction, c'est qu'un champ de recherche immense s'offre à une telle démarche. De ce champ, nous voudrions contribuer à labourer puis à ensemercer quelques parcelles.